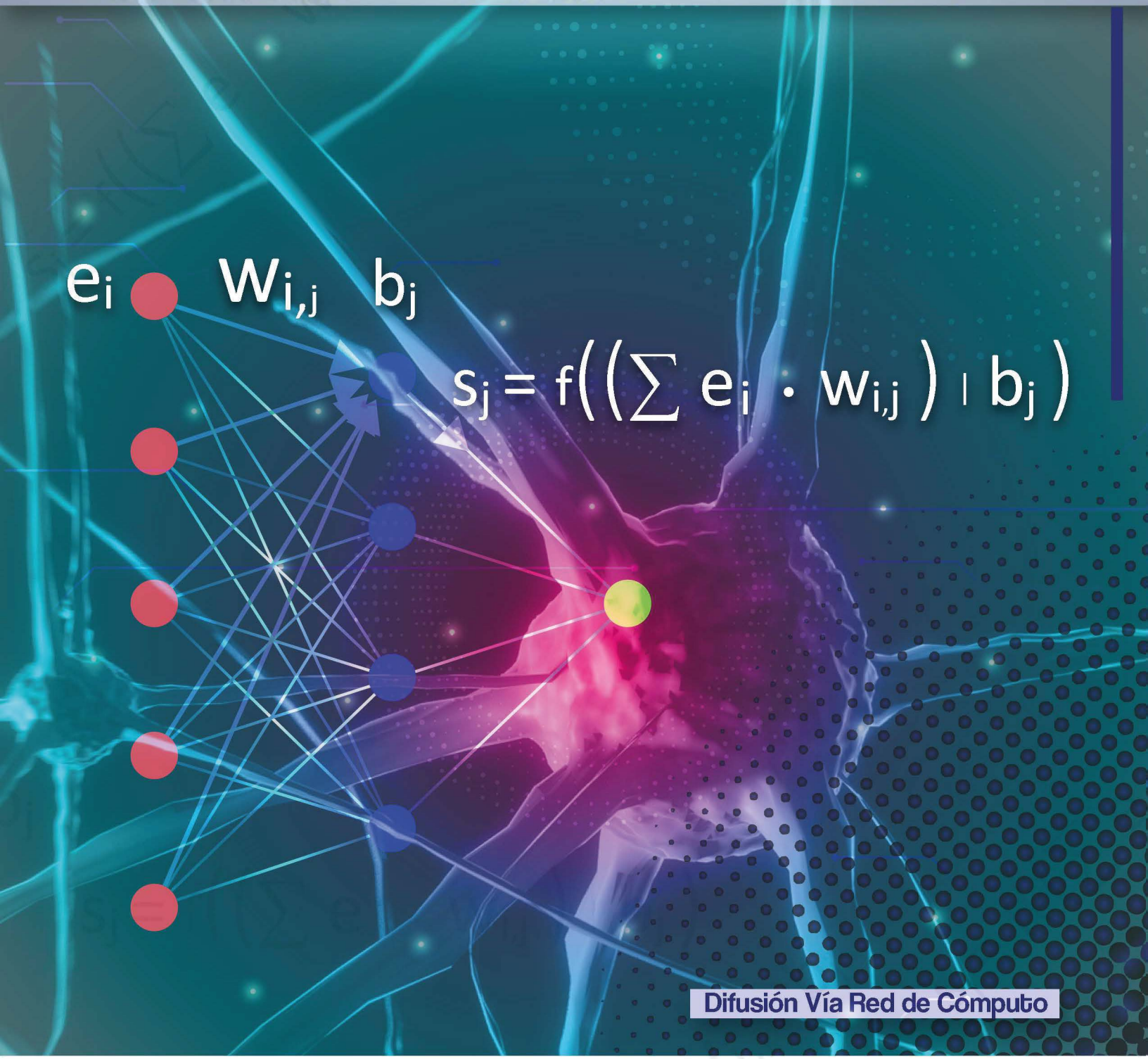
TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA

Julio-Diciembre 2021 Vol. 4 / 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 4, NÚMERO 2, JULIO - DICIEMBRE 2021. **ISSN: En trámite.**

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

Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada, Volumen 4, Núm. 2, Julio - Diciembre 2021, es una publicación semestral, publicada y editada por el Tecnológico Nacional de México dependiente de la Secretaría de Educación Pública, a través del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Avenida Universidad No. 1200, 5to. Piso, Colonia Xoco, Alcaldía Benito Juárez, C.P. 03330, Ciudad de México, México, Tel. + (52) 5536002500. Ext. 65064, d_vinculacion05@tecnm.mx, Editora Responsable M.C. Silvia Patricia Pérez Sabino. Reserva de derechos al uso exclusivo No. 04-2019-0222612512500-2013, ISSN: En trámite, ambos son otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor.

Responsable de la última actualización de este número M.C. Silvia Patricia Pérez Sabino, docente del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Colonia Palmira, Cuernavaca, Morelos, México, C.P. 62490, Tel. +(52) 777 3627770, fecha de término de última actualización, 10 de Diciembre de 2021.

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

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

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

DIRECTORIO

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

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

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

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

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

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

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

Dr. Hugo Estrada Esquivel
Jefe del Departamento de Ingeniería Electrónica

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

Portada: Imagen recabada y tratada de la Figura 1. Ejemplo de red neuronal con una capa oculta, del artículo de Ingeniería Electrónica, intitulado Simulación de ALU basada en circuito de perceptrón simple.

EDITORIAL

En este número que corresponde al Volumen 4, Número. 2 del periodo julio - diciembre 2021 de la Revista semestral Académica ´Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada´, del Tecnológico Nacional de México/ Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (TecNM/ CENIDET), se presentan 48 artículos que fueron aprobados por un Comité de Arbitraje interno y externo, integrado por prestigiados especialistas en las áreas de Ciencias Computacionales, Ingeniería Electrónica e Ingeniería Mecánica nacionales e internacionales de Universidades, Centros de Investigación y Empresas que desarrollan Investigación como: Tecnológico Nacional de México/ Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (TecNM/ CENIDET), Tecnológico Nacional de México campus Cuautla, Chihuahua, Orizaba, Tuxtla Gutiérrez, Universidad Autónoma de Baja California, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Instituto Politécnico Nacional, Tecnológico de Monterrey campus Guadalajara, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Universidad de Guadalajara, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Universidad de los Andes, Venezuela y la Universidad de País Vasco, España.

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

Es importante señalar que los artículos publicados en este segundo periodo de 2021, fueron expuestos por sus autores a través de las redes sociales del CENIDET, como parte de la 7ª Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada que se realizó del 17 al 19 de noviembre de 2021, de manera virtual, ante la contingencia sanitaria a un público abierto, cumpliendo una vez más con el objetivo de promover la investigación y la vocación científica-tecnológico entre estudiantes desde nivel licenciatura a posgrado, principalmente en las áreas de Ciencias Computacionales, Ingeniería Electrónica e Ingeniería Mecánica del Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (TecNM CENIDET).

Finalmente, es importante destacar que en este número participaron en el Comité Técnico el Dr. Manuel Adam Medina, quien también fue como Coordinador General de la 7ª. Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada; el Dr. Nimrod González Franco, el Dr. Juan Gabriel González Serna, la Dra. Susana Estefany de León Aldaco, el Dr. Andrés Blanco Ortega, el Dr. Arturo Abúndez Pliego, el Dr. Ricardo Fabricio Escobar Jiménez, a quienes se les agradece su total apoyo.

M.C. Silvia Patricia Pérez Sabino
Editora

JORNADA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA APLICADA

Comité de Arbitraje TecNM/CENIDET

Ciencias Computacionales

Dra. Alicia Martínez Rebollar
Dra. Andrea Magadan Salazar
Dr. Dante Mújica Vargas
Dr. Gerardo Reyes Salgado
Dr. Joaquín Pérez Ortega
Dra. Blanca Dina Valenzuela Robles
Dr. Juan Gabriel González Serna
Dr. Máximo López Sánchez
Dr. Moisés González García
Dr. Noé Castro Sánchez
Dra. Olivia Fragoso Díaz
Dr. Raúl Pinto Elías
Dr. René Santaolaya Salgado
Dr. Juan Carlos Rojas Pérez
Dr. Javier Ortiz Hernández
Dr. Nimrod González Franco
Dr. Hugo Estrada Esquivel
Dra. María Yazmín Hernández Pérez
Dr. José Luis Ramírez Alcántara

Ingeniería Electrónica

Dr. Gerardo Vicente Guerrero Ramírez
Dra. María Cristina Verde Rodarte
Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo
Dr. Carlos Daniel García Beltrán
Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza
Dra. María Guadalupe López López
Dr. Enrique Quintero Mármol
Dr. Víctor Manuel Alvarado Martínez
Dr. Manuel Adam Medina

Ingeniería Mecánica

Dr. Arturo Abúndez Pliego
Dr. Efraín Simá Moo
Dr. Eladio Martínez Rayón
Dr. Andrés Blanco Ortega
Dr. Jorge Colín Ocampo
Dr. José Jassón Flores Prieto
Dr. Miguel Ángel Chagolla Aranda
Dra. Claudia Cortés García
Dra. Sara Lilia Moya Acosta
Dr. Wilberth Melchor Alcocer Rosado
Dr. Jesús Perfecto Xamán Villaseñor
M.C. Víctor Iván Rodríguez Reyes

Comité de Arbitraje Externo

Ciencias Computacionales

Dr. Rodrigo López Farias
Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial

Dr. Efrén Mezura Montes
Universidad Veracruzana

Dra. Laura Cruz Reyes
Instituto Tecnológico de Ciudad Madero

Dr. José Alfredo Hernández Pérez
Universidad Autónoma del Estado de Morelos

Dra. Gina Gallegos García
Instituto Politécnico Nacional

Dr. Héctor Jiménez Salazar
Universidad Autónoma Metropolitana

Dr. Felipe de Jesús Torres del Carmen
Universidad de Guanajuato

Dr. Miguel González Mendoza
Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

Dra. Rocío Aldeco Pérez
Dra.Gemma Bel Enguix
Universidad Nacional Autónoma de México

Ingeniería Electrónica

Dra. Adriana del Carmen Téllez Anguiano
Instituto Tecnológico de Morelia

Dr. Cornelio Morales Morales
Instituto Tecnológico de Cuautla

Dra. Flor Lizeth Torres Ortíz
Dr. Gabriel Calzada Lara
Universidad Nacional Autónoma de México

Dr. Diego Alessis Carbot Rojas
Dr. David Juárez Romero
Dr. José Alfredo Hernández Pérez
Dr. Isaac Justine Canela Sánchez
Universidad Autónoma del Estado de Morelos

Dr. Samuel Gómez Peñate
Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez

Dra. Betty Yolanda López Zapata
Universidad Politécnica de Chiapas

Dr. José Hugo Arellano Pérez
Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

Dr. Felipe de Jesús Torres del Carmen
Universidad de Guanajuato

Dr. Gerardo Ortiz Torres
Dr. Alan Francisco Pérez Vidal
Universidad de Guadalajara

Ingeniería Mecánica

Dr. Vladimir Reyes Herrera
Dra. Guadalupe Huelsz Lesbros
Dr. Ramón Tovar Olvera
Universidad Nacional Autónoma de México

Dr. Jorge Bedolla Hernández
Tecnológico Nacional de México campus Apizaco

Dr. José Antonio Arellano Cabrera
Equipos Médicos Vizcarra

Dr. Quirino Estrada Barbosa
Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

Dr. Luis Manuel Palacios Pineda
Tecnológico Nacional de México campus Pachuca

Dr. Enrique Alcudia Zacarías
Dra. Miriam Siqueiros Hernández
Universidad Autónoma de Baja California

Dr. Iván Alejandro Hernández Pérez
Dra. Karla María Aguilar Castro
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

Dra. Adriana Herlinda Vilchis González
Universidad Autónoma del Estado de México

Dra. Aitziber Mancisidor Barinagarrementeria
Universidad del País Vasco, España.

JORNADA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA APLICADA

Consejo editorial de la publicación

M.C. Silvia Patricia Pérez Sabino
Editora

Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza
Coeditor

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

Ing. Víctor Josué Ruiz Martínez
Sitio Web

Oscar Edwin Chavez Zaragoza
Diseño de Portada

Oscar Edwin Chavez Zaragoza
Pilar Janet López Zárate
Diseño Editorial

Comité Técnico de los Artículos de la 7ª Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada

Dr. Manuel Adam Medina
Editor General de los Artículos

Dr. Nimrod González Franco
Dr. Juan Gabriel González Serna
Editor Asociado
Ciencias Computacionales

Dra. Susana Estefany de León Aldaco
Dr. Ricardo Fabricio Escobar Jiménez
Editores Asociados
Ingeniería Electrónica

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

Dr. Nimrod González Franco
Administrador de la plataforma
Easychair

EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

cenidet
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

CIENCIAS COMPUTACIONALES

Actores causantes del rezago educativo en México con mediación tecnológica, durante lapandemia del COVID-19 11

Sistema IoT LoRaWAN para el monitoreo de temperatura con ThingsBoard 17

Aplicación Web basada en software libre para el análisis de resultados en la curva de crecimiento de hongos patógenos Colletrotichum lindemuthian y fusarium solani 23

Arquitectura de un módulo para analizar el nivel de lectura y comprensión en el proceso de aprendizaje de matemáticas mediante señales fisiológicas 31

Implementación de un prototipo de aplicación móvil para detección de la respiración diafragmática como herramienta en la terapia de rehabilitación pulmonar remota 37

Aceptación Tecnológica de la Realidad Aumentada como herramienta de capacitación en la operación básica de máquina cortadora láser. 43

Identificación de Fármacos Mediante Técnicas de Visión e Inteligencia Artificial 48

Detección de objetos durante el desplazamiento vehicular, aplicando RANSAC y DBSCAN 54

Reconocimiento de emociones mediante el análisis de expresiones faciales 62

Adaptación de una métrica orientada a objetos hacia Microservicios 68

Patrones de comportamiento ocular durante inducción emocional en diferentes intensidades 74

Clasificación de métodos y algoritmos para la detección de caídas en adultos mayores 80

Herramienta para la detección de similitud extrínseca en documentos de texto. 86

Los colores del big data en el estudio del comportamiento de fenómenos climáticos 92

Uso de Power BI en el estudio de fallecidos a causa de la COVID-19 en México 96

Módulo de Reconocimiento de Objetos para Robot Móvil con Sistema SLAM. 102

Generación de corpus de comentarios de Amazon en español 108

Comparación de las herramientas de transcripción de voz a texto 114

Construcción de un sistema RBC para la recomendación de fisioterapia pulmonar en pacientes con EPOC 121

Modelado numérico de la influencia de la tasa de alimentación y parámetros fisicoquímicos, in situ, en relación con la ganancia de peso de Tilapia (Niloticus Oreocrhomis) 127

Detección automática de delitos en sistemas de videovigilancia: una Revisión Sistemática de la Literatura 133

Sistema de monitoreo de CO2 y TVOC en espacios confinados, basado en una plataforma IoT 139

La influencia del léxico afectivo en los discursos políticos y su relación con los resultados de las elecciones 145

Classification and Transmission System of ECG Signals on Development Board 151

Evaluaciones de legibilidad lingüística en artículos de Wikipedia 157

Diseño e implementación de un Data Warehouse de información escolar 161

Creación de módulo para ERP con conexión a hardware especializado utilizando protocolos de comunicación TCP/IP 167

Identificación de patologías en cultivos empleando aprendizaje profundo 171

Evaluación de un proceso de inducción emocional utilizando estímulos de productos digitales interactivos 178

INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Control basado en observador de la concentración de glucosa en pacientes con Diabetes Mellitus Tipo 1 185

Comparación de algoritmos de consenso para demostrar la eficacia de un protocolo de control basado en observador para resolver rendezvous en sistemas multiagentes estocásticos. 192

Desarrollo experimental de un dispositivo de atención médica para adultos mayores 198

Control basado en observador de entrada desconocida para controlar una estructura tipo edificio 204

Diseño de un reactor tubular continuo con agitadores estáticos para la producción de mono alquil ésteres 209

Evaluation of Photosensors for Laser Scanning Range Extension 213

Implementación hardware de filtros FIR de retraso fraccionario con valor ajustable en línea 220

Síntesis basada en Filtros Butterworth de Osciladores Caóticos con Derivadas de Orden Arbitrario* 226

Modelado del Sistema Cardiovascular mediante Bond Graph 232

Simulación de ALU basada en circuito de perceptrón simple 238

Estudio de un Inversor para la Alimentación de un Motor Reciprocante Magnético 244

Modelado de Sistemas Multi-Agente para el Problema de Transporte Aéreo con Carga Suspendida 251

Modelado de convertidor bidireccional Buck-Boost en MCC y MCD con intercambio de energía entre batería y bus de CD para aplicaciones de control robusto 257

Discriminación de la tolerancia a fallas en lazos de control* 262

Convertidor resonante LLC para la descarga de una batería de flujo 267

Robot móvil para la desinfección de interiores mediante luz UV-C 273



INGENIERÍA MECÁNICA

Fabrication and characterization of a cement-based mortar with supplementary additions of kaolin, vermiculite and pumice as a building material with low thermal conductivity 278

Evaluación térmica de una fachada típica en clima cálido 284

Análisis Cinemático de un Sistema de rehabilitación para miembros superiores con cables flexibles 290

Modelo Matemático de un Nuevo Absorbedor de Doble Masa Sintonizadas con Inercia Rotacional Conectado a un Edificio MDOF Sujeto a Aceleración Sísmica 296

Evaluación anual del desempeño térmico de un muro Trombe con un material de cambio de fase 302

Evaluación numérica de las propiedades de fractura de un material de microestructura compleja 308

Alternativas de climatización para edificios no-residenciales en climas cálidos de México 314

Cinemática de un Robot Paralelo 3-RPS con la Teoría de Tornillo 320



CIENCIAS COMPUTACIONALES

cenidet®
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

ISSN en trámite

Actores causantes del rezago educativo en México con mediación tecnológica, durante la pandemia del COVID-19

M. en C. Juan Carlos Cisneros Rasgado*, Dra. Anabelem Soberanes Martin,
Dr. Samuel Olmos Peña***, Dr. Cesar Fabian Reyes Manzano******

**Tecnológico Nacional de México / TES Ixtapaluca, departamento de ISC, CP 56580 Edo. Mex. (Tel: 5513148150; e-mail: juan.cr@ixtapaluca.tecnm.mx)*
***Universidad Autónoma del Estado de México, CU Valle de Chalco, CP 56615 Edo. Mex. (e-mail: asoberanesm@uaemex.mx)*
**** Universidad Autónoma del Estado de México, CU Valle de Chalco, CP 56615 Edo. Mex. (e-mail: samueluaemex@gmail.com)*
*****Tecnológico Nacional de México / TES Ixtapaluca, departamento de ISC, CP 56580 Edo. Mex. (Tel: 5513148150; e-mail: cesar.rm@ixtapaluca.tecnm.mx)}*

Abstract: The crisis caused by Covid-19 has left millions of students and teachers facing an educational challenge in which they had to roughly adapt to a new way of carrying out education, with the forced inclusion of the use of educational platforms to help the mitigation of the disease, in full confinement and with the experience that it has left, this research analyzes data that allow understanding the educational lag in students and considers teaching weaknesses at the time of teaching remote thematic contents, in order to determine a Rationally, who is really responsible for the educational lag, the student, the teacher, the current technologies or the combination of everything, during the evolution of the research, different roles and approaches were analyzed that allowed us to understand that the problem of educational lag in Mexico is the combination of all the exposed.

Keywords: lag, educational, educational-platforms, covid-19, education, educational-platforms

1. INTRODUCTION

La pandemia generada por el coronavirus en el año 2019 ha dejado al descubierto los problemas y rezagos que presentan los países del mundo, para enfrentar la educación a distancia, ese rezago es evidente para docentes, alumnos e instituciones, ya que ninguna de las tres variables mencionadas estaba preparada para enfrentar efectivamente, la situación sanitaria que atraviesa el mundo. En el caso particular de México en torno a la capacidad que tiene para continuar con las clases a distancia para los niños, niñas y jóvenes de las escuelas a diferentes niveles está definido por, ser un país latinoamericano caracterizado por la desigualdad con un coeficiente de Gini (escala para medir la desigualdad en los ingresos) en 0.48, siendo el 1 que corresponde a una perfecta desigualdad y 0 el punto óptimo de igualdad, por lo que esta nación está dentro del 25% de las naciones con mayor desigualdad, los ingresos de los Mexicanos oscilan entre los 101 pesos y 1853 pesos diarios. Ahora bien, respecto al rezago social como la educación, salud, recursos básicos y vivienda medidos por el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL) determinan que 10 de 32 entidades federativas presentan un rezago social (Archundia, 2020).

Con el análisis anterior podemos observar que en México existen diferentes niveles de rezago social, hay entidades del país con muy bajo rezago social en las que la educación a distancia es fácil, sin embargo, una tercera parte de México presenta un rezago social muy alto en el cual no se cuenta con los medios y/o características para hacer posible la educación con mediación tecnológica (Archundia, 2020).

Referente a pobreza y pobreza extrema. El CONEVAL decreta que una persona se encuentra en situación de pobreza cuando presenta al menos una carencia social y no tiene un ingreso suficiente para satisfacer sus necesidades básicas. Una persona se encuentra en situación de pobreza extrema cuando presenta tres o más carencias sociales, no tiene un ingreso suficiente para adquirir una canasta alimentaria, y es considerado como un nivel muy alto de marginación socioeconómica (CONEVAL, 2016).

En México el 9% de los municipios son considerados de pobreza extrema. A este nivel de pobreza es difícil para el gobierno beneficiarlos con la inclusión de procesos de Tecnologías de Información y Comunicación (TIC), debido a las carencias en sus hogares, además de ser municipios Marginados con prácticamente nula comunicación y usos

ISSN en trámite

tecnológicos, en el caso contrario, los municipios restantes se encuentran en situación de pobreza clasificados de la siguiente forma: pobreza moderada 14%, no pobre y no vulnerable: 27%, estos dos últimos son municipios en los que las TIC están presentes como: radio, televisión, computadoras, y teléfonos inteligentes (CONAPO, 2012).

Con base en al análisis anterior, determinamos que las localidades con un nivel de marginación muy alto y/o en situación de pobreza extrema, no son susceptibles a la inclusión de procesos tecnológicos incluido la educación por supuesto, debido a que no tienen las condiciones necesarias ni la estructura social, política, económica, y mucho menos tecnológica para llevar a cabo una educación a distancia de calidad. Sin embargo, todos los municipios que se encuentran en un nivel de pobreza moderada, no pobre y no vulnerable, son localidades que no deben presentar problemas para la inclusión de las tecnologías en sus quehaceres diarios como la educación con uso de Tecnologías de Información y Comunicación.

En cuanto al equipamiento de tecnologías, la Encuesta Nacional sobre Disponibilidad y Uso de Tecnologías de la Información en los Hogares 2016 (ENDUTIH), determina que 15.7 millones de hogares (47.0% del total nacional) disponen de conexión a Internet. En tanto, los hogares con computadora registraron un aumento de 44.9 a 45.6 % entre 2015 y 2016. La ENDUTIH también mostró que 93.1 % de los hogares en México cuenta con al menos un televisor. El 73.0 % posee al menos un aparato de tipo digital, lo que representa un aumento de 23 puntos porcentuales con respecto a 2015. El 92.7 % de los hogares del país reciben la señal de televisión digital a partir de un televisor digital, a través de la señal de televisión de paga, o mediante un decodificador. En cuanto a conectividad a internet, la ENDUTIH reveló que 15.7 millones de hogares disponen de conexión a Internet (47.0 % del total nacional) ya sea mediante una conexión fija o de una de tipo móvil, lo que significa un incremento de 7.8 puntos porcentuales respecto a la del año anterior (INEGI, 2017).

2. METODOLOGÍA

Como se indicó en la introducción la presente investigación cualitativa, tiene como objeto hacer un análisis reflexivo del rezago educativo como consecuencia del cierre de las escuelas por la pandemia de COVID-19, sustentada en una metodología conceptual y teórica que permitió efectuar la conceptualización a través de un proceso deductivo con base en el análisis determinamos quien es realmente el culpable de ese rezago, ante una situación descontrolada que obligo a cambiar por completo la forma en la que se desarrollan las actividades académicas de millones de alumnos.

2.1. Análisis de la situación

El sector educativo en México con el fin de salvaguardar la saludo de los mexicanos, fue uno de los principales sectores en los que se suspendieron las actividades por lo que el día 16 de marzo del 2020, se suspenden las clases para educación básica (preescolar, primaria y secundaria), así como para los niveles de educación media superior y superior de escuelas privadas y públicas de todo el país por lo que las instituciones educativas se percibieron apresuradas para crear una comisión para participar activamente en la elaboración e implementación de acciones para atender la emergencia que en ese momento se sabía seria de apenas ocho días más el periodo vacacional correspondiente a 15 días para, entre las principales acciones se destaca el hecho de crear medios de comunicación para estar en contacto con la comunidad docente, estudiantil y administrativa de los informes o casos de relevancia, estos medios de comunicación no crearon un reto importante ya que la mayoría de los involucrados maneja diferentes aplicaciones que permiten la comunicación en tiempo real (Ramírez, 2020).

Cada institución opto por el uso de diferentes aplicaciones de comunicación en el caso particular del Tecnológico de Estudios Superiores de Ixtapaluca (TESI) la comunicación se dio por medio de grupos o foros de WhatsApp, siendo este el más popular, ya que es usado por prácticamente cualquier persona con acceso a un equipo de comunicación con conexión a internet como los son los teléfonos inteligentes.

2.2. Responsabilidad del Estado Mexicano ante la educación a distancia

Lloyd (2020) afirma que hay una gran desigualdad entre los estados del sur y del norte, en los estados del norte más del 80% de la población cuenta con acceso a internet y en comparación con los estados del sur solo el 9.8% tiene acceso a internet.

Antes de la pandemia estos números solo eran una pieza más del mosaico de la desigualdad en México, sin embargo dada la situación que se vive originada por el COVID-19 la brecha digital tiene consecuencias negativas y de largo alcance con consecuencias realmente graves para el sistema educativo, de nivel básico a nivel superior determinando quienes pueden acceder y aprender de la educación en linea, en nivel superior el 55% de los alumnos que provienen del primer decil de ingresos no cuentan con internet ni computadora en casa, estos alumnos son aquellos que sin problema se enteran de las actividades que se tiene que realizar, pero simplemente no cuentan con el equipo necesario para realizar las actividades, por esta razón vemos los centros de renta de cómputo llenos de alumnos que hacen sus diferentes actividades en tiempo y forma, a este dato anexamos también la brecha que se da entre los alumnos de instituciones privadas y alumnos de instituciones públicas, ya que en este ultimo los alumnos tienen menor capacidad de acceder a equipos de cómputo que los estudiantes de instituciones privadas, en este tema en México existen iniciativas como la de la Universiada Autónoma Metropolitana

ISSN en trámite

(UAM) que en abril del 2020 anuncio que donaría 3,865 tabletas equipadas con equipo de internet a alumnos en condición vulnerable, los beneficiarios representan el 11% de los 42,000 estudiantes de solo esta universidad, la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) anuncio también un beneficio al colaborar con la compañía teléfonos de México para ofrecer internet con mayor ancho de banda, pero el beneficio es para estudiantes que ya cuentan con el servicio de internet y que el contrato sea con la compañía mencionada (Lloyd, 2020).

Estos y otros programas como jóvenes construyendo el futuro han buscado reducir la brecha digital, sin embargo dichos programas solo llegan a una muy pequeña parte de la población, ahora se sabe que la educación en linea se debe considerar como norma para los próximos meses o años, por esa razón varias universidades del país como el TNM, TESI, UAM, UNAM, UAEM entre otras están optando como una alternativa por crear foros de WhatsApp y Facebook a los que se puede acceder desde los celulares (Lloyd, 2020).

Con base en el análisis de los datos mencionados hasta este punto determinamos que en México hay una desigualdad importante y desafortunadamente no todos los alumnos pueden acceder a contenidos digitales. En ese sentido moderadamente el internet satelital y los teléfonos inteligentes dan la posibilidad a los alumnos en los porcentajes mencionados de estar en foros y/o sesiones en vivo tomando una clase, sin embargo, también sabemos ahora que el 55% de alumnos no tiene equipos de cómputo que permitan hacer las actividades para entregarlas en tiempo y sean consideradas por el docente, pero esta es solo una de las variables involucradas en el rezago educativo.

2.3. El papel docente frente a las clases con mediación tecnológica

En relacion al docente hay una gran área de oportunidad se requiere de un mayor apoyo por la poca o nula capacidad de impartir clases en linea de todos los sistemas educativos. Para la mayoría su primera experiencia con la educación virtual llego con la pandemia de covid-19, y se debe tener una capacidad mayor para calificar a los alumnos que cuentan con alguna desventaja para acceder a las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC). Así mismo se requiere que se tomen en cuenta otras desigualdades que se han agudizado como la escasez de dinero y alimentos, es por esta razón que se da la instrucción de contemplar acreditar a todos los alumnos, para contrarrestar esa desigualdad (Lloyd, 2020).

La educación a distancia con la mediación de las TIC es de las áreas con mayor desarrollo, y da la posibilidad de que todas y cada una de las actividades se desarrollen de forma acertada, según el análisis de Mérida & Acuña (2020) la educación a distancia supera por mucho la educación tradicional, ya que se tienen mayores recursos que dan beneficios importantes para el docente y para el alumno, siempre y cuando existieran las condiciones necesarias para un óptimo funcionamiento entre lo que destaca acceso general para el uso de TIC, conocimiento de los recursos por los docentes y el compromiso real del estudiante.

2.4. La importancia de las plataformas educativas virtuales

Para precisar el alcance de la educación a distancia es necesario saber que las plataformas educativas virtuales son programas informáticos que llevan integrado diversos recursos de hipertexto y que son configurados por el docente, en función a las necesidades de la formación, para establecer un intercambio de información y opinión con el alumno, tanto de manera síncrona como asíncrona; entre las distintas plataformas educativas estandarizadas de uso gratuito disponibles en la red podemos encontrar Classroom, Moodle, Edmodo, Ganesha, Fle3, Dokeos; algunas plataformas virtuales no gratuitas que podemos destacar WebCt, eCollege, teams, FirstClass, Blackboard, etc. (Martínez, López, Escamilla, & Álvarez, 2017).

El párrafo anterior nos permite afirmar sin lugar a duda que la educación es de las principales actividades que se pueden desarrollar a distancia, en algunas ocasiones incluso con mayor hegemonía que de la forma tradicional en un salón de clases, en la actualidad hay diversas plataformas educativas virtuales de diferentes colores y gustos para que el docente pueda elegir entre varias opciones, cada una con características propias. Por lo que resulta prácticamente imposible culpar el software del área educativa como responsable del bajo nivel de entendimiento por el alumno.

Aunado al uso de las plataformas educativas virtuales, existen recursos educativos importantes como los que permiten la Realidad Aumentada (RA) también son usados para complementar y enriquecer la actividad docente con el alumno, imaginemos una clase virtual en la que el hecho de usar una cámara de celular o dispositivo inteligente en uso, enfocando una imagen que se visualiza en pantalla la cual tradicionalmente era plana ahora poder darle vida mediante la RA, es solo un ejemplo de la gran cantidad de software y tecnologías con las que se puede echar mano para hacer una clase más dinámica (Olmos & Cisneros, 2020).

2.5. Experiencias de los alumnos ante la educación a distancia

Según Hernández (2020) la experiencia del alumno con base en el análisis efectuado a alumnos de nivel superior de la Universidad autónoma del Estado de México (UAEM) con un enfoque de análisis Likert, mismo que esta seccionado en 3 importantes áreas, la primera está orientada a los retos enfrentados por los alumnos en su círculo familiar, la segunda sección está orientada a las actividades académicas con los

ISSN en trámite

docentes y la tercera sección analiza la obtención de oportunidades y/o habilidades obtenidas.

Así de lo anterior se logró derivar que las familias de los alumnos, en su mayoría está formada de entre dos y seis miembros, con relacion a los datos laborales se obtiene que los integrantes que laboran, continuaron cumpliendo sus actividades durante este periodo de contingencia, fue posible observar que, en los diferentes segmentos familiares; 51% de personas siguieron asistiendo a su centro de trabajo; 29.6 % de personas más trabajaron desde casa y; 18.6% detuvieron sus actividades por cuestiones de salud o por pertenecer al grupo de personas en alto riesgo, sin embargo estos últimos no siguieron percibiendo sus ingresos (Hernández, 2020).

En relacion a la segunda sección se obtienen datos que indican que cada docente eligió la plataforma con mejor dominio o de la cual encontró más información, sin tomar en cuenta la opinión del alumno. En relacion a esto cabe destacar que los datos de la encuesta corresponden a alumnos de UAEM, por lo que entre las respuestas como plataformas más usadas se tiene SEDUCA plataforma propia de la institución, en segundo lugar, la plataforma Classroom, tercer lugar TEAMS y cuarto lugar Schoology. En el caso del TESI la historia es similar las plataformas más utilizadas por los docentes de esta institución son Schoology en primer lugar, Classroom en segundo y TEAMS en tercer lugar, la institución no se pronunció a homologar una plataforma común para la comunidad educativa por lo que la sensación del alumno ante esta situación para las dos escuelas es similar. La necesidad de aprender a utilizar distintas plataformas educativas, acorde a lo que cada docente utiliza, al indagar sí de esas herramientas los alumnos conocían su manejo previamente a la contingencia, se obtuvo como resultado que 80 por ciento de los estudiantes desconocía cómo funcionaban estas plataformas tecnológicas, y tuvieron que aprender a utilizarlas en el trayecto de la contingencia.

En la sección siguiente se analizó la manera en que los docentes emplearon la forma de continuar con la impartición de clases que permitiera avanzar con el contenido temático de su asignatura, por lo que fue posible observar que 60% o más, emplearon la conexión sincrónica y 20% la conexión asíncrona, 20% utilizaron ambas modalidades, lo que significó un reto para los alumnos en la coordinación de horarios tanto para las clases en tiempo real, como para la revisión de los materiales que se les asignaron en tiempo diferido. Es decir, que el adaptarse a las distintas modalidades que los docentes decidieron, significó una situación adversa para los alumnos. Posteriormente se recopiló la opinión de los alumnos con relación a los materiales que los docentes emplearon para la comprensión del contenido temático de la asignatura, el 41.5% de los estudiantes consideran estar de acuerdo con los materiales de los docentes, el 15%, están totalmente de acuerdo con ellos, y el 36.9% muestran estar algo indiferentes respecto de dichos materiales. Sólo el 4.6% mostró estar parcialmente en desacuerdo y el 1.5% está totalmente desacuerdo (Hernández, 2020).

Algo que no deja de aparecer en la actualidad en las relaciones educativas, es la evaluación, y una parte medular de ella, es el reconocimiento de los avances alcanzados en el aprendizaje por parte de los alumnos, con esta modalidad a distancia, los alumnos consideraron en un 44.6% estar de acuerdo que sí se logró la competencia, y un 12.3% determinan estar parcialmente de acuerdo en alcanzar la competencia. Aunque cabe destacar, que el 36.9% de los estudiantes consideran no haber alcanzado las competencias necesarias, quizá exista la idea de que algunas evaluaciones sí lo consigan y otras no, lo que denotaría inconsistencia por parte de la actividad evaluativa de los catedráticos.

3. RESULTADOS

De acuerdo con el análisis desarrollado durante esta investigación se involucraron tres áreas o variables imprescindibles para su análisis las cuales fueron: A) responsabilidades del Estado Mexicano ante la situación sanitaria que se vive referente al sector educativo, lo que el país debe tener y cumplir en infraestructura para garantizar una educación equitativa para los y las alumnas del país, de lo cual desprende que el 55% de los alumnos totales en México no cuentan con internet y/o computadora en casa, disponen de un celular inteligente que permite comunicarse y estar enterados de las actividades que se deben desarrollar quizá puedan incluso asistir a las sesión en vivo por medio de internet satelital, pero no tienen el equipo para desarrollar las actividades en casa y requieren acudir a diferentes centros de cómputo a desarrollarlas y entregarlas, lo que provoca el descontento del alumno ante el docente, aunque este último no sea el culpable de la situación sino el estado Mexicano. B) el papel que ejerce el docente ante esta situación, aunque para la mayoría de docentes su primer experiencia con las plataformas educativas fua apenas semanas antes del confinamiento, el uso de las mismas no ha presentado un reto significativo, es decir las plataformas educativas que más usan los catedráticos son bastante simples tanto para ellos como para los alumnos, en este sentido sabemos que la tecnología jugó un papel importante en la impartición de clases a distancia ya que las plataformas actuales son eficientes, eficaces y amigables, tanto así, que se supera y por mucho la calidad de una clase a distancia a una presencial por la cantidad de recursos y herramientas tecnológicas que juegan a favor del docente y en beneficio de los alumnos, un docente que sabe, conoce y ejecuta sus responsabilidades, imparte sesiones en vivo, con la ayuda de los recursos tecnológicos, combinada con alguna de las plataformas educativas, siguiendo su plan de clases genera una competencia alta en el estudiante en relacion a sus contenidos temático. C) el alumno y la experiencia recuperada ante las clases a distancia, sin lugar a dudas la investigación nos permite saber que el dominio de las plataformas no es para nada el problema de los alumnos aunque su primer contacto con las

ISSN en trámite

mismas no fue hasta presentarse la contingencia sanitaria para el 98.6 % no representó un reto importante, para el 55 % de los que no disponen de internet o de computadora personal en casa tienen problemas para cumplir con las actividades en tiempo y forma y por ende la cantidad de materias y trabajos de cada una es un detonante para en rendimiento bajo de los alumnos, para el 45% restante que dispone de equipo y/o internet en casa no debiera significar el mismo reto, sin embargo en algunos de estos casos el 18.6% de aquellos en los que familiares desistieron de sus laboras, se vieron en la necesidad de apoyar a la familia económicamente lo que complica entregar trabajos pero también en un alto porcentaje acudir a las sesiones síncronas, motivo por el cual el aprovechamiento académico se ve afectado.

4. DISCUSIÓN

La investigación estudia y analiza diferentes enfoques de lo que realmente provoca el rezago educativo en México lo que nos permite conocer a fondo y afirmar que no hay solo un responsable en dicho rezago, la infraestructura tecnológica en México como en muchos otros países de América latina no son suficientes para garantizar acceso igualitario a la educación remota, entonces durante esta pandemia ahora sabemos que de entrada el 9% de familias en situación de pobreza extrema, bajo ninguna circunstancia tienen acceso a la educación a distancias, del 91% restante el 55% está en pobreza moderada, es decir hay infraestructura como radio, televisión y la opción de internet, pero a este nivel de pobreza moderada, como se analizó anteriormente en esta investigación no todos cuentan con el equipamiento necesario para hacer las actividades que cada docente sube a las diferentes plataformas por lo que el rezago es evidente, ya que dependen de acudir a centros de renta de cómputo, lo cual genera un gasto extra, a este mismo segmento pertenece el 18.3% de las personas que dejaron su actividad laboral por cuestiones de alto riesgo ante el COVID-19, por lo que los alumnos con familias en esta situación se vieron en la necesidad de buscar trabajo para apoyar económicamente el hogar.

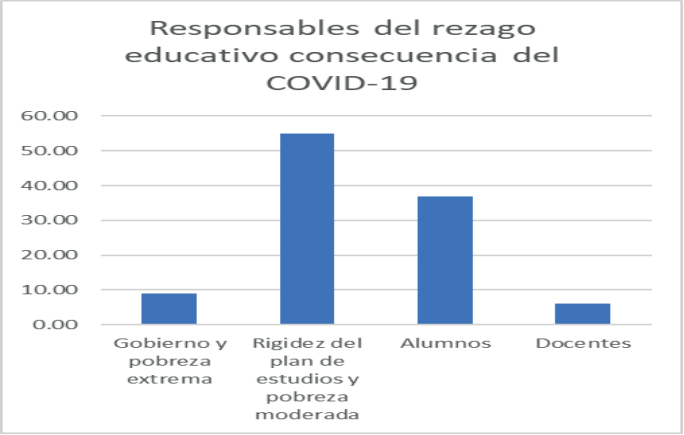
En el segmento de pobreza moderada es en la que el estudiante en su sentir referente a su aprovechamiento académico, hace al docente responsable de no adquirir las competencias y obtener calificaciones negativas, porque son muchas actividades que deben entregar en tiempo y forma, pero de esto último el docente no es el responsable directamente, los planes de estudios en la mayoría de las universidades públicas constan de entre 4 y 6 asignaturas por semestre, lo que provoca que si cada docente deja solo una actividad por semana, en el mejor de los casos el alumno debe hacer de 4 a 6 actividades distintas, además de acudir a la programación de las sesiones síncronas, que aunado a la falta de tiempo y la falta de equipo en casa para desarrollar las actividades, se convierte en rezago educativo con notas negativas y descontento del alumno con el docente y la institución.

Cada institución con sus reglas insta a los docentes a impartir las sesiones síncronas en tiempo y forma, a reportar el porcentaje de temas cubiertos a la semana, con los trabajos y/ o productos que comprueban dichas actividades y que justifiquen las notas o calificaciones. Pensar en un beneficio real hacia el alumno y docente que se asumiría notar cómo están estructurados los planes de estudio de las instituciones que imparten originalmente contenidos en línea y adoptarlo para estar en oportunidad de que el alumno tenga los tiempos para cumplir sus actividades, el docente planee sus sesiones y sus actividades y la institución este enterada del cumplimiento de las metas, aunado a esto cada autoridad educativa debe homologar una plataforma educativa para toda la comunidad.

Por último el 45% de los alumnos que según la investigación pertenecen al nivel de los que no trabajan, cuentan con adecuadas infraestructuras tecnológicas en su comunidad, tienen equipo de cómputo e internet en sus hogares, no debería haber rezago ni mucho menos no adquirir las competencias necesarias de cada asignatura, ya que los recursos tecnológicos disponibles en la actualidad para trabajo en linea generan un enriquecimiento educativo que debe ser muy superior al de las sesiones presenciales con poca o nula estrategia tecnológica, sin embargo es aquí donde entra la responsabilidad real de cada alumno ante las clases en linea, al estar en una sesión en vivo, los alumnos no en su totalidad, activan sus cámaras ya que en muchas ocasione están atendiendo actividades ajenas a la clase del docente, a diferencia de las sesiones presenciales donde se tiene el control de la atención que cada alumno presta a la catedra, en linea simplemente depende de si el alumno quiere aprender o no.

5. CONCLUSIONES

Se desarrolló de forma exitosa una investigación que permite mediante cuatro ejes fundamentales conocer lo que realmente ocasiona el rezago educativo en cuanto a los contenidos temáticos y en relacion a las competencias no alcanzadas por los estudiantes, la gráfica 1 muestra quién o quiénes son los responsables.



Gráfica 1 responsables del rezago educativo tras educacion a distancia, elaboracion propia

ISSN en trámite

En diferentes proporciones, pero cada uno de los involucrados tiene un porcentaje de responsabilidad, con base en el análisis de esta investigación el gobierno de México por el simple hecho de no garantizar acceso a infraestructura tecnológica: 9% pobreza moderada en combinación con la rigidez del plan de estudio que genera una carga alta de trabajo por estudiante: 55%, falta de responsabilidad de los alumnos: 36.9% y por último el compromiso del docente que no conoce efectivamente las plataformas educativas y demás herramientas tecnológicas: 6.1%, por lo que podemos concluir con base en los datos analizados que todos en mayor o menor proporción son responsables de ese rezago, así como el descontento del estudiante y profesorado, pero sin lugar a dudas el principal factor es el 55% de la población que no cuenta con equipo de cómputo y/o internet en casa combinado con la rigidez de los planes de estudio que fueron diseñados para cumplirse exitosamente de forma presencial y no en línea o mixto, esto último es de importancia a tomar en cuenta, ya que con base en el análisis de esta investigación, la educación con mediación tecnológica llego para quedarse, por lo que es necesario replantear la flexibilidad de los planes de estudio.

6. REFERENCIAS

Archundia, E., 2020. DESIGUALDAD Y REZAGO. *El sistema educativo mexicano al desnudo frente a la pandemia del COVID-19*. Entramados, pp. 36-41.

CONAPO, 2012. *Índice de marginación por localidad 2010*, Distrito Federal: s.n.

CONEVAL, 2016. *Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social*, CDMX: s.n.

Hernández, L., 2020. *Retos para los alumnos de Educación Superior durante la pandemia COVID 19*. vinculando.

INEGI, 2017. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Mexico: s.n.

Lloyd, M., 2020. *Desigualdades educativas y la brecha digital en tiempos de COVID-19. Educación y pandemia: una visión académica*, pp. 115-121.

Martínez, E., Lopez, D., Escamilla, D. & Alvarez, L., 2017. *La importancia de las plataformas educativas virtuales como herramienta de apoyo a la educación tradicional. Revista de Tecnología y Educación*, pp. 16-24.

Mérida, Y. & Acuña, L., 2020. Covid-19, *Pobreza y Educación en Chiapas: Análisis a los Programas Educativos Emergentes*. Revista Internacional de Educación para la Justicia Social, pp. 61-82..

Olmos, S. & Cisneros, J., 2020. *La recursividad de los sistemas para abordar el desarrollo de aplicaciones con realidad aumentada. En: Aportaciones al diseño de actividades educativa con realidad aumentada.* Estado de Mexico: PEAC-UAEM, pp. 8-25.

Ramírez, A., 2020. *Reflexión Respecto a la Equidad Educativa en México*, Revista Internacional de Educación para la Justicia Social.

ISSN en trámite

Sistema IoT LoRaWAN para el monitoreo de temperatura con ThingsBoard

J.P. Morales-Alvarez [*] **V. I. Rodríguez-Abdalá** [**]
J. R. Gómez-Rodríguez [**] **G. Trasviña-Pineda** [*]

[*] *Tecnológico Nacional México campus La Paz, Departamento de Metalmecánica, Boulevard Forjadores de Baja California Sur No.4720, C.P. 23080, La Paz, B.C.S. (e-mail: juan.ma@lapaz.tecnm.mx, l18310146@lapaz.tecnm.mx).*
[**] *Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ), Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo en Telecomunicaciones, Av. López Velarde 801, Col. Centro, Zacatecas, Zac., México, 98000. (e-mail: abdala@uaz.edu.mx, jrgrodri@uaz.edu.mx)*

Abstract: In this paper we show the implementation of an IoT LoRaWAN system for remote monitoring with a web panel that contains widgets that facilitate the data interpretation from an Internet of Things node.
The implementation includes a LoPy4 node as a temperature sensor connected to the LoRaWAN network, the configuration of a LoRaWAN Gateway based on Raspberry Pi to send data to The Things Stack server, and the integration with the ThingsBoard platform to visualize sensor measurments by accessing the widget panel via web.
Tests were implemented to evaluate the communication performance of the proposed IoT LoRaWAN system in an urban area, this was a scenario with obstacles, and the results obtained are shown.

Keywords: Gateway, LoRa, LoRaWAN, The Things Stack, ThingsBoard, WSN.

1. INTRODUCCIÓN

Muchas aplicaciones en la industria en general y en el campo requieren de un sistema de comunicación eficiente y seguro para el monitoreo de procesos. Partiendo de esta realidad, en este proyecto se implementó y configuró un sistema basado en Internet de las Cosas (IoT, del inglés Internet of Things) que conecta los nodos de monitoreo instalados en puntos de interés para el envío de los datos capturados a un servidor de red.

LoRaWAN es un protocolo de IoT, donde un Gateway LoRaWAN, dependiendo de su configuración, puede comunicar de cientos a miles de nodos de sensores o actuadores (Lavric and Popa (2018)), y puede tener dentro de una ciudad un alcance de comunicación entre 3 y 5 kilómetros (MultiTech (1995)). LoRaWAN es una tecnología que permite conectar dispositivos de bajo consumo de potencia alimentados por batería durante largos periodos de tiempo sin que estas sean remplazadas (Lavric and Popa (2017b) Lavric and Popa (2017a)). Este protocolo de red ha arrojado resultados favorables en su uso tanto en interiores como exteriores (Haxhibeqiri et al. (2018) Zourmand et al. (2019)). Debe hacerse la aclaración que es una solución para redes donde el monitoreo no se ve afectado por la tasa de transferencia de datos de este protocolo, la cual es idónea para conectar dispositivos autónomos a larga distancia.

El Gateway LoRaWAN que se utilizó fue el concentrador PG1301 de Dragino que permite configurar un Gateway multicanal en una placa Raspberry Pi 3B, 3B+ y 4 (DRAGINO (2010) Raspberry-Pi (2021)). Como nodo se configuró un microcontrolador LoPy4 de Pycom (Pycom (2020b)).

El presente artículo es el avance de un Proyecto que tiene como objetivo: Desarrollar e implementar un Gateway LoRaWAN como punto de acceso a una red de sensores para satisfacer necesidades de control, automatización y comunicación, y mejorar la calidad de vida e impulsar la economía de los usuarios a través de las ventajas del Internet de las Cosas.

Este artículo se organiza de la siguiente manera: en la sección 2 se describe el planteamiento del problema, algunos antecedentes de trabajos relacionados y el modelo de sistema. En la sección 3 se detalla la implementación del Gateway y el nodo sensor, se describen el servidor de

ISSN en trámite

red en The Things Stack (TTS) para integrar los datos y la plataforma ThingBoards para monitoreo remoto. En la sección 4 se describen las pruebas de transmisión realizadas y los resultados obtenidos. Finalmente, en las sección 5 se muestran las conclusiones del presente trabajo.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Análisis del problema

Se plantea el despliegue de sensores de temperatura en un área urbana para la consulta en tiempo real a través de un panel en la plataforma ThingsBoard.

Con el uso de la tecnología celular la conectividad de nodos IoT dispone de un gran ancho de banda que es innecesario y el consumo de potencia es alto, además la cobertura es limitada, por ello se propone el uso de protocolos de largo alcance como las Redes de Área Extensa de Baja Potencia (LPWAN, del inglés Low Power Wide Area Network) para el transporte de datos ya que es una red de bajo consumo de potencia y de largo alcance.

Hoy en día existen distintas opciones dentro de las LPWAN (Haxhibeqiri et al. (2018) Lavric and Popa (2017c) Lavric and Popa (2017b)). Las cuales se enlistan a continuación:

- LoRaWAN.
- Sigfox.
- NB-IoT.
- LTE-M.
- DASH7.

Cabe mencionar que LTE-M y NB-IoT son protocolos que ofrecen las operadoras móviles para IoT en sus bandas bajo licencia.

Al igual que LoRaWAN, Sigfox usa la banda de radio sin licencia para uso industrial, científico y médica (ISM, del inglés Industrial, Scientific, and Medical), con la restricción de envío de paquetes por tiempo y tamaño de paquetes (140 mensajes de 12 bytes por día de subida, 4 mensajes de 8 bytes por día de bajada), además se tiene que pagar un servicio de suscripción para el uso de la red que despliega la misma compañía, a través de ella los nodos pueden comunicarse con los servidores Sigfox, sin embargo, esta red no está desplegada en todas las áreas por lo que su cobertura es limitada, de hecho en la Ciudad de La Paz, B.C.S. no se tiene cobertura, siendo esta una desventaja para no considerarlo en este experimento. Otras características se pueden observar en la Tabla 1 (Khalifeh et al. (2019)).

Por eso se escoge LoRaWAN. Por otro lado, LoRaWAN es un protocolo de largo alcance, bajo consumo de potencia y siendo una red donde el usuario puede desplegar estaciones. El experimento se llevó a cabo en una zona urbana para poner a prueba la cobertura LoRaWAN en un escenario con obstáculos y con ello probar la cobertura del sistema IoT LoRaWAN y la visualización de los datos a través de widgets en un panel de la plataforma ThingsBoard.

Tabla 1. Comparativa de Redes LPWAN.

	LoRaWAN	Sigfox	NB-IoT	LTE-M
Alcance rural	20 km	40 km	10 km	5 km
Alcance urbano	5 km	10 km	1 km	5 km
Tasa de datos	<50 kbps	<100 bps	200 kbps	1Mbps
Frecuencia	ISM	ISM	LTE	LTE
Seguridad	AES 128	AES 128	AES 256	AES 256

2.2 Antecedentes

Con LoRaWAN, la cobertura de red depende del usuario a través de Gateways (GW) que pueden conectar a miles de dispositivos bajo una política de uso justo de 30 segundos de subida de mensajes por cada 24 horas por nodo y de 10 mensajes de bajada por 24 horas por nodo. El tamaño del paquete puede oscilar dependiendo de ciertas condiciones desde 11 hasta 250 bytes. La estructura LoRaWAN se aprecia en la Figura 1.

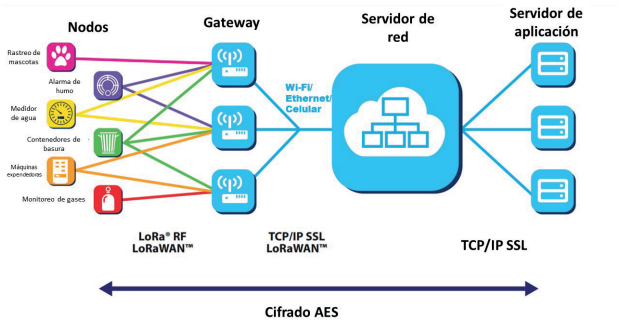


Fig. 1. Arquitectura LoRaWAN. LoRa-Alliance (2021)

Existen diversos tipos de aplicaciones y Gateways desarrollados por la comunidad para ofrecer soluciones IoT, en Zhang et al. (2019) se muestra el diseño de un sistema para el monitoreo de temperatura y humedad del suelo a través de nodos LoRa que envían la información recolectada a un GW LoRa/NB-IoT.Los nodos están basados en el MCU STM32F103ZET6 de la ST Company, con Cortex M3 e incluyen radio LoRa. El diseño del GW se basa en el mismo microcontrolador de los nodos e incluye además el radio NB-IoT. El escenario del experimento fue un complejo urbano y se logró la comunicación entre dispositivos a una distancia de hasta 1.6 km con un consumo de 2 mA en los nodos. Los autores calculan la pérdida de datos en aproximadamente 3% de los paquetes enviados.

Además existen aplicaciones rurales para el seguimiento y monitoreo del ganado como se ve en Pham et al. (2017), donde se describe el diseño de collares de seguimiento basados en nodos LoRa que transmiten a un GW diseñado por los autores, el cual se basa en una placa Raspberry Pi.

ISSN en trámite

Aunque se omiten detalles de los módulos y componentes de hardware, si se mencionan otras especificaciones tales como que el GW también soporta el almacenamiento de datos cubriendo con ello fallas de conectividad a Internet. Se menciona que el GW podría soportar hasta 40 horas de manera autónoma con un diseño adicional vía paneles solares con lo que las baterías pueden recargarse continuamente.

2.3 Protocolo LoRaWAN

La arquitectura LoRaWAN ofrece una topología de red tipo estrella donde se interconectan nodos finales, GWs y servidores de red (ver Fig. 1). Cada nodo se comunica a los servidores a través de los GWs, estos últimos pueden decodificar hasta 10 transmisiones concurrentes de distintos canales y con distintas tasas de transferencia en modulación LoRa. Los GWs envían los datos a los servidores vía IP (ver Fig. 1) (Lavric and Popa (2017b) Lavric and Popa (2017a) Wixted et al. (2016)).

En cuanto a los sensores, LoRaWAN ofrece las siguientes características a los nodos: administración de canal, tasa de transmisión adaptativa (ADR, del inglés Adaptive Data Rate), eficiencia de uso de energía para asegurar el mayor tiempo de vida de las baterías, seguridad tipo AES de 128 bits, en dos capas, una para la red y otra para las aplicaciones, en la seguridad de la red se garantiza la autenticación de los nodos a interconectar, y en la seguridad en las aplicaciones se asegura que el operador de la red no tenga acceso a los datos finales de la aplicación del usuario. LoRaWAN por sus propias características ofrece geolocalización de sus nodos (Haxhibeqiri et al. (2018) Ertürk et al. (2019)).

La tasa de transmisión entre nodos y GWs en LoRaWAN varía según las configuraciones de la red los cuales van desde 0.3 Kbps hasta 50 Kbps, asegurando una buena transferencia de datos para aplicaciones del IoT con usos industriales o de comunicación entre dispositivos (Lavric and Popa (2017c) Lavric and Popa (2017a) LoRa-Alliance (2021)).

La carga útil de cada transmisión puede oscilar entre 11-250 bytes y, como se mencionó, la velocidad de datos puede alcanzar hasta 50 Kbps, estos parámetros dependen de las regiones. Para la banda ISM 902-928 MHz (América) que es la que se utiliza en este trabajo, la carga útil se encuentra entre los 11-222 bytes y las velocidades de transmisión varían entre 980 bps a 21.9 kbps de acuerdo al factor de esparcimiento (SF, del inglés Spreading Factor) y del ancho de banda del canal (BW, del inglés Bandwidth) (The-Things-Industries (2021b) LoRa-Alliance (2020)). La modulación en LoRa se basa en la técnica espectro disperso (SS, del inglés Spread Spectrum) y utiliza una variación conocida como espectro disperso por chirp (CSS, del inglés Chirp Spread Spectrum) para la cual se tienen seis SF (del 7 al 12) que establecen el número de bits a utilizar para codificar un símbolo. Los BW disponibles son: 125 kHz, 250 kHz y 500 kHz. Estas características mencionadas favorecen una alta resistencia a las interferencias y al desvanecimiento multitrayectoria.

En la Figura 2 se describe la pila del protocolo LoRaWAN donde se puede observar las capas de seguridad en la red y en las aplicaciones. Se muestra la modulación LoRa como capa física de comunicación entre nodos y GWs. También se muestra la comunicación de interfaz serial (SPI, del inglés Serial Peripheral Interface) con la capa de abstracción de hardware (HAL, del inglés Hardware Abstraction Layer). El diagrama muestra la conexión IP entre el GW y los servidores de red, estos pueden utilizar distintos estándares por ejemplo: Ethernet, 3G, 4G, Wi-Fi, satélites.

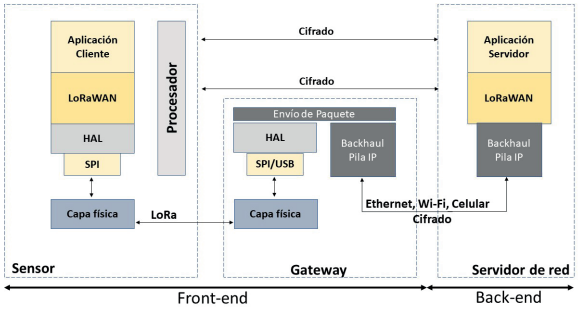


Fig. 2. El protocolo de comunicación LoRaWAN. LoRa-Alliance (2021)

Los nodos en LoRaWAN pueden ser sensores o actuadores, y por ende tener diferentes requerimientos de uso de red y con ello configuraciones personalizadas de transmisión o recepción de datos, por lo que pueden encontrarse en una de tres clases, las cuales son estrategias de comunicación bidireccionales con servicios particulares, estas son:

- Clase A, se basa en el protocolo ALOHA y es la configuración de mayor ahorro de energía.
- Clase B, para nodos que además de sensores utilizan actuadores, esta clase permite abrir ventanas de recepción a intervalos de tiempo previamente programados, esto incrementará también el consumo de energía sin embargo sigue siendo una opción viable para nodos alimentados por batería.
- Clase C, si el ahorro de energía del nodo no es prioridad, esta estrategia puede estar recibiendo datos en la red continuamente.

El protocolo LoRaWAN utiliza la ADR para asegurar que los nodos se reconfiguren dinámicamente de acuerdo a las condiciones de la red, ampliando la duración de carga de las fuentes de alimentación basadas en baterías. El servidor de red es el encargado de realizar esta configuración que optimiza la transmisión de mensajes en la red, sin embargo solo la realiza a petición de los nodos, son estos quienes activan el bit ADR en las transmisiones.

ISSN en trámite

El nodo debe ser capaz de identificar si se encuentra en movilidad y si las condiciones del canal son lo suficientemente estables para entonces hacer la petición de ADR al servidor de red. A solicitud de los nodos de usar ADR, el servidor realiza mediciones en la red acerca de: el contador de tramas, la relación señal a ruido (SNR, del inglés Signal-to-Noise Ratio), y el número de GWs que han recibido transmisiones del nodo (Haxhibeqiri et al. (2018) Ertürk et al. (2019) The-Things-Industries (2021a)). Cuando un nodo este suficientemente cerca de un GW y cuenta con un buen enlace de red, deberá apagar la ADR, así como usar una tasa de transferencia más alta, y así no utilizar el espectro más tiempo del necesario, dando espacio para que otros nodos también puedan transmitir (Ertürk et al. (2019)).

2.4 Modelo de sistema

El presente sistema IoT permite al usuario final que desde cualquier sitio pueda acceder a consultar el panel donde se visualiza la información de los sensores en tiempo real, para ello puede utilizar un teléfono móvil, tableta o computadora para acceder a la plataforma Thingsboard para visualizar los datos que envían los sensores; en esta conexión entre usuario y Thingsboard el protocolo de la aplicación es HTTPS. Thingsboard accede constantenmente a los datos del servidor de The Things Stack (TTS) mediante el protocolo MQTT. The Things Stack es quien recibe la información enviada por el Gateway a través de TCP/IP SSL, y este último los recibe de los nodos de sensores mediante LoRaWAN. Se puede observar el diagrama general del proyecto en la Figura 3.

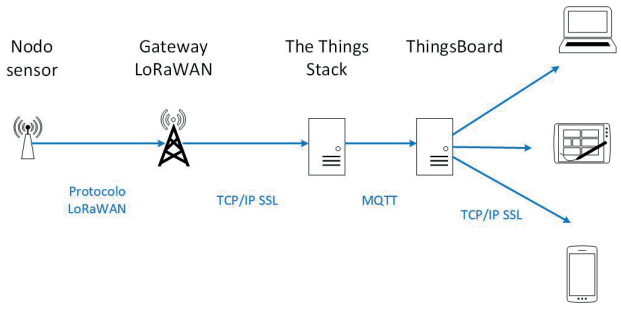


Fig. 3. Diagrama general del proyecto.

El Gateway utilizado es de configuración sencilla para el despliegue de una red de bajo costo para el monitoreo con dispositivos IoT.

The Things Stack es una red IoT LoRaWAN global y abierta, la cual se ha formado y sigue desplegándose con los Gateways que los usuarios van configurando en ella. TTS proporciona servidores de aplicación para gestionar Gateways y aplicaciones donde se asocian los nodos (The-Things-Industries (2021c)).

ThingsBoard Cloud permite acceder a los nodos finales para obtener el historial de sus capturas o dar seguimiento en tiempo real a los datos con interfaces gráficas y amigables, también es posible configurar alarmas y recibir alertas vía correo electrónico o mensajería de texto por Telegram (The-ThingsBoard-Authors (2021)).

3. DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN

El desarrollo e implementación del sistema incluye un nodo sensor basado en el LoPy4 de Pycom, un Gateway LoRaWAN implementado con RaspBerry Pi y la tarjeta PG1301 de Dragino, TTS como servidor de red y Things-Board como servidor de aplicación para el monitoreo remoto, el diagrama del modelo de sistema se muestra en la Figura 4.

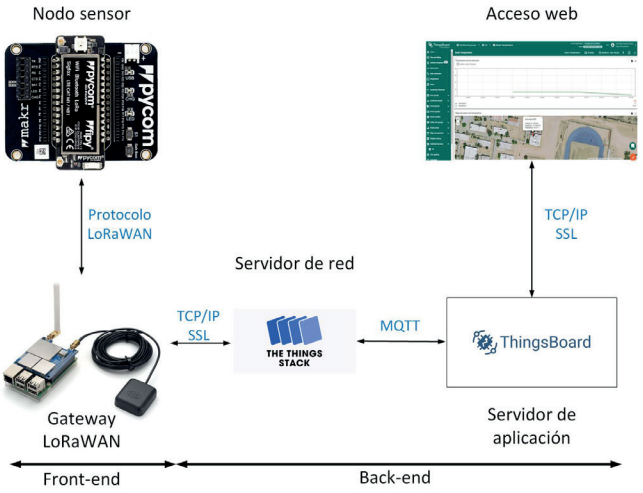


Fig. 4. Diagrama del modelo de sistema.

3.1 Front-end: Nodo sensor

Para la implementación del nodo sensor se utilizó un microcontrolador LoPy4 de Pycom, la cual ofrece conectividad LoRa/LoRaWAN, WiFi, Bluetooth y Sigfox. Como procesador cuenta con un Espressif ESP32, de RAM tiene 4 MB y de almacenamiento 8 MB. Ofrece 24 puertos. El lenguaje de programación que utiliza es MicroPython (Pycom (2020b)).

Para las características de conectividad LoRaWAN el LoPy4 utiliza la banda 915 MHz con una potencia máxima de +20 dBm y es configurable como nodo clase A y clase C.

El nodo para este proyecto se configuró como clase C para conectarse a la red LoRaWAN mediante activación inalámbrica (OTAA, del inglés Over The Air Activation) y así enviar la lectura de temperatura (Pycom (2020a)) en la banda ISM 915 MHz, en el canal 903.9 MHz, con un BW de 125 KHz y un SF de 10, que es uno de los nueve canales de subida del plan de frecuencias de TTS.

3.2 Front-end: Gateway LoRaWAN

La placa Raspberry Pi es una microcomputadora, el modelo Raspberry Pi 3 B+ cuenta con un procesador Broad-

ISSN en trámite

com BCM2837B0, Cortex-A53 (ARMv8) 64-bit SoC con una frecuencia 1.4 GHz, 1 GB de RAM, con conectividad WiFi en la bandas 2.4 GHz y en la 5 GHz, con Bluetooth, puertos USB, HDMI, conector de alimentación 5V/2.5A CD, soporta alimentación mediante Ethernet(POE, del inglés Power-over-EThernet) y tiene puerto para MicroSD, que es donde se instala el Sistema Operativo y el software que se desee ejecutar (Raspberry-Pi (2021)).

El PG1301 de Dragino es un transmisor/receptor multicanal que permite escuchar hasta 5000 nodos por km^2 ofreciendo hasta -142.5 dBm de sensibilidad de recepción (DRAGINO (2010)). Se utilizó el PG1301-915 para la banda 902-928 MHz debido al plan de frecuencias de TTS (The-Things-Industries (2021b)). El GW permite recibir simultáneamente paquetes LoRaWAN al configurar de manera automática y aleatoria distintos canales y SF permitidos en el plan de frecuencias.

3.3 Back-end: The Things Network

Una vez configurado el Gateway, este se registra en The Things Stack que es donde están los servidores de la red LoRaWAN de TTN (The-Things-Industries (2021c)). Adicionalmente se creó una aplicación para registrar el nodo de nombre nodo-otaa-2-0509 que envía los datos de temperatura capturados.

3.4 Back-end: ThingsBoard Cloud

ThingsBoard Cloud se conecta a TTS a través del protocolo MQTT para obtener el seguimiento de los datos del nodo sensor de temperatura que recibe TTS. ThingsBoard Cloud muestra los datos del dispositivo sensor reconociendo el nodo resgistrado en TTS (nodo-otaa-2-0509). Se instalaron dos paneles en ThingsBoard Cloud, uno para el seguimiento histórico de los valores de temperatura leído, mediante una gráfica, y otro para el monitoreo en tiempo real del sensor mediante un mapa de Google se muestran en la Fig. 5.

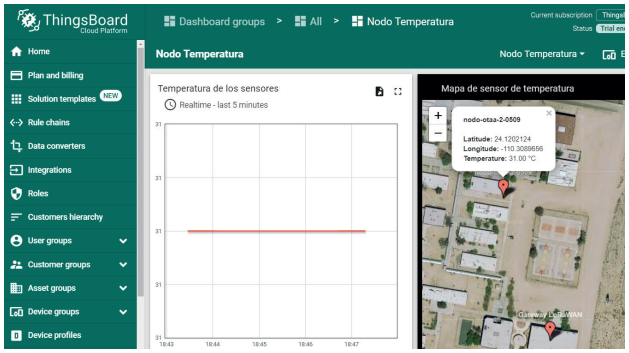


Fig. 5. Representación de los datos en paneles de ThingsBoard Cloud.

4. PRUEBAS Y RESULTADOS

El escenario del experimento consistió en la transmisión de datos a diferentes distancias y con diferentes obstáculos. El Gateway se colocó de forma fija a una altura de 5.2 m dentro de un edificio (ver Fig. 6). El nodo se colocó en 4 lugares diferentes a una altura de 1.5 m del suelo para la transmisión de la temperatura a través de TTS y así monitorear los parámetros indicador de fuerza de la señal recibida (RSSI, del inglés Received Signal Strength Indicator) y la SNR.

Los datos recopilados se muestran en la Tabla 2 donde se observa que a mayor distancia se va atenuando la señal dado que la RSSI disminuye cuando la distancia aumenta, como el Gateway tiene -142.5 dBm de sensibilidad aún se pueden obtener distancias mayores con el nodo. Los valores de SNR disminuyen con la distancia con ello se observa la resistencia a las interferencias de LoRaWAN y su capacidad de reconstruir el mensaje enviado por el nodo.



Fig. 6. Ubicación del Gateway y pruebas del nodo.

Tabla 2. Mediciones de la señal transmitida.

Posición	Distancia (m)	SNR (dBm)	RSSI (dBm)
1	79	8.2	-81
2	124	7.5	-82
3	266	-7.5	-100
4	603	-9.8	-105

Las mediciones 1 y 2 fueron las únicas con línea de vista con el Gateway, la medición 3 fue con edificios del campus como obstáculos y la medición 4 fue colocando el nodo fuera del campus.

5. CONCLUSIONES

Con el sistema IoT realizado se comprobó que LoRaWAN es una alternativa para el envío de datos a largas distancias, y que es factible para el desarrollo de una red LoRaWAN de fácil configuración y escalabilidad.

Dado los resultados de las pruebas se infiere la posibilidad de alejar más los sensores del Gateway y mantener la

ISSN en trámite

conexión con los servidores de red TTN con lo que el usuario seguirá teniendo acceso a los datos a través de la integración de ThingBoards. El alcance de la comunicación puede aumentarse siempre que sea factible mejorar la altura del Gateway.

Como trabajo futuro se desea:

- Configurar alarmas para que ThingBoards envíe alertas al usuario con la información de nodos cuyas lecturas excedan un umbral de temperatura preestablecido.
- Enviar al nodo por parte del usuario indicaciones para controlar el encendido/apagado de algún sistema como respuesta a las alertas recibidas.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a la Dirección del Tecnológico Nacional de México campus La Paz por los apoyos recibidos para desarrollar este trabajo que forma parte del Proyecto: Diseño de un Gateway Lora/Lorawan como Punto de Acceso a una Red de Largo Alcance para el Control y Automatización registrado en el Tecnológico Nacional de México con clave 10822.21-P.

REFERENCES

DRAGINO (2010). 10 channels - lorawan gps concentrator for raspberry pi. URL https://www.dragino.com/products/lora/item/149-lora-gps-hat.html.

Ertürk, M.A., Aydın, M.A., Büyükakkaşlar, M.T., and Evirgen, H. (2019). A survey on lorawan architecture, protocol and technologies. *Future Internet*, 11(10). doi:10.3390/fi11100216. URL https://www.mdpi.com/1999-5903/11/10/216.

Haxhibeqiri, J., De Poorter, E., Moerman, I., and Hoebeke, J. (2018). A survey of lorawan for iot: From technology to application. *Sensors*, 18(11). doi:10.3390/s18113995. URL https://www.mdpi.com/1424-8220/18/11/3995.

Khalifeh, A., Aldahdouh, K.A., Darabkh, K.A., and Al-Sit, W. (2019). A survey of 5g emerging wireless technologies featuring lorawan, sigfox, nb-iot and lte-m. In *2019 International Conference on Wireless Communications Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, 561–566. doi:10.1109/WiSPNET45539.2019.9032817.

Lavric, A. and Popa, V. (2017a). Internet of things and lora™ low-power wide-area networks: A survey. In *2017 International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS)*, 1–5. doi:10.1109/ISSCS.2017.8034915.

Lavric, A. and Popa, V. (2017b). A lorawan: Long range wide area networks study. In *2017 International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN)*, 417–420. doi:10.1109/SIELMEN.2017.8123360.

Lavric, A. and Popa, V. (2017c). Lora™ wide-area networks from an internet of things perspective. In *2017 9th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, 1–4. doi:10.1109/ECAI.2017.8166397.

Lavric, A. and Popa, V. (2018). Performance evaluation of lorawan communication scalability in large-scale wireless sensor networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2018. doi:10.1155/2018/6730719. URL https://doi.org/10.1155/2018/6730719.

LoRa-Alliance (2020). Lorawan regional parameters. URL https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/rp_2-1.0.1.pdf.

LoRa-Alliance (2021). What is lorawan. URL https://lora-alliance.org/about-lorawan/.

MultiTech (1995). Multitech conduit. URL https://www.multitech.com/brands/multiconnect-conduit.

Pham, C., Ferrero, F., Diop, M., Lizzi, L., Dieng, O., and Thiaré, O. (2017). Low-cost antenna technology for lpwan iot in rural applications. In *2017 7th IEEE International Workshop on Advances in Sensors and Interfaces (IWASI)*, 121–126. doi:10.1109/IWASI.2017.7974231.

Pycom (2020a). Lopy lorawan nano-gateway using micropython and ttn. URL https://pycom.io/lopy-lorawan-nano-gateway-using-micropython-and-ttn/.

Pycom (2020b). Lopy4. URL https://pycom.io/product/lopy4/.

Raspberry-Pi (2021). Raspberry pi. URL https://www.raspberrypi.org/products/.

The-Things-Industries (2021a). Adaptive data rate. URL https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/adaptive-data-rate/.

The-Things-Industries (2021b). Frequency plans. URL https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/frequency-plans/.

The-Things-Industries (2021c). The things stack. URL https://www.thethingsindustries.com/docs/getting-started/.

The-ThingsBoard-Authors (2021). Thingsboard cloud. URL https://thingsboard.io/company/.

Wixted, A.J., Kinnaird, P., Larijani, H., Tait, A., Ahmadinia, A., and Strachan, N. (2016). Evaluation of lora and lorawan for wireless sensor networks. In *2016 IEEE SENSORS*, 1–3. doi:10.1109/ICSENS.2016.7808712.

Zhang, X., Zhang, M., Meng, F., Qiao, Y., Xu, S., and Hour, S. (2019). A low-power wide-area network information monitoring system by combining nb-iot and lora. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(1), 590–598. doi:10.1109/JIOT.2018.2847702.

Zourmand, A., Kun Hing, A.L., Wai Hung, C., and Abdul Rehman, M. (2019). Internet of things (iot) using lora technology. In *2019 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS)*, 324–330. doi:10.1109/I2CACIS.2019.8825008.

ISSN en trámite

Aplicación Web basada en software libre para el análisis de resultados en la curva de crecimiento de hongos patógenos Colletrotichum lindemuthian y fusarium solani

Acevedo-Sandoval, S*. Bañuelos-Cabrera S. G.*

**Instituto Tecnológico Superior de Jerez; Tecnológico Nacional de México; 99363*
Jerez de García Salinas, Zacatecas (e-mail: salvador.as@jerez.tecnm.mx)
**Instituto Tecnológico Superior de Jerez; Tecnológico Nacional de México; 99363*
Jerez de García Salinas, Zacatecas (e-mail: sacylcabrera@tecjerez.edu.mx)

Resumen: En el presente documento se muestra el diseño y desarrollo de una aplicación WEB con el uso de tecnologías basadas en software libre, que permite analizar de una forma mas eficiente los resultados obtenidos a partir de un estudio realizado sobre la curva de crecimiento de hongos patógenos, los cuales son elaborados a través del aparato denominado Multiskan GO.

Multiskan GO es un espectrofotómetro UV / VIS basado en monocromador de alta calidad. Se utiliza en escaneo espectral, punto final y mediciones cinéticas para medir la absorbancia en un rango de longitud de onda de 200–1000 nm de placas apropiadas de 96 o 384 pocillos con y sin tapa y varios tipos de cubetas. El instrumento permite la incubación de hasta 45 ° C y la agitación de la microplaca.

La aplicación WEB se desarrolló desde un ambiente local y posteriormente se instaló en servidores de alojamiento gratuito (hosting) en internet, para facilitar el acceso y uso de dicha plataforma desde cualquier ordenador que cuente con acceso a internet.

El desarrollo de esta plataforma surge de la necesidad del personal profesional de investigación en laboratorios y que utilizan el espectrofotómetro Multiskan GO; para tener una aplicación de bajo costo y fácil acceso que permita realizar los análisis de datos arrojados por dicho aparato, sin tener que adquirir el software que la compañía vende por separado de la máquina y suele ser de un costo elevado.

Aquí se muestra el resultado del desarrollo de la aplicación web y las ventajas que tiene su implementación y uso para el personal profesional de investigación en laboratorios. A través del uso de esta plataforma web, se logró reducir los costos de adquisición del software propietario que sugiere la empresa fabricante, en casi en su totalidad; además, se disminuyó en gran medida el tiempo de análisis de datos, que, en caso de no adquirir el software especializado para la maquina, se tenía que hacer a través de sus propios medios (computadora y software) y el tiempo invertido era demasiado.

De esta manera, la plataforma, siendo casi gratuita, podría estar al servicio de laboratorios especializados que necesiten analizar información contenida en archivos entregados como resultado del análisis del aparato Multiskan GO, para evitar gastar en adquisición de software privativo, además de ahorrar tiempo que puede ser invertido en otros procesos de la investigación.

Para evaluar la funcionalidad de la aplicación y la mejora que aporta a la eficiencia del análisis de datos, se tomaron los tiempos de análisis que tardaban los técnicos laboratoristas para obtener los datos de forma electrónica (hojas de cálculo), posteriormente abrir cada uno de ellos, seleccionar la información a analizar, aplicar el análisis estadístico necesario, obtener los resultados y por último graficarlos para poder tomar decisiones con respecto a la investigación realizada.

Palabras Clave: aplicación web, análisis de datos, curva de crecimiento bacteriano, desarrollo de software, Multiskan GO.

1. INTRODUCCIÓN

El análisis de /información es un proceso que consiste en recopilar, examinar, limpiar y transformar un conjunto de datos con la finalidad de obtener conclusiones que sean de utilidad para la toma de decisiones. En la actualidad, dicho proceso de análisis de información para la toma de decisiones abarca una gran cantidad de ciencias, áreas de conocimiento y la industria.

En el sector agrícola, los agricultores y las empresas agrícolas tienen que tomar innumerables decisiones todos los días y las complejidades intrincadas involucran los diversos factores que los influyen. Las condiciones ambientales, la variabilidad del suelo, los niveles de insumos, las combinaciones y los precios de los productos básicos han hecho que sea aún más relevante para los agricultores utilizar la información y obtener ayuda para tomar decisiones agrícolas críticas (Majumdar, J., 2017).

ISSN en trámite

1.1 Análisis de la curva de crecimiento bacteriano

Dentro de la agricultura a nivel mundial y nacional se presentan problemas de pérdidas de parcelas completas que son relacionados con hongos, estos son organismos que cuentan con

un núcleo definido y tienen características similares a las plantas y animales (Cuevas Moreno, 2016). En el suelo se encuentran bacterias, actinomicetos y pequeños invertebrados, estos interactúan con hongos formando una compleja comunidad microbiana (Pfenning & Abreu, 2012).

Cuando se realiza un estudio sobre la identificación de algún hongo del suelo se tiene que contar con características específicas, especialistas en taxonomía y micología, así como metodologías muy precisas, sin embargo, esta identificación puede ser tardada y con limitaciones de recursos (Hyde, 1997).

Los procedimientos y métodos que se utilizan para el estudio microbiológicos e identificación de hongos se basan en cultivos que implican el aislamiento de propágulos microbianos o hifas activadas que crecen en el suelo, y posteriormente su crecimiento en un medio de cultivo axénico para su posterior identificación y cuantificación (Pfenning & Abreu, 2012).

La evaluación de hongos se realiza a través de estudios morfológicos, cultivos en medios cromogénicos, métodos comerciales basados en la asimilación de hidratos de carbono o métodos automatizado (Relloso et al., 2015); algunos métodos de estudio emplean técnicas de dilución en medio líquido y se basan en el cálculo de la concentración mínima inhibitoria (CMI) mediante la determinación de porcentajes de inhibición, en relación con un control de crecimiento (Jerez Puebla et al., 2011)

Este control de crecimiento se puede medir en aumento de masa celular o en el número de células, ellas se pueden realizar de manera simultánea. Cuando el hongo crece en condiciones adecuadas con los nutrientes esenciales, su peso seco se puede graficar contra el tiempo y obtener una curva de crecimiento, la cual es de vital importancia para tener conocimiento de cómo se expande la población celular y así con este conocimiento se realizan diseños de métodos de control para el crecimiento microbiano (Estrada Salazar & Ramírez Galeano, 2019).

1.2 Análisis de datos para la toma de decisiones

Los seres humanos basamos nuestras acciones en la toma de decisiones diariamente, desde la elección de la vestimenta que usaremos, pasando por los alimentos que elegiremos, hasta aquel programa de televisión que tanto nos gusta por las noches. Estas elecciones están basadas en el análisis de información que hacemos día a día para optar una de las opciones para las cuales hicimos dicho análisis. La información que analizamos, son los datos que componen las características de esas opciones y la ventaja que presentan dichas características y que nos ayudan a tomar la decisión de elegirlas.

La toma de decisiones basada en el análisis de datos no solo es de ámbito personal, sino también en lo social y mayormente laboral. De acuerdo con (Merendino, et al., 2018) el análisis de datos tiene el potencial de cambiar “disruptivamente" la alta dirección de las organizaciones, lo que incita a los directores a tomar decisiones más rápidamente y a moldear sus capacidades para abordar los cambios ambientales.

Dicho esto, la importancia del análisis de datos para la toma de decisiones como lo plantea (García-Vellido, 2020), permite mostrar datos históricos y del presente. También puede ofrecer pruebas para comparar el rendimiento de modo que las empresas o instituciones puedan así operar de forma más ágil y eficiente. Otra característica es que ayuda a la identificación de tendencias. Si se usa de manera eficiente se puede mejorar casi todos los aspectos de operación en una empresa/institución.

1.3 Aplicaciones para análisis de datos

Tomando en cuenta lo anterior y como lo indican (Guanming et al., 2014) extraer resultados significativos de conjuntos de datos experimentales masivos es una tarea desafiante para el personal de laboratorio. Además, según (Hampton et al., 2013) los avances en tecnología de investigación han aumentado rápidamente la cantidad, la diversidad, y complejidad de los datos disponibles para los investigadores.

Asimismo, las herramientas para recopilar, analizar y compartir datos nunca han estado más disponible debido a un progreso similar en la tecnología computacional que ha impulsado la era del "big data" (Marx, 2013; Baker, 2017). Con estas capacidades de recopilación y análisis de datos sin precedentes, se reconoce ampliamente que las habilidades de datos tienen un papel importante en el futuro lugar de trabajo y familiaridad con los datos la ciencia será una necesidad (NAS, 2018).

Junto con la recopilación y análisis de datos, también se hace necesaria una forma de representación visual que permita mostrar los resultados de una forma visual simple y mas fácil de ser interpretada. (Embarak, 2018).

Es debido a todo esto que el uso de herramientas computacionales que realicen dicha actividad de una manera mas eficiente se hace evidentemente necesaria.

En ese sentido, existen diversos tipos de aplicaciones que pueden ser utilizadas para el análisis de datos, como son: los sistemas embebidos, los sistemas de escritorio, las aplicaciones móviles y las aplicaciones web.

Estas últimas, tienen las siguientes principales ventajas sobre las demás:

- Son multiplataforma.
- Portabilidad.

ISSN en trámite

- Fácil acceso (intranet o internet).
- Sin necesidad de instalación.
- Alta disponibilidad.

Multiskan GO, cuenta con un software que se incluye en la compra del aparato. Sin embargo, si se desea adquirir por separado, tiene un costo muy elevado que van desde los 30 mil hasta los 90 mil pesos mexicanos.[1] Ahora bien, en caso de no desear o no poder adquirir dicho software privativo, el proceso que los técnicos de laboratorio realizan para obtener resultados del análisis de datos para la curva de crecimiento bacteriano, es largo y toma demasiado tiempo. Este proceso consta de los siguientes pasos:

1. Realizar las pruebas dentro del aparato.
2. Obtener las hojas de cálculo que arroja el aparto a partir de las pruebas.
3. Abrir las hojas de cálculo para y seleccionar y separar la información necesaria (esta es la parte que toma mas tiempo).
4. Aplicar el análisis estadístico a los datos obtenidos en el paso anterior.
5. Graficar los resultados de análisis estadístico.

Por lo tanto, surge la necesidad de optimizar estos tiempos de estudio a través de alguna herramienta que lo haga de forma automatizada.

Es por todo esto que se realizó una aplicación a bajo costo, de fácil acceso y que permite realizar un análisis de datos de una manera mas eficiente, en comparación con la elaboración de forma manual y sin necesidad de adquirir el software privativo.

2. METODOLOGÍA

Existen diversas metodologías que permiten el desarrollo de software, estas son agrupadas de manera general en las tradicionales y las agiles. Hay muchos métodos y enfoques tradicionales de desarrollo de software, como el enfoque en cascada, el enfoque iterativo e incremental, el enfoque en espiral, el enfoque evolutivo, etc. (Mall, 2018).

El desarrollo ágil de software es un enfoque liviano que se propuso para superar las limitaciones de los métodos de desarrollo convolucional y reducir la sobrecarga y el costo al tiempo que brinda flexibilidad para adoptar los cambios en los requisitos en cualquier etapa, esto se hace administrando las tareas y su coordinación a través de un cierto conjunto de valores y principios. (Alsaqqa, Sawalha & Abdel-Nabi, 2020).

Cualquiera de las opciones anteriores puede emplearse en el desarrollo de aplicaciones con sus ventajas y desventajas. Ahora bien, si hablamos del desarrollo de aplicaciones WEB, existen, además, modelos de arquitectura que permiten diseñar una mejor solución. Uno de estos modelos, es el C4 el cual les permite a los desarrolladores comenzar con el diseño de sus sistemas sin entrar en mayores detalles técnicos (Vázquez-Ingelmo, A.; García-Holgado, A. & García-Peñalvo, F. J., 2020). Además, se pueden utilizar representaciones visuales para la arquitectura, como lo es *UWE (UML-based Web Engineering)* que es un método de ingeniería de software para el desarrollo de aplicaciones web basado en UML y tomando en cuenta lo que comentan (Nieves Guerrero, Citlali & Ucán Pech, Juan & Menéndez Domínguez, Víctor. (2014) indicando que facilita la transición desde un modelo de arquitectura de software hacia la codificación de esta.

Toda vez que se analizaron las metodologías y modelos de desarrollo de software para aplicaciones WEB, se optó por una metodología de desarrollo ÁGIL denominada ***Kanban***, debido a lo que indica (González F.; Calero S. & Loaiza D, 2019), esta metodología es más flexible y ayuda a obtener más información al momento de diseñar y desarrollar un programa; y se utilizaron diagramas basados en los modelos C4 y UWE, descritos anteriormente.

2.1 Tecnologías seleccionadas para el desarrollo

Para el desarrollo del *frontend* se utilizaron tecnologías comunes para aplicaciones web, como lo son: ***HTML5, CSS3 y JavaScript***.

Con respecto al *backend* se utilizó el leguaje de programación ***Python*** junto con el ***framework*** web llamado ***Django***.

Para la implementación de la aplicación en línea se utilizó ***Heroku***, que es una plataforma como servicio (*PaaS – Plataform as a Service*) que permite a los desarrolladores crear, ejecutar y operar aplicaciones completamente en la nube.

2.2 Proceso para el desarrollo de la aplicación

Análisis y Diseño: Dentro de esta fase, se realizó una entrevista para la documentación de requerimientos indicados por el personal que utilizará la aplicación en proyectos relacionados con el análisis de datos, específicamente de los resultados en la curva de crecimiento de hongos patógenos (*Colletrotichum lindemuthian y fusarium solani*). Siendo sus requerimientos, en una forma generalizada, los siguientes:

1. Plataforma de fácil acceso y desde cualquier lugar.
2. Cargar archivos con formato de hoja de calculo (por ejemplo, Excel).
3. Realizar un análisis estadístico a dichos datos.
4. Mostrar y graficar los resultados.

[1] Consultado en noviembre de 2021.
Fuente: https://bit.ly/3knoy5U

ISSN en trámite

Una vez analizados dichos requerimientos, se realizó un diseño de software el cual incluye productos de software documentados, como los son: diagramas de contexto, diagramas de componentes, diagramas de contenedores y diagramas de despliegue.

Desarrollo/codificación: Posterior al análisis y diseño de la aplicación, se paso al desarrollo de esta. A continuación, se presentan capturas de pantalla de la aplicación y un resumen de su funcionalidad.

El código fuente del software puede descargarse desde este enlace: https://bit.ly/30a4BIT

2.2.1 Módulos desarrollados

Autenticación. Pantalla de inicio o acceso que es controlada a través de autenticación de usuarios registrados. Ver figura 1.

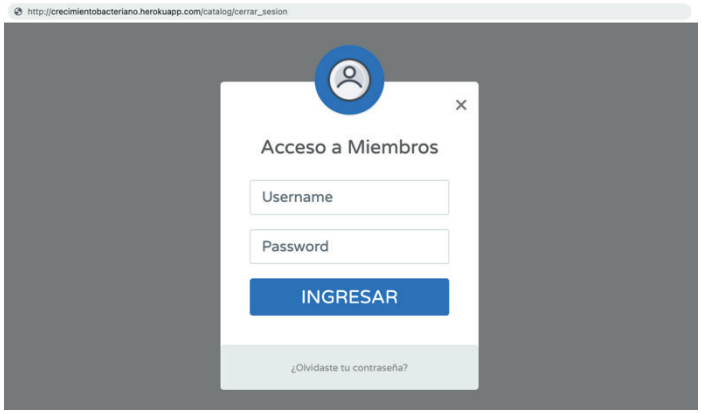


Figura 1. Pantalla inicial (acceso o login). Fuente: Elaboración propia.

Toda vez que se ha ingresado como usuario autenticado, se puede observar un menú principal para analizar los datos relacionados al crecimiento bacteriano. Al seleccionar una de las opciones anteriores, se muestra una pantalla para cargar los archivos a analizar. Ver figura 2 y figura 3.

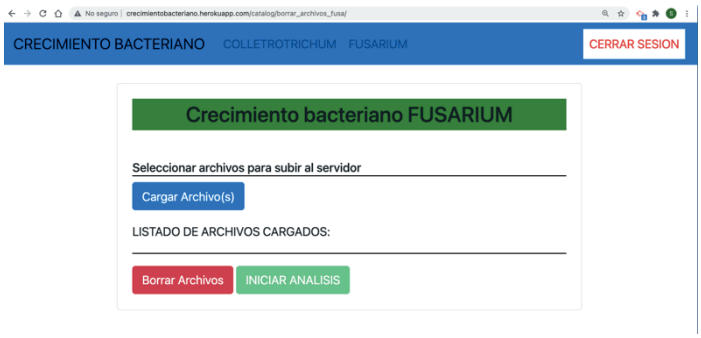


Figura 1. Menú principal y de análisis Colletrotrichum. Fuente: Elaboración propia.

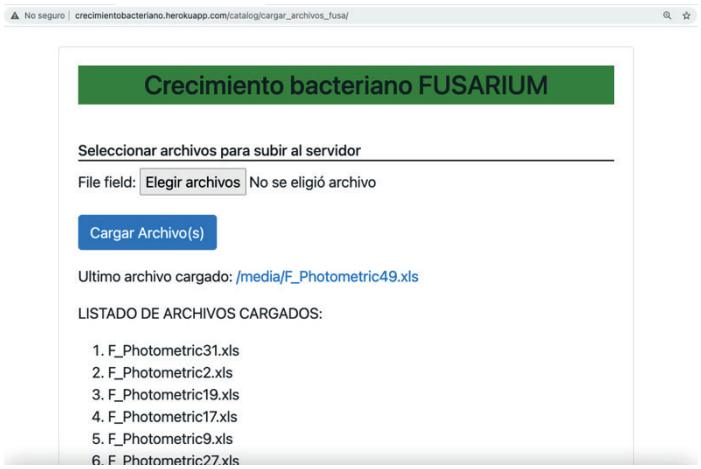


Figura 3. Pantalla con archivos subidos. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se presiona el botón de INICIAR ANÁLISIS para aplicar el proceso estadístico a los datos cargados. Al finalizar dicho análisis, se mostrará una pantalla con el concentrado de resultados obtenidos. Ver figura 4.


DATOS CONCENTRADOS (Promedios) *Fusarium*

	CONTROL	CONTROL H2O	10%	30%	90%
Hora					
1	0.14430	0.15980	0.15493	0.15273	0.19227
2	0.14340	0.15980	0.15557	0.15273	0.19197
3	0.14297	0.16060	0.15383	0.15273	0.19200
4	0.14280	0.16027	0.15347	0.15250	0.19190
5	0.14273	0.16017	0.15217	0.15223	0.19173
6	0.14293	0.16027	0.15350	0.15247	0.19177
7	0.14327	0.16100	0.15283	0.15267	0.19187

Figura 4. Pantalla con resultado del análisis estadístico. Fuente: Elaboración propia.

Por ultimo, se presiona el botón de GRAFICAR y se mostrará una pantalla con la grafica del concentrado de resultados obtenidos anteriormente. Ver figura 5.

ISSN en trámite

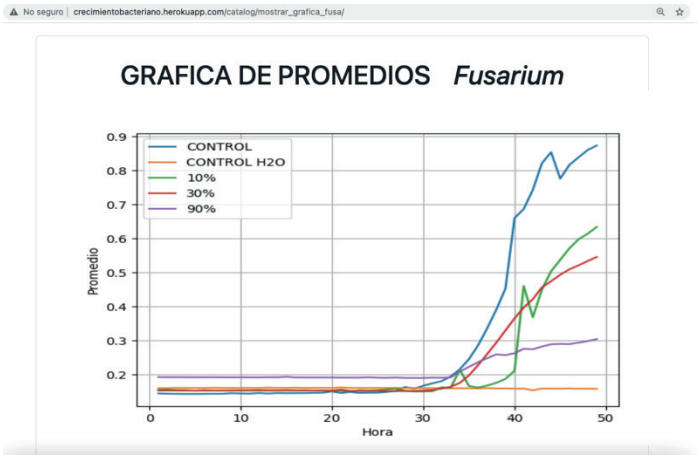


Figura 5. Pantalla la grafica del resultado del análisis estadístico. Fuente: Elaboración propia.

La grafica anterior se comparó contra la **grafica realizada de forma manual** en el archivo de hoja de cálculo con el concentrado de información de todos los demás archivos. Dando como resultado el mismo grafico con respecto a los valores indicados en ambas gráficas.

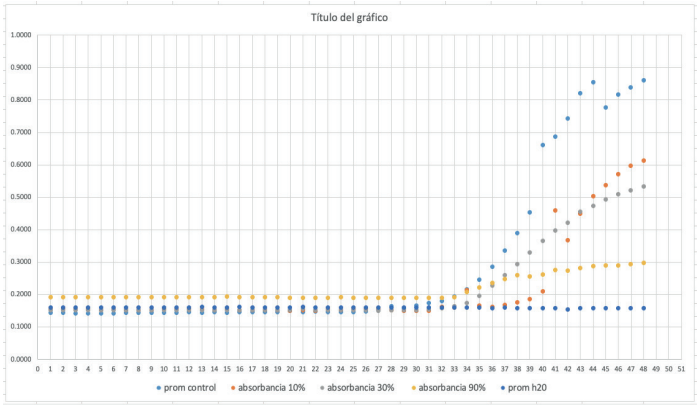


Figura 6. Grafica generada a través de un archivo de hoja de calculo de forma manual. Fuente: Elaboración propia.

Pruebas: Se realizó un plan y procedimiento de pruebas para verificar que la aplicación funcionara correctamente cumpliendo con todos los requerimientos iniciales. Dentro de dicho plan, se realizaron pruebas unitarias, de integración y de sistema. Se corrigieron errores y se volvió a probar su funcionalidad de forma correcta.

Validación y Verificación del Sistema de Información: Una vez que se corrigieron las fallas detectadas en las pruebas, se llevo a cabo el uso de esta por el personal del laboratorio que utiliza el aparato Multiskan GO, con el objetivo de validar y verificar el correcto funcionamiento de la plataforma.

3. RESULTADOS

Para evaluar la mejora en la eficiencia que la plataforma entrega, se midieron los tiempos promedio aproximados que el personal de laboratorio tarda para realizar el proceso de análisis y obtención de resultados **de forma manual**, dicho proceso consta de las siguientes etapas:

I. Abrir/cargar los archivos de las hojas de calculo que contienen los datos.
II. Seleccionar y separar la información que se analizará.
III. Aplicar formula estadística y mostrar el resultado (análisis).
IV. Graficar resultados del análisis estadístico anterior.
V. Analizar resultados y la grafica para toma de decisiones.

Las pruebas de laboratorio realizadas a través del proceso anterior se implementaron sobre el análisis de los datos que se arrojaron del experimento in vitro de metabolitos secundarios de la planta Stevia rebaudiana Bertonide los hongos colletotrichum lindemuthianum y fusarium Solani, utilizando el equipo denominado Multiskan GO, dichos hongos se analizaron durante 96 y 48 horas respectivamente, derivado de este análisis se obtuvieron 144 documentos de Excel (uno por cada hora) que contenían los tratamientos y repeticiones utilizados para realizar una curva de crecimiento microbiológico, se destaca que estos hongos patógenos tienen un impacto de importancia económica en el estado de Zacatecas, debido a que pueden causar perdidas completas de parcelas de frijol, cebolla o chile. Todo este proceso se muestra en la figura 7.

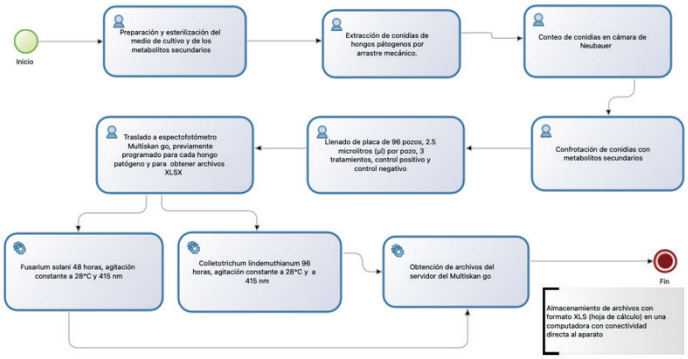


Figura 7. Proceso para el análisis de hongos. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se compararon los tiempos obtenidos del proceso realizado de forma manual los obtenidos **de forma automatizada** a través de la aplicación web. Ver figura 8.

ISSN en trámite

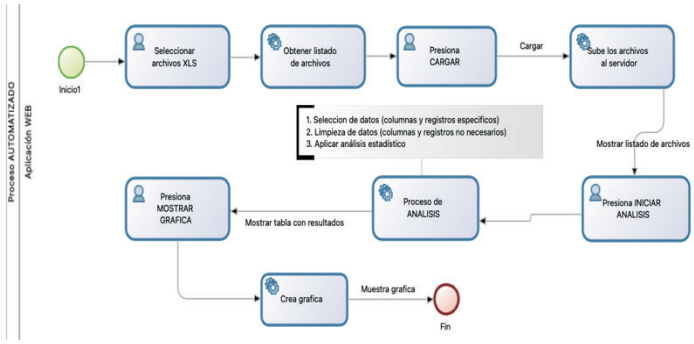


Figura 8. Proceso automatizado para el análisis de datos a través de la aplicación web. Fuente: Elaboración propia.

Debido a los factores que influyen en la rapidez de análisis y obtención de resultados en la plataforma, como los son: capacidad de la computadora desde donde se abre la aplicación, navegador utilizado, velocidad en el servicio de internet, latencia en el servicio y la capacidad de computo de la *PaaS* utilizada, se realizaron diez pruebas para obtener los tiempos promedio en cada etapa del proceso, el cual consiste en lo siguiente:

I. Elegir los archivos desde la computadora local
II. Cargar los archivos al servidor en internet
III. Iniciar el análisis de datos y mostrarlos
IV. Graficar los resultados

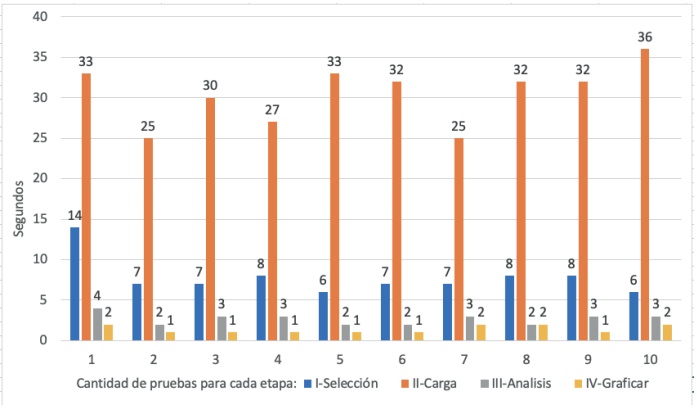
A continuación se muestra una tabla con los resultados de las diez pruebas.

Tabla 1. Promedio de tiempos en segundos

Prueba	Etapa				Total
	I	II	III	IV	
1	14	33	4	2	53
2	7	25	2	1	35
3	7	30	3	1	41
4	8	27	3	1	39
5	6	33	2	1	42
6	7	32	2	1	42
7	7	25	3	2	37
8	8	32	2	2	44
9	8	32	3	1	44
10	6	36	3	2	47
Promedio	**7.8**	**30.5**	**2.7**	**1.4**	**42.4**
Varianza	**5.3**	**13.6**	**0.5**	**0.3**	**19.62**

Los resultados de la tabla anterior se grafican en el siguiente histograma:

Grafica 1. Histograma de tiempos por cada prueba



Una vez obtenidos los tiempos de los procesos (manual y automatizado), se realizó un comparativo que se muestra a continuación:

Tabla 2. Resultados de la comparativa de tiempos

Etapa	Realizado de forma manual (información proporcionada por el personal de laboratorio)	Realizado de forma automática con la aplicación WEB
I-Abrir/ Seleccionar archivos	2 min	**7.8 seg**
II-Seleccionar datos y limpiar/Cargar	450 min	30.5 seg
III-Analizar	20 min	2.7 seg
IV-Graficar	5 min	1.4 seg
TOTAL	477 minutos	42.4 segundos

La cantidad de archivos analizados fueron 48 (archivos de hoja de calculo con extensión XLS).

Nota: No se realizó la comparativa de análisis y graficación a través del software del Multiskan GO ya que **no se cuenta con el presupuesto** para adquirir dicho software privativo.

El ambiente de pruebas utilizado fue el siguiente:

Tabla 3. Ambiente de pruebas

Computadora	MacBook Air, procesador 1.6 GHz Intel Core i5 de dos núcleos, memoria 8 GB de 1600 MHz DDR3
Navegador	Google Chrome Versión 87.0.4280.88
Velocidad de internet	10 Mbps
PaaS	Heroku (https://bit.ly/3H7Hak7)

ISSN en trámite

4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Toda vez que se desarrollo la aplicación web y una vez realizadas las comparaciones de costos económicos y de tiempo, se llego a las siguientes conclusiones.

En caso de no contar con el software propietario que incluye el aparato Multiskan GO y realizar los análisis de forma manual, se observaron las siguientes ventajas:

- **Menor tiempo.** Reducción en un margen mucho muy significativo el tiempo de preparación y análisis de datos, de 477 minutos a menos de un minuto solamente.
- **Fácil acceso**. Acceso al software de análisis de datos sin tener que adquirir el hardware y desde cualquier lugar con una computadora y acceso a internet.
- **Ahorro económico**. En caso de no adquirir el software privativo que el propio fabricante recomienda, se logra un ahorro económico. Lo cual implica un costo gratuito* con el uso de la plataforma web.

  * Se debe considerar la adquisición de un dominio en un hosting para mejorar la implementación y desempeño de la plataforma.

En caso de si contar con el software propietario que incluye el aparato Multiskan GO, se observaron las siguientes ventajas:

- **Multiplataforma.** Debido a que el software privativo solo esta disponible para sistema operativo Windows[2], y el sistema propuesto esta basado en tecnología web que permite ser utilizado en cualquier sistema operativo que tenga un navegador de internet.
- **Fácil acceso**. Acceso al software de análisis de datos desde cualquier lugar con una computadora y acceso a internet.

Tomando en cuenta estas conclusiones, se puede establecer que el software privativo puede ser sustituido por software libre para el análisis de datos relacionados a la curva de crecimiento bacteriano, el cual puede llegar a ser totalmente gratuito y reducir significativamente los tiempos de preparación, análisis de datos e interpretación de los resultados de dichos estudios realizados por personal de laboratorio (técnicos, practicantes, etc.).

Se debe tomar en cuenta que esta plataforma esta en su versión inicial, donde solo se realizaron análisis estadístico a una parte de los datos a través de la obtención de promedios. Este pequeño proceso lo hace también el software privativo (según datos indicados por el personal de laboratorio que lo utiliza) por lo que la aplicación propuesta puede ser una opción para sustituir a dicho software privativo.

A futuro, se puede pensar en una plataforma abierta para cualquier tipo de análisis estadístico, como análisis de varianzas, e inclusive mas avanzados como análisis ADN y ARN, entre otros, que son los análisis que realizar el aparato Multiskan GO; además de aplicarlos sobre diferentes tipos de datos, ofreciendo la posibilidad y flexibilidad de elegir cuales analizar (tipos, tamaños, rangos, etc.). También se puede mejorar la forma en la cual se presentarán los resultados y las graficas; incluyendo opciones de exportar, enviar y/o imprimir dichos resultados. para de esta manera, tomar decisiones basadas en una mayor cantidad de representación e información entregada por la aplicación web.

REFERENCIAS

Alsaqqa, S., Sawalha, S., & Abdel-Nabi, H. (2020). "Agile Software Development: Methodologies and Trends". *International Journal Of Interactive Mobile Technologies (IJIM), 14*(11), pp. 246-270. doi:http://dx.doi.org/10.3991/ijim.v14i11.13269

Cuevas Moreno, J. A. (2016). Los hongos: héroes y villanos de la prosperidad humana. 17, 1–10.

Estrada Salazar, G., & Ramírez Galeano, M. (2019). Micología general. In Microbiología y parasitología médicas. http://www.ucm.edu.co/wp-content/uploads/libros/Micologia_general.pdf

Embarak O. (2018) The Importance of Data Visualization in Business Intelligence. In: Data Analysis and Visualization Using Python. Apress, Berkeley, CA. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-4109-7_2

García-Vellido Santías, A. (2020). *Análisis de datos y toma de decisiones utilizando una herramienta de business intelligence: Tableau.* (Trabajo Fin de Máster Inédito). Universidad de Sevilla, Sevilla.

Gibson, J. P. and T. Mourad. 2018. The growing importance of data literacy in life science education. American Journal of Botany 105(12): 1953–1956.
doi:10.1002/ajb2.1195

González F.; Calero S. & Loaiza D, 2019. *Comparación de las metodologías cascada y ágil para el aumento de la productividad en el desarrollo de software.* Universidad Santiago de Cali, Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Industrial. Universidad Santiago de Cali, Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería de Sistemas.

Guanming Wu, Eric Dawson, Adrian Duong, Robin Haw, Lincoln Stein. *ReactomeFIViz: a Cytoscape app for*

[2] Hasta el momento de la presentación de este articulo.
https://bit.ly/3wybDD3

pathway and network-based data analysis Version 2. F1000Res. 2014; 3: 146. Published online 2014 Sep 12. doi: 10.12688/f1000research.4431.1 PMCID: PMC4184317

Hampton, S. E., C. A. Strasser, J. J. Tewksbury, W. K. Gram, A. E. Budden, A. L. Batcheller, C. S. Duke, and J. H. Porter. 2013. *Big data and the future of ecology. Frontiers in Ecology and the Environment* 11: 156–162.

Hyde, K. D. (ed) (1997a). (1997). Can we rapidly measure fungal diversity? Mycologist, 11, 175–178.

Jerez Puebla, L. E., Fernández Andreu, C. M., Iiinait Zarago, M. T., Perurena R, M., Rodríguez Gutiérrez, I., & Martínez Machín, G. (2011). *"Estudio comparativo de medición entre lecturas visuales y espectrofotométricas en pruebas de susceptibilidad in vitro de aislamientos de cándida". Revista Habanera de Ciencias Médicas*, 10(2), 182–189.

Majumdar, J., Naraseeyappa, S. & Ankalaki, S. Analysis of agriculture data using data mining techniques: application of big data. J Big Data 4, 20 (2017). https://doi.org/10.1186/s40537-017-0077-4

Mall, R. (2018). *Fundamentals of software engineering.* PHI Learning Pvt. Ltd.

Marx, V. 2013. "*Biology: the big challenges of big data*·. *Nature* 498: 255–260.

Merendino A, Sally Dibb, Maureen Meadows, Lee Quinn, David Wilson, Lyndon Simkin, *Ana Canhoto, "Big data, big decisions: The impact of big data on board level decision-making", Journal of Business Research*, Volume 93, 2018, Pages 67-78, ISSN 0148-2963,https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2018.08.029. (http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0148296318304132).

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2018. *Data science for undergraduates: opportunities and options*. National Academies Press, Washington, D.C., USA. Available at https://doi.org/10.17226/25104.

Nieves Guerrero, Citlali & Ucán Pech, Juan & Menéndez Domínguez, Víctor. (2014). "*UWE en Sistema de Recomendación de Objetos de Aprendizaje. Aplicando Ingeniería Web: Un Método en Caso de Estudio". REVISTA LATINOAMERICANA DE INGENIERÍA DE SOFTWARE*. 2. 137-143. 10.18294/relais.2014.137-143.

Pfenning, L. H., & Abreu, M. De. (2012). *Hongos del suelo saprófitos y patógenos de plantas*. 243–280.

Relloso, M. S., Nievas, J., Taie, S. F., Farquharson, V., Mujica, M. T., Romano, V., Zarate, M. S., & Smayevsky, J. (2015). "*Evaluación de la espectrometría de masas: MALDI-TOF MS para la identificación rápida y confiable de levaduras". Revista Argentina de Microbiología*, 47(2), 103–107. https://doi.org/10.1016/j.ram.2015.02.004

Vázquez-Ingelmo, A., García- Holgado, A., & García-Peñalvo, F. J. (2020). *C4 model in a Software Engineering subject to ease the comprehension of UML and the software development process*. In 2020 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON), (27-30 April 2020, Porto, Portugal) (pp. 919-924). IEEE

ISSN en trámite

Arquitectura de un módulo para analizar el nivel de lectura y comprensión en el proceso de aprendizaje de matemáticas mediante señales fisiológicas

José Luis Sánchez Jiménez*, María Antonieta Abud Figueroa, José Luis Sánchez Cervantes***, Ulises Juárez Martínez****, Maritza Bustos López*****

*, **, ***, ****Tecnológico Nacional de México/I.T. Orizaba
Av. Oriente 9 No. 852.Col. Emiliano Zapata. C.P. 94320, Orizaba, Ver. México,
Teléfono/Fax: +52(272) 725 7056, (e-mail: jlsanchez802@gmail.com,
mabudf@orizaba.tecnm.mx, jsanchezc@orizaba.tecnm.mx,
ujuarezm@orizaba.tecnm.mx)
*****Universidad Veracruzana de Xalapa
Lomas del Estadio S/N, Col. Zona Universitaria C.P. 91000, Xalapa, Veracruz, México,
Teléfono: +52 (228) 842 17 00, (e-mail: maritbustos@gmail.com)

Resumen: Actualmente en México, muchos niños y jóvenes tienen problemas de lectura por la baja comprensión que logran; algunos de los efectos más comunes de la dificultad lectora son: problemas de memoria, vocabulario pobre, falta de decodificación en palabras o frases, incorrecta interpretación, inseguridad y la falta de interés. En los resultados del Programa para la Evaluación Internacional de Alumnos (PISA) 2018, únicamente el 1% de los alumnos nacionales lograron un desempeño sobresaliente, el 57% de estos alumnos permanecen en un nivel medio y el 42% no obtuvieron el nivel mínimo de competencias de lectura. Con esta problemática, este artículo presenta una arquitectura de un módulo para analizar el nivel de lectura y comprensión en el proceso de aprendizaje en alumnos de secundaria, con la ayuda de un dispositivo capaz de detectar señales fisiológicas a través de un encefalograma y el análisis de video, apoyado en técnicas de reconocimiento de expresiones faciales, y de esta forma identificar el nivel de comprensión lectora.

Palabras clave: nivel de lectura, señales fisiológicas, reconocimiento de expresiones faciales.

1. INTRODUCCIÓN

La comprensión lectora es una parte esencial para la sociedad que se ha construido, ya que se depende cada día de las capacidades que cada integrante tiene para aprender, debido a que tener una comprensión lectora deseable permite aportar mucho conocimiento a lo que se está realizando, dado a la habilidad de analizar e interpretar información, sin embargo, esto no es muy bien logrado y solamente un porcentaje muy bajo de alumnos y trabajadores son capaces de alcanzar.

En la actualidad la tecnología provee dispositivos que permiten la captura y análisis de señales cerebrales mediante la encefalografía y avances importantes en el desarrollo del reconocimiento de expresiones faciales a partir de videos, imágenes, entre otros, así como una muy grande mejora en la capacidad de los equipos de cómputo, siendo esto un beneficio, ya que, permite obtener un máximo rendimiento en las herramientas.

En este artículo se presenta una arquitectura de un módulo para analizar el nivel de lectura y comprensión en el proceso de aprendizaje en alumnos de secundaria, con la ayuda de una diadema que proporciona señales fisiológicas, y la captura de video de la persona en el proceso de aprendizaje que, mediante el uso de bibliotecas de procesamiento de video para el reconocimiento de expresiones faciales, logre el análisis e identificación del nivel de comprensión lectora.

Este documento se organiza en tres secciones principales, la sección de trabajos relacionados, donde se hace una revisión de investigaciones y publicaciones relacionadas; el marco conceptual, donde se presentan los requerimientos del sistema, la arquitectura, el patrón de diseño y los *wireframes* diseñados para el sistema; y por último las conclusiones.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

Diversos autores han realizado trabajos sobre la detección y análisis de emociones y señales fisiológicas, los trabajos principales se presentan a continuación.

En (Fernández-Caballero *et al.*, 2016) se presentó una arquitectura del concepto para detección y regulación de emociones en entornos de salud inteligentes (hospitales, clínicas, centros de atención ambulatoria, entre otros). En este trabajo de investigación se quiere lograr la mejora de la calidad de vida y cuidado de adultos mayores que se encuentren en entornos de salud. El resultado que se obtuvo es la mejor calidad de vida y

ISSN en trámite

cuidado de adultos mayores en entornos de salud, cambiando el estado de ánimo negativo o variante a un estado positivo.

Krithika y Lakshmi Priya (Krithika and Lakshmi Priya, 2016) detectaron el nivel de concentración del estudiante con una monitorización continua de la rotación de la cabeza y movimiento de los ojos. Los autores identifican tres niveles de concentración: alto, medio y bajo. El nivel alto de concentración se determina a partir de la posición correcta de la cara y ojos, es decir, que esté mirando a la pantalla. El nivel medio de concentración se determina si la cabeza está girada y solo se detecta un ojo, lo que indica que el estudiante no está observando correctamente la pantalla y tiene poco interés en el tema. Y, por último, el nivel de concentración bajo se determina cuando hay una rotación anormal de la cabeza y no se detectan rasgos faciales, lo que indica que el estudiante no está interesado en el tema.

En (Wei, Wu and Tudor, 2017) se explicó cómo diversas emociones influyen en la vida diaria como el razonamiento y atención, toma de decisiones, bienestar y calidad de vida. En este trabajo de investigación se planteó como objetivo principal detectar las emociones en tiempo real y con alta precisión y abordar los factores causales, ya que estos llevan a emociones más positivas. Los autores utilizaron la combinación de densidad espectral de potencia (PSD), potencia de señal (SP) y patrón espacial común (CSP) como principales características, obteniendo así un resultado dependiente del sujeto de 86.83% de precisión. Los autores lograron aumentar la precisión con el 75% de los participantes con ubicaciones mejoradas, incrementando hasta 91.75%.

En (Monkaresi *et al.*, 2017) se planteó un enfoque para detectar la participación en una tarea de escritura, ya que es una de las actividades más comunes en el contexto laboral y educativo, el objetivo de este trabajo de investigación fue apoyar herramientas de escritura que ayuden a las personas a participar y disfrutar las actividades de escritura en entornos educativos computarizados y tener una experiencia más atractiva. Los autores mostraron en sus resultados que el compromiso se detecta en escenarios reales con una precisión moderada.

Particularmente, la detección de emociones a través de señales fisiológicas es muy eficaz porque aprovecha la emoción pura e inalterada a diferencia de métodos como expresiones faciales que muchas veces son falsificadas. El objetivo de (Jenke and Peer, 2018) fue diseñar un modelo dinámico de caja gris para la estimación de emociones a partir de señales fisiológicas la cual sea capaz de incorporar hallazgos y suposiciones de los modelos de evaluación. Los autores desarrollaron una arquitectura cognitiva para modelar la dinámica de las emociones con un modelo de caja gris para la estimación dinámica de la intensidad de la emoción.

En (Karakostas *et al.*, 2018) desarrollaron y diseñaron una plataforma educativa afectiva basada en sensores que ayuda a los estudiantes, esta plataforma es SpAtiAL (Aprendizaje afectivo basado en sensores) el cual ayudará a los estudiantes con problemas emocionales con un procedimiento de aprendizaje más efectivo y con apoyo integral de parte de los profesores para ofrecer los procedimientos de aprendizaje de forma más eficiente.

El objetivo de (Egger, Ley and Hanke, 2019) fue dar una visión general de los métodos para el reconocimiento de emociones y comparar su aplicabilidad. Los autores expusieron diversos métodos, los cuales son: Electroencefalografía (EEG), Reconocimiento Facial (FR), Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca (VFC), Actividad Electro-dérmica (EDA), Respiración (RSP), Temperatura de la Piel (SKT) y Electromiografía (EMG). El uso de los métodos se utiliza en relojes inteligentes o tejidos inteligentes, cámaras de video, computadoras, teléfonos inteligentes o tabletas con cámaras integradas.

En (Costa *et al.*, 2019) se creó una plataforma AAL (Vida Cotidiana Asistida) usando una Pulsera Inteligente Emocional y la iGenda para que sea capaz de atender a usuarios de manera discreta y obtener la información emocional para enriquecer el conocimiento de iGenda sobre el usuario, de tal forma que se tenga la habilidad de pronosticar decisiones futuras de los usuarios. El uso de iGenda es la comunicación con los usuarios, mientras que el uso de la ESW es comprender cómo se siente el usuario detectando sus emociones mediante la respuesta galvánica de la piel y fotopletismografía para detectar problemas cardiacos o un ataque cardiaco y reportar signos vitales.

En (Domínguez-Jiménez *et al.*, 2020) se propuso un modelo para reconocer tres emociones: diversión, tristeza y señales neutrales a partir de señales fisiológicas. Los autores desarrollaron un guante para adquirir dos señales biológicas: fotopletismografía (PPG) y la respuesta galvánica de la piel (GSR). Para realizar pruebas, los autores provocaron las emociones en 37 voluntarios usando videos y registrando la PPG y GSR, posteriormente, se evaluaron y clasificaron con varias técnicas de selección de características y clasificadores. Los resultados que obtuvieron mostraron que el sistema pudo detectar las tres emociones con precisión de 100% y se dieron cuenta de la posibilidad de obtener las tres emociones usando solo la GSR.

En (Wang *et al.*, 2020) propuso un marco donde se combinan las plataformas de clases en línea con un algoritmo de reconocimiento de expresiones faciales, utilizando las cámaras de los dispositivos para la recolección de fotografías faciales de los estudiantes y analizar ocho tipos de expresiones faciales. La principal contribución de este trabajo de investigación fue permitir la detección en tiempo real de emociones en los estudiantes en clases en línea y ofrecer retroalimentación a tiempo por parte de los profesores y así mejorar los programas de enseñanza y la calidad y eficiencia de la educación en línea. Los autores probaron el marco que propusieron en una reunión en línea donde se incluían a 27 personas, de las cuales 10 se

ISSN en trámite

detectaron como “felices”, 15 como “neutrales”, y 2 como “tristes”.

Después de analizar los artículos citados, se concluye que, si bien en los trabajos mencionados ya hicieron pruebas en la obtención de emociones, en jóvenes alumnos o adultos mayores enfocado a mejorar su calidad de vida, es una buena oportunidad para desarrollar junto con la diadema EMOTIV EPOC+ y visión por computadora un componente de software que analice las señales fisiológicas de una persona en el proceso de aprendizaje de matemáticas, aumentando de manera considerable las emociones detectadas en una persona y así mejorar la relación emoción-aprendizaje.

3. MARCO CONCEPTUAL

3.1 Determinación de requerimientos

El objetivo es encontrar los requisitos funcionales del sistema y así representarlos en un diagrama de casos de uso. El diagrama presenta las funciones del sistema, se representan desde el punto de vista del actor, de este modo, el diagrama muestra la relación entre un actor y las funciones del sistema (Fig. 1).

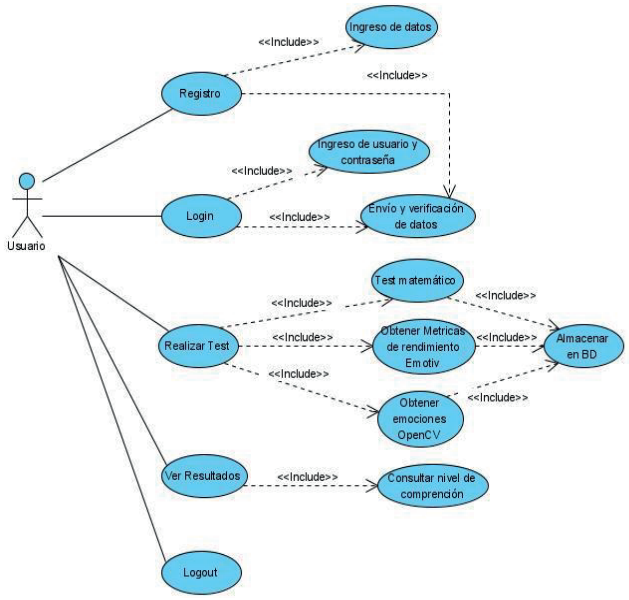


Fig. 1. Diagrama de casos de uso.

El actor Alumno puede registrarse agregando sus datos como nombre, apellidos, edad, usuario y contraseña, el Alumno debe autenticarse en el sistema para utilizar las funciones del sistema, de igual forma pueden finalizar la sesión en cualquier momento. Una vez iniciada la sesión, el Alumno puede comenzar el test de comprensión lectora y revisar los resultados de las pruebas que ha realizado.

3.2 Arquitectura

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

El sistema consta de cinco módulos importantes (Fig. 2).

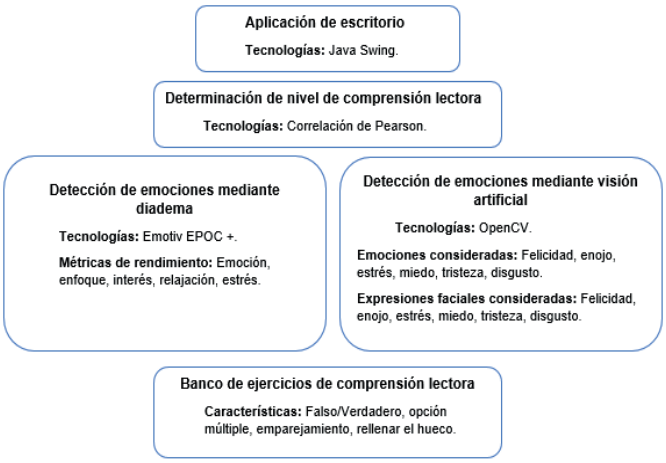


Fig. 2. Módulos del sistema.

El módulo de “Banco de ejercicios de comprensión lectora” consta de los textos, preguntas y respuestas presentadas en el test, tomando en consideración respuestas verdadero/falso, opción múltiple, emparejamiento y rellenar.

El segundo módulo “Detección de emociones mediante Diadema” tomando como tecnología la diadema Emotiv Epoc + y obteniendo las métricas de rendimiento las cuales son:

- **Emoción.** Una alteración del ánimo de corta duración.
- **Enfoque.** Es mantener la atención hacia un tema, cuestión o problema.
- **Interés.** Hace que la atención se centre en un objeto, situación o problema, también abarca la curiosidad y en algunos casos mínimos sorpresa.
- **Relajación.** Es un estado de confort, donde se reduce la tención física y mental de un sujeto.
- **Estrés.** Es un mecanismo que aparece cuando una persona se encuentra en situaciones que superan sus recursos, por ejemplo, algún desafío o exceso de trabajo.

El módulo “Detección de emociones mediante visión artificial” tomando como tecnología OpenCV para obtener las emociones básicas de una persona: felicidad, enojo, estrés, miedo, tristeza y disgusto.

ISSN en trámite

El cuarto módulo "Determinación de nivel de comprensión lectora" mediante la correlación de Pearson que es un índice que puede utilizarse para medir el grado de relación de dos variables siempre y cuando ambas sean cuantitativas y continuas.

Y finalmente el módulo "Aplicación de escritorio" usando la tecnología Java Swing para generar las vistas necesarias para el uso de la aplicación.

3.3 Patrón de diseño

El sistema se diseñó con base al patrón arquitectónico MCV (*Model View Control*, Modelo Vista Controlador), el cual es una guía que permite expresar la organización y la estructura de los componentes del sistema de software y de esta manera facilita el mantenimiento (Fig. 3).

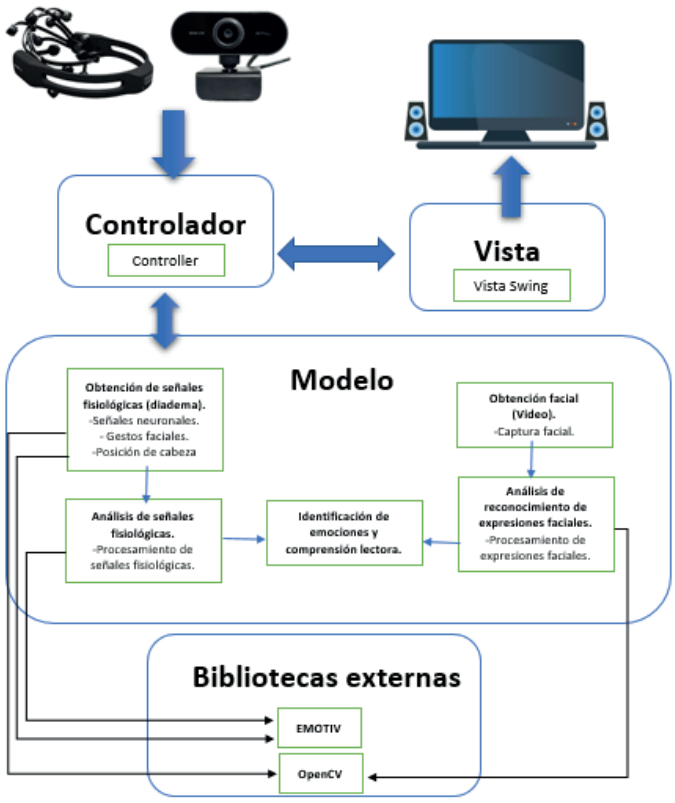


Fig. 3. Patrón MVC.

Modelo. Es donde se trabajan con los datos, concederá mecanismos para acceder a la información y también actualiza los estados. Usa las bibliotecas, como la de Emotiv y OpenCV para realizar la obtención de métricas y emociones, de igual forma al utilizar una base de datos, el modelo se encargará de hacer esa conexión con la base de datos para realizar actualizaciones, inserciones, entre otros.

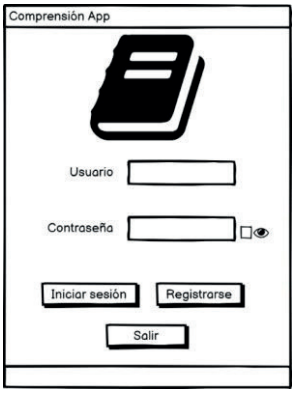
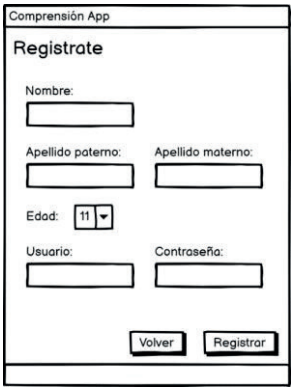
Vista. Como lo indica su nombre, contiene el código del sistema que va a generar la visualización de las interfaces de usuario. La vista es el medio con el que el usuario va a hacer interacción con el sistema; para este propósito, se usa Java Swing que es una biblioteca de clases para crear interfaces gráficas de usuario.

Controlador. Este será el vínculo entre la vista y el modelo, contiene el código necesario para responder a las acciones que solicitan en la aplicación.

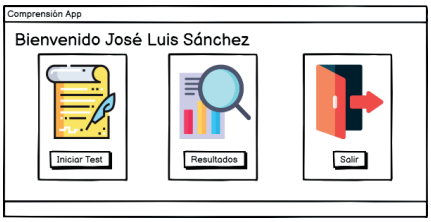
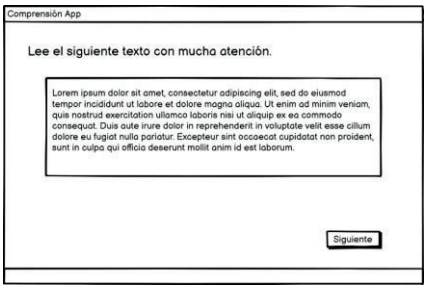
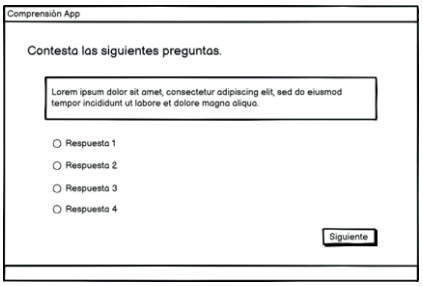
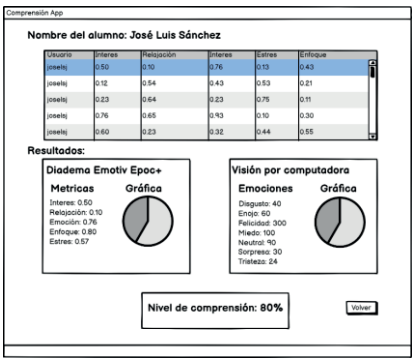
3.4 Diseño de Wireframes para el sistema.

El fin uso de los *Wireframes* es establecer la estructura básica una página antes de agregar el contenido y el diseño visual, y se puede crear con papel o con aplicaciones de software. Se muestran a continuación los *Wireframes* considerados para el sistema (Tabla 1).

Tabla 1. Wireframes del Sistema.

Descripción	*Wireframe*
Login. Ventana inicial, donde el usuario accede al sistema mediante la identificación de usuario utilizando credenciales.	
Registro. Ventana de registro donde el usuario ingresa la información necesaria y de esta forma poder utilizar el sistema.	

ISSN en trámite

Inicio. Ventana principal donde se presentan las principales opciones, Iniciar Test, Resultados y Salir.	
Lectura del texto. Una vez iniciado el test, se presenta la ventana donde aparece un texto referente a un tema de matemáticas.	
Preguntas. Se presentan una serie de preguntas relacionadas al texto leído anteriormente con diferentes respuestas, el botón se mantendrá en "Siguiente" hasta que el test llegue a su final cambiando a "Finalizar".	
Resultados. En esta ventana se muestran los resultados obtenidos en una tabla donde aparecen todos valores de las métricas y emociones detectadas, en la parte inferior se muestran los valores más detallados de un conjunto de resultados seleccionados en la tabla, junto con una gráfica y por último el nivel de comprensión lectora obtenido.	

3.5 Prototipo.

Hasta el momento se ha desarrollado un prototipo del sistema con un porcentaje de 90% de desarrollo, en las tres siguientes figuras se muestran algunas de las pantallas de la aplicación.



Fig. 4. Login prototipo.



Fig. 4. Inicio prototipo.

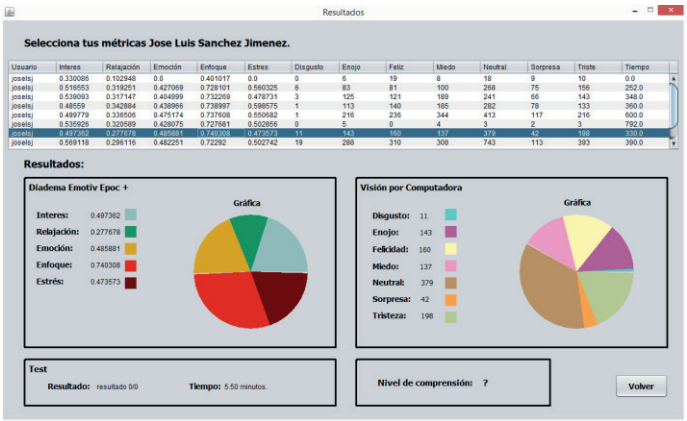


Fig. 5. Resultados prototipo.

ISSN en trámite

4. CONCLUSIONES

El análisis del nivel de lectura y comprensión en el proceso de aprendizaje es un tópico muy importante a tener en cuenta, tal como se mencionó en el presente artículo, en México es preocupante la falta de comprensión lectora, ya que en los resultados del Programa para la Evaluación Internacional de Alumnos 2018 (PISA), únicamente el 1% de los alumnos nacionales lograron un desempeño sobresaliente. Con la problemática mencionada y en busca de ayudar a mejorar la comprensión lectora, en esta propuesta presentamos una Arquitectura de un módulo para analizar el nivel de lectura y comprensión en el proceso de aprendizaje de matemáticas mediante señales fisiológicas, nivel secundaria, con el objetivo de generar nuevas estrategias didácticas en la actividad de lectura y comprensión y así incrementar el nivel en los alumnos el cual le servirá para tener la capacidad de interpretar, comunicar y relacionarse mejor en diferentes entornos. El módulo propuesto mejorará el proceso de enseñanza-aprendizaje para aumentar el nivel de comprensión lectora, ayudando tanto al profesor y a los alumnos a logar mejores métodos de enseñanza.

Como trabajo a futuro se desarrollará el módulo de la arquitectura presentada en este artículo usando las herramientas expuestas.

REFERENCIAS

Fernández-Caballero, A. *et al.* (2016) 'Smart environment architecture for emotion detection and regulation', *Journal of Biomedical Informatics*, 64, pp. 55–73. doi: 10.1016/j.jbi.2016.09.015.

Krithika, L. B. and Lakshmi Priya, G. G. (2016) 'Student Emotion Recognition System (SERS) for e-learning Improvement Based on Learner Concentration Metric', *Procedia Computer Science*, 85(Cms), pp. 767–776. doi: 10.1016/j.procs.2016.05.264.

Wei, Y., Wu, Y. and Tudor, J. (2017) 'A real-time wearable emotion detection headband based on EEG measurement', *Sensors and Actuators, A: Physical*, 263, pp. 614–621. doi: 10.1016/j.sna.2017.07.012.

Monkaresi, H. *et al.* (2017) 'Automated Detection of Engagement Using Video-Based Estimation of Facial Expressions and Heart Rate', *IEEE Transactions on Affective Computing*, 8(1), pp. 15–28. doi: 10.1109/TAFFC.2016.2515084.

Jenke, R. and Peer, A. (2018) 'A cognitive architecture for modeling emotion dynamics: Intensity estimation from physiological signals', *Cognitive Systems Research*, 49, pp. 128–141. doi: 10.1016/j.cogsys.2018.01.004.

Karakostas, A. *et al.* (2018) 'SpAtiAL: A sensor based framework to support affective learning', *3DTV-Conference*, 2017-June, pp. 1–4. doi: 10.1109/3DTV.2017.8280400.

Egger, M., Ley, M. and Hanke, S. (2019) 'Emotion Recognition from Physiological Signal Analysis: A Review', *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 343, pp. 35–55. doi: 10.1016/j.entcs.2019.04.009.

Costa, A. *et al.* (2019) 'Emotions detection on an ambient intelligent system using wearable devices', *Future Generation Computer Systems*, 92, pp. 479–489. doi: 10.1016/j.future.2018.03.038.

Domínguez-Jiménez, J. A. *et al.* (2020) 'A machine learning model for emotion recognition from physiological signals', *Biomedical Signal Processing and Control*, 55, p. 101646. doi: 10.1016/j.bspc.2019.101646.

Wang, W. *et al.* (2020) 'Emotion Recognition of Students Based on Facial Expressions in Online Education Based on the Perspective of Computer Simulation', *Complexity*, 2020. doi: 10.1155/2020/4065207.

ISSN en trámite

Implementación de un prototipo de aplicación móvil para detección de la respiración diafragmática como herramienta en la terapia de rehabilitación pulmonar remota

Marlonne Salas Bandala. * Manuel Prisciliano Ralero de la Mora. *Rubén Posada Gómez. ** María Angélica Cerdán. *

**Instituto Tecnológico Superior de Xalapa, Xalapa, Veracruz 91096 MEX (e-mail: 207º01798@itsx.edu.mx, manuel.rm@xalapa.tecnm.mx, angelica.cerdan@itsx.edu.mx).*
***Centro Regional de Optimización y Desarrollo de Equipo, Orizaba, Veracruz 94380 MEX (e-mail: rposadasg@orizaba.tecnm.mx)*

Resumen: Las Enfermedades Pulmonares Obstructivas Crónicas (EPOC) impactan de manera directa en la calidad de vida, en lo social y sobre todo en lo económico de las personas que la padecen, la EPOC no siempre se diagnostica y puede llegar a ser mortal. También tiene un impacto directo en la función física de las personas afectadas ya que el EPOC afecta directamente a los pulmones. Para esto, los pacientes deben llevar rehabilitación respiratoria para mejorar su calidad de vida, sin embargo, muchas veces ésta no es accesible para todos los pacientes. Una potencial solución a este problema es desarrollar herramientas que permitan la aplicación de rehabilitaciones a distancia por medio de las tecnologías de la información. Este trabajo tiene como objetivo experimentar sobre los ejercicios fisioterapéuticos de rehabilitación pulmonar, específicamente el ejercicio de "Respiración abdominal o diafragmática" mediante un dispositivo móvil para la ejecución autónoma y remota por parte del paciente. Los resultados son alentadores y se demostró la correcta y fácil ejecución del ejercicio.

Palabras Clave: EPOC, Fisioterapia, Android, Rehabilitación, Dispositivo móvil.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, las tecnologías de la información en el área médica tienen una gran participación ya que día con día se están mejorando, incluyendo: la atención médica, los tratamientos y la rehabilitación. En la actualidad, los especialistas en el área médica necesitan de una amplia actualización sobre sus habilidades, conocimientos y actitudes para garantizar una atención de calidad y de igual manera adquirir conocimientos sobre las competencias que existen actualmente sobre la salud móvil, teléfonos inteligentes / dispositivos y aplicaciones, ya que actualmente tienen un alcance más amplio orientados a la atención en persona, en tele-salud y la salud del comportamiento a distancia.

La eSalud es definida por la Organización Mundial de la Salud (OMS) como: "... el uso rentable y seguro de las tecnologías de la información y la comunicación en apoyo de los campos relacionados con la salud y la salud, incluida la atención médica, la vigilancia de la salud y la educación para la salud, el conocimiento y la investigación" (OMS, 2017). Existe una variante particular que aborda la eSalud por dispositivos móviles, que se conoce como la mSalud, este término es definido por la OMS de la siguiente manera: "la práctica de la medicina y salud pública soportada por dispositivos móviles…" (OMS, 2017). Este término, a diferencia de eSalud, se enfoca específicamente en el uso de dispositivos móviles, tales como: *Smarphone's, Dispositivos PDA's* o dispositivos móviles en general, para el seguimiento y la atención especializada de pacientes que así lo requieran.

La Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica (EPOC) es una enfermedad potencialmente mortal, en cuyos principales efectos se encuentra la disnea, la cual predispone a padecer exacerbaciones y enfermedades graves. La EPOC tiene la principal característica de generar una reducción persistente al flujo de aire en las vías respiratorias, lo que afecta principalmente la función física, el desarrollo psicológico y sobre todo la vida social de los pacientes que la padecen. Estos síntomas empeoran gradualmente, lo que ocasiona que la disnea que es persistente y en un principio se asocia al esfuerzo, aumente con el tiempo hasta aparecer en reposo, la mayoría de las veces esta enfermedad no se diagnostica y puede ser mortal (OMS, 2017).

La respuesta a esta condición es la Rehabilitación Pulmonar Respiratoria, que ha demostrado su eficacia principalmente en cuanto a la mejoría de la disnea del esfuerzo, de igual manera en la capacidad de ejercicio y sobre todo impacta de manera directa en la calidad de vida de los enfermos que padecen esta enfermedad crónica (Peña, 2001). Los programas más complejos y efectivos de rehabilitación respiratoria incluyen numerosos profesionales dedicados al área y aplicación de técnicas variadas,

ISSN en trámite

donde el principal objetivo va desde la eliminación del tabaquismo hasta la terapia física y ocupacional, cabe destacar que este tipo de terapias son muy costosas (Peña, 2001).

Los avances de las Tecnologías de la Información y Comunicaciones (TIC's) que se han tenido en los últimos años, permiten un amplio desarrollo de tecnologías y aplicaciones que impacten de manera favorable y directa en el área de la salud (eSalud), donde las principales ventajas se encuentran en la mejora del afectado, el fácil acceso a la información y sobre todo que el paciente se encuentra cerca a su médico (Sainz de Abajo., et al, 2021, p.1-10).

2. ENFERMEDADES CRÓNICAS TRATADAS POR LA ESALUD

Hablando económicamente, las personas que padecen una enfermedad crónica consideran que un tratamiento autónomo es más ventajoso, en comparación de asistir a una unidad médica para tomar su debido tratamiento cada vez que su salud lo requiera. (Sainz de Abajo., et al, 2021). Esto implica que las personas afectadas deban tener un cambio efectivo en su estilo de vida, donde impliquen la actividad física como una tarea primordial a lo largo del día, llevar una dieta rigurosa y sobre todo dejar aquellas sustancias que afectan la calidad de vida.

Desde la aparición de la eSalud y todas las ramas que han aparecido gracias a los recientes avances e investigaciones, han surgido aplicaciones para apoyar la tele-salud, la rehabilitación la distancia y el tratamiento de las enfermedades crónicas.

En el año 2016, los autores (Pereira, Almeida and Caixinha, 2016) realizaron una aplicación móvil desarrollada en la plataforma Android, donde el principal objetivo fue monitorear las Enfermedades Pulmonares Obstructivas Crónicas (EPOC). Con la aplicación propuesta, los afectados pueden realizar, monitorear y evaluar diferentes ejercicios respiratorios, la app también incluye el monitoreo de diferentes actividades físicas que se realizan comúnmente día con día. La validación de la aplicación se proporcionó a 10 pacientes con enfermedades respiratorias, los principales resultados arrojaron que todos los pacientes reconocieron la utilidad de utilizar la aplicación móvil para monitorear su enfermedad.

Los autores (Martins, Carvalho and Soares, 2020) realizaron un juego serio basado en técnicas del procesamiento de imagen con el objetivo de monitorear e implementar la práctica de la fisioterapia de personas que padecen una movilidad reducida debido a las enfermedades neurológicas. El juego fue validado en un entorno clínico, el juego tiene la capacidad de almacenar datos como: alineación, compensación y la velocidad del paciente mientras realiza cada ejercicio, cada persona afectada utilizó la implementación dos veces por semana en sesiones de fisioterapia, con una duración de treinta minutos, durante doce a quince sesiones. Todos los pacientes sufrieron cambios con mejores y peores rendimientos, la mayoría logró completar con éxito los diferentes ejercicios que proporcionó el juego y que forman parte de los planes fisioterapéuticos.

En el año 2018, (Tipprom et al., 2018) diseñaron y realizaron un sistema para proporcionar una comunicación directa en el seguimiento de la rehabilitación entre los especialistas en el área y los pacientes que padecen dolor de rodilla, los autores incluyeron funciones para llevar una correcta administración y seguimiento de los datos de recuperación del paciente. Este sistema fue basado en web para lograr una mayor accesibilidad, el sistema web fue evaluado mediante un estudio de usabilidad para recopilar información cuantitativa sobre las mejoras que pudiese tener el sistema. La información del cuestionario de usabilidad reveló la utilidad de este sistema de monitoreo de rehabilitación.

3. DESARROLLO

Nuestro estudio de caso experimental aborda las enfermedades pulmonares obstructivas crónicas y es implementado en la tecnología móvil, en particular se plantea el ejercicio fisioterapéutico "Respiración abdominal o diafragmática", el cual tiene el principal objetivo de eliminar las secreciones, entrenar los músculos que se utilizan para respirar y, sobre todo mejorar la calidad de vida de la persona afectada.

3.1 Tecnología

El trabajo se enfoca en la tendencia sobre la rehabilitación a distancia, se ha usado la API de desarrollo "Google ML", ya que cuenta con apoyo del aprendizaje automático y técnicas de inteligencia artificial que nos ayudarán con la detección de puntos en el cuerpo humano. La figura 1 muestra los 33 puntos de referencia, incluyendo rasgos faciales (oídos, ojos, boca y nariz) y puntos especiales en las manos y los pies, todo esto tomando la imagen del usuario a través de la cámara del dispositivo móvil

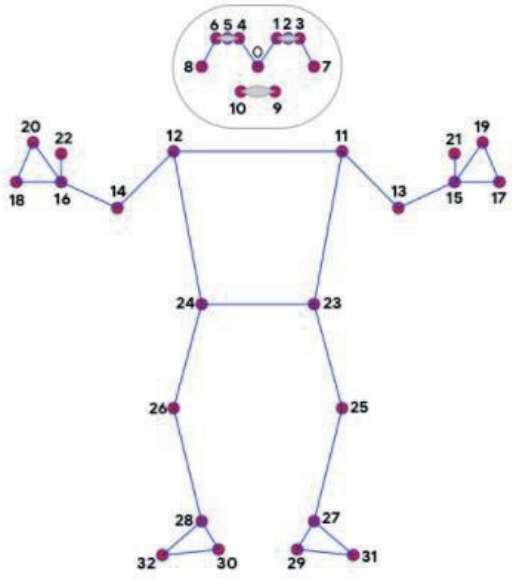


Figura 1 Puntos de referencia de cuerpo humano. Tomada de Google ML –"Pose detection"

ISSN en trámite

Para este proceso, la arquitectura general del sistema móvil propuesto se compone de 3 modulos principales: Consulta a base de datos, adquisición de datos y la validación de la ejecución del ejercicio fisioterapéutico, donde se denota la principal comparación entre la base de datos proporcionada al sistema y la adquisición de datos en tiempo real, la arquitectura del sistema se puede observar en la figura 2.

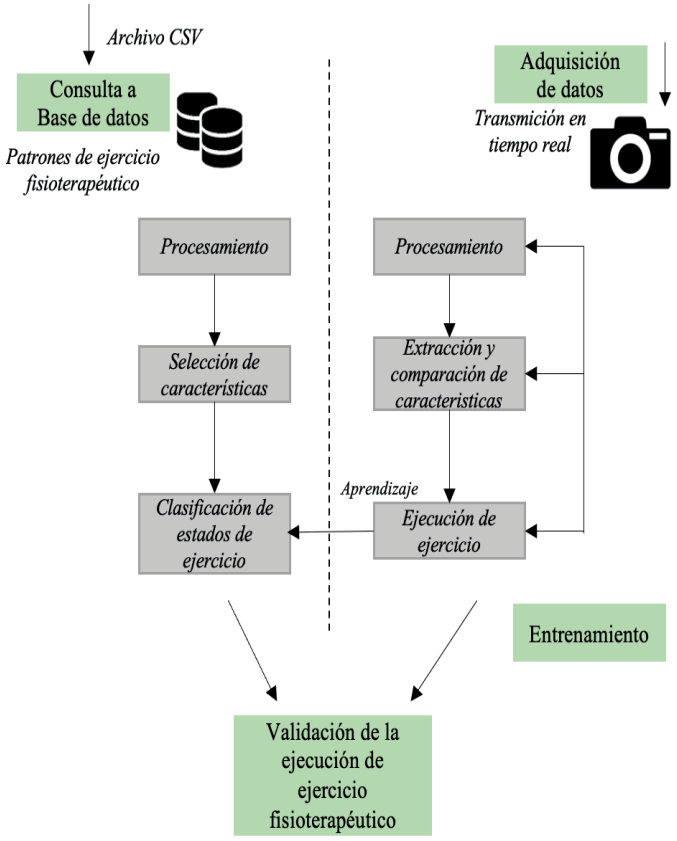


Figura 2 Arquitectura de sistema

3.2 Base de datos

Se recopilaron imágenes del ejercicio fisioterapéutico de varias fuentes libres, se eligieron alrededor de 200 imágenes desde diferentes ángulos de cámaras, diferentes formas corporales y algunas variaciones del ejercicio fisioterapéutico, donde el movimiento principal a detectar es cuando el paciente inhala y exhala, en la figura 1 se puede observar que la API no cuenta con un marcador en la parte del abdomen, por lo que se colocó la mano sobre el abdomen y se detecta el marcador de la mano para obtener la detección necesaria, y así de esta forma obtener el estado del ejercicio fisioterapéutico en inicio y fin, en la figura 3 se puede observar el ejercicio fisioterapéutico en estado inicial y final.

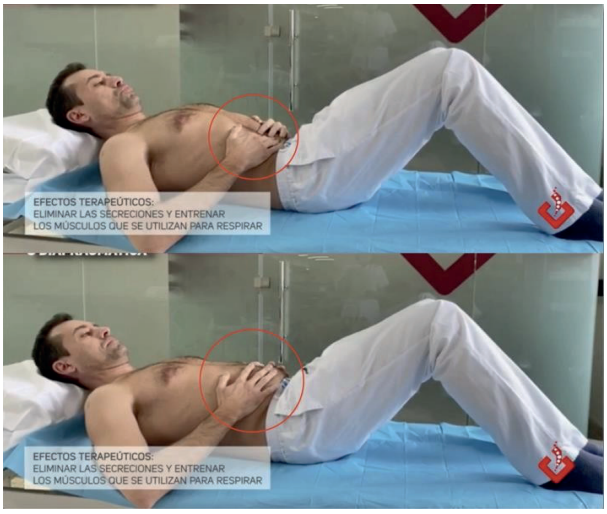


Figura 3 Respiración costal o diafragmática. Consultado en (FREMAP MUTUA COLABORADORA CON LA S. SOCIAL N. 61 2020)

Lo anterior produce un conjunto de puntos de referencia de patrones del ejercicio ha ser utilizados en el reconocimiento del movimiento. Para ello se utilizará el algoritmo k-NN (k vecinos), método de clasificación supervisada que requiere de una representación vectorial de cada imagen y una métrica para calcular la distancia entre dos marcadores, con la finalidad de encontrar el punto más cercano a la muestra que acabamos de obtener. En la tabla 1, se puede observar un fragmento de las muestras de imágenes convertidas en formato vectorial donde se destaca el movimiento “inhalar”.

Tabla 1 Fragmento de muestras de imágenes de movimiento “Inhalar” convertidas en representación vectorial

141.260 79	232.792 1	69.5142 4	121.435 94	227.876 37	75.8496 86	121.974 69	226.532 06	75.7949 7	122.450 58
141.414 69	233.304 29	52.324 68	122.425	227.889 82	59.0318 07	123.268 1	226.597 6	58.9880 1	124.049 88
139.498 34	230.822 63	53.3830 95	121.104 8	226.800 48	62.2857 86	121.899 97	225.674 04	62.2328 72	122.6317 7
138 .89 528	228 .28 894	69. 570 526	119 .99 029	224 .78 934	78. 863 235	120 .49 542	223 .77 527	78. 832 344	120. 942 825
141 .32 29	227 .68 561	47. 201 344	123 .07 505	223 .12 068	56. 379 486	123 .87 537	222 .00 407	56. 359 245	124. 610 214
140 .19 77	228 .15 65	60. 337 67	121 .08 342	224 .61 519	69. 811 49	121 .56 806	223 .49 977	69. 752 335	122. 000 626

 ISSN en trámite

3.3 Aplicación móvil

El prototipo de la aplicación móvil fue implementado en el entorno de desarrollo integrado Android Studio, el dispositivo móvil en el que se ejecutaron las pruebas fue de la compañía Motorola modelo e^6 play, el cual tiene las siguientes características: 2 gigabyte (GB) de memoria RAM, un procesador MT 6739, una pantalla de 5,5'' y 13 MP en la cámara y Android PIE 9.0. El primer paso para el desarrollo es la correcta identificación de los 33 puntos sobre el cuerpo humano mediante la cámara del dispositivo, los cuales se pueden observar en la figura 3 ya implementados en tiempo real en la aplicación móvil.

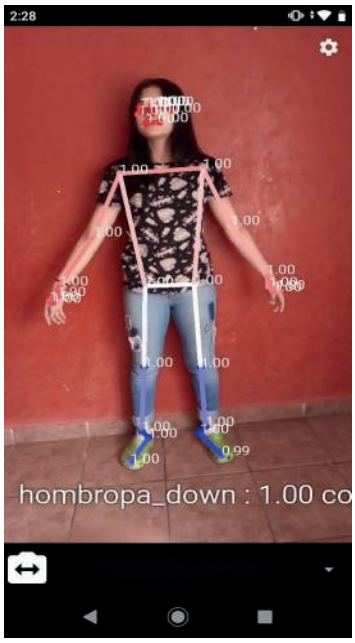


Figura 4 Vista de la interfaz móvil

4. RESULTADOS

Como se comentó anteriormente, el caso particular del estudio es la implementación del ejercicio "Respiración abdominal o diafragmática" para pacientes con EPOC, por lo tanto, una vez que se cumplió el desarrollo de la aplicación y se cargó a la base de datos las imágenes correspondientes para el aprendizaje del ejercicio, se procedió a la validación del mismo.

Para la validación de la correcta implementación y ejecución del ejercicio se realizó una prueba experimental con 10 usuarios tal como se muestra en la tabla 2, para verificar el correcto reconocimiento del ejercicio.

Tabla 2 Características demográficos de los usuarios participantes.

#	Edad	Género*
1	55	M
2	60	F
3	49	F
4	41	M
5	44	F
6	51	M
7	63	M
8	56	F
9	48	M
10	50	F

* M-Masculino, F-Femenino

Cada paciente realizó el siguiente procedimiento para la ejecución del ejercicio:

1. Acostarse boca arriba.
2. Colocarse ambas manos en el abdomen, debajo de lascostillas.
3. Inspirar (notar como se hunde el abdomen).
4. Espirar.

Los datos recabados de cada experimento en la realización y utilización de la aplicación se muestran en la tabla 3.

Tabla 3 Resultados de los experimentos de validación

#	# de repeticiones	Duración promedio de la inspiración	Duración promedio dela espiración	Duración del ejercicio completo
1	10	3 segundos	6 segundos	85 segundos
2	14	4 segundos	4 segundos	100 segundos
3	17	6 segundos	6 segundos	120 segundos
4	15	5 segundos	6 segundos	115 segundos
5	18	6 segundos	5 segundos	130 segundos
6	10	6 segundos	5 segundos	90 segundos
7	11	7 segundos	6 segundos	95 segundos
8	17	7 segundos	6 segundos	125 segundos
9	16	6 segundos	5 segundos	120 segundos
10	14	5 segundos	6 segundos	119 segundos

ISSN en trámite

Los resultados arrojaron una buena aceptabilidad de identificación de los marcadores que se ocuparon para identificar los principales movimientos que marcan el estado inicial y final del ejercicio. En la tabla 3 se puede observar que las personas que participaron en la validación del experimento tuvieron una correcta ejecución del ejercicio teniendo un tiempo promedio de 5.5 segundos para la inspiración y 5.5 segundos para la espiración, con un promedio de 14 repeticiones en un promedio de 109.9 segundos.

De acuerdo con las métricas del aprendizaje automático, nuestra investigación abarca las métricas del aprendizaje supervisado, el algoritmo k-NN funciona como clasificador de los estados de inicio y fin del ejercicio fisioterapéutico, en la tabla 4 se puede observar el promedió de confidencia de cada una de las clases del ejercicio.

Tabla 4 Promedio de confidencia de estados de ejercicio fisioterapéutico

#	Clase	Promedio de confidencia
1	INHALAR_UP	0.75
2	EXHALAR_DOWN	0.81

De acuerdo con lo anterior, se pudo observar en la validación experimental una detección no concreta de las clases a lo largo de la experimentación con los usuarios, existieron verdaderos positivos y falsos positivos, en la tabla 5 se puede observar el numero de detección de los verdaderos positivos y falsos positivos al momento de ejecutar y capturar el ejercicio, El total de repeticiones fueron 142 durante toda la validación experimental basandonos en la detección de la clase INHALAR_UP.

Tabla 5 Verdadero Positivo y Falso Positivo de Clase inhalar_up

# de usuario	Repeticiones de ejercicio	Verdadero Positivo (VP)	Falso Positivo (FP)
1	10	7	3
2	14	12	2
3	17	14	3
4	15	14	1
5	18	16	2
6	10	9	1
7	11	11	0
8	17	15	2
9	16	15	1
10	14	12	2
TOTAL	142	129	17

Con la ayuda de la fórmula de precisión (1), la cual es una métrica utilizada en la matriz de confusión, determinamos si el modelo implementado tiene una precisión al detectar cuando una persona inhala correctamente.

$$\frac{VP}{VP + FP} \qquad (1)$$

Donde:

VP= Verdaderos positivos, es decir cuando el ejercicio se ejecutó y capturo correctamente.

FP= Falso positivo, cuando el sistema valido la repetición como correcta pero no fue así.

Sustituyendo dichas variables para el cálculo de la precisión en dicha formula (2) el resultado que se obtuvo fue de una precisión del 0.88.

$$\frac{129}{129 + 17} = 0.88 \qquad (2)$$

5.CONCLUSIÓN

En este trabajo se propuso una alternativa para los pacientes y los sistemas de salud, que permitirá la supervisión remota de la ejecución de ejercicios de fisioterapia respiratoria, siendo una herramienta para el experto en salud para que este pueda ejecutar las rehabilitaciones de manera fácil y sencilla.

La implementación se realizó con la ayuda de la API Google ML y el IDE Android Studio para su desarrollo, utilizando la versión Android 9 pie. Se consideró como caso el ejercicio de "Respiración abdominal o diafragmática" para pacientes con EPOC, en su implementación, ya que este ejercicio permite eliminar las secreciones y entrenar los músculos para la respiración, siendo de vital importancia en pacientes con este padecimiento.

Los resultados de la validación experimental arrojaron una buena aceptabilidad ante el usuario final, de acuerdo con la formula de precisión proveniente de las métricas de la matriz de confusión, nos arrojó un resultado de 88% de precisión para la detección de la respiración diafragmática determinando que el modelo propuesto es robusto con posibilidad de mejorar.

El sistema es capaz de detectar la confidencia de cada una de las clases del estado del ejercicio, demostrando así junto con los resultados de precisión que la implementación móvil tiene potencial para servir como herramienta auxiliar para la rehabilitación respiratoria de personas que padecen EPOC.

ISSN en trámite

Actualmente, las tecnologías de la información están jugando un papel muy importante en el área médica, ya que tienen un impacto significativo en los avances médicos para la mejora en la atención a la salud. Gracias a las recientes investigaciones se puede concluir que existe una mejora significativa en la rehabilitación de personas que padecen enfermedades crónicas con el uso de la tecnología, ya que hacen la rehabilitación atractiva y muy accesible para las personas que la requieren.

Gracias a los recientes avances que actualmente han tenido las tecnologías de la información, como trabajo futuro se implementará este algoritmo a otros ejercicios en una aplicación móvil de tipo "mSalud" la cual servirá como herramienta auxiliar para que los especialistas en el área complementen los programas de rehabilitación para personas que padecen enfermedades pulmonares obstructivas crónicas, de igual manera se espera una mejora en la detección de verdaderos positivos para mejorar el porcentaje de confiabilidad, esto con el fin de que impacte de manera directa en la calidad de vida y reduzca los índices de mortalidad a causa de esta enfermedad.

6. AGRADECIMIENTOS

El autor principal agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por el apoyo a la investigación con número 2020-000026-02NACF-22190.

REFERENCIAS

K. R. Lorig, D. S. Sobel, A. L. Stewart, B. W. Brown, A. Bandura, P. Ritter, V. M. Gonzalez, D. D. Laurent, and H. R. Holman, "Evidence Suggesting That a Chronic Disease Self-Management Program Can Improve Health Status While Reducing

Pereira, M., Almeida, A.M. and Caixinha, H. (2016). *Exercit@rt mobile: Monitoring of pulmonar rehabilitation in COPD*. [online] IEEE Xplore. Available at: https://ieeexplore.ieee.org/document/7847771 [Accessed 13

Oct. 2021].

FREMAP MUTUA COLABORADORA CON LA S. SOCIAL

N. 61, (2020). Respiración abdominal o diafragmática. Ejercicios rehabilitación para personas afectadas por covid-19 [en línea]. *YouTube*. [Consultado el 13 de octubre de 2021].

Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=qIq47RNxV8Q

Martins, T., Carvalho, V. and Soares, F. (2020). Physioland – A serious game for physical rehabilitation of patients with neurological diseases. *Entertainment Computing*, 34, p.100356.

Tipprom, A., Soontornpipit, P., Sillabutra, J., Satitvipawee, P. and Viwatwongkasem, C. (2018). *Development of a Rehabilitation Monitoring System on Web-Based Application for Patients with Knee Pain*. [online] IEEE Xplore. Available at: https://ieeexplore.ieee.org/document/8712291 [Accessed 13Oct. 2021].

Organización Mundial de la Salud (2018). *Home*. [online] Who.int. Available at: https://www.who.int.

Google. (2021, 9 octubre). *Pose Detection | ML Kit |*. Google Developers. https://developers.google.com/ml-kit/vision/pose-detection

ISSN en trámite

Aceptación Tecnológica de la Realidad Aumentada como herramienta de capacitación en la operación básica de máquina cortadora láser

Iris Elizabeth Tarín Martínez *, Gregorio Ronquillo Máynez **,
Marisela Ivette Caldera Franco ***
Leonardo Nevárez Chávez **, Hernán De La Garza Gutiérrez *******

** Tecnológico Nacional de México/IT de Chihuahua II. Av. de las Industrias #11101, Complejo Industrial. Chihuahua, Chih. México, C.P. 31130. (correo M11550251@chihuahua2.tecnm.mx)*
***Tecnológico Nacional de México/IT de Chihuahua II. Av. de las Industrias #11101, Complejo Industrial. Chihuahua, Chih. México, C.P. 31130(correo gregorio.rm@chihuahua2.tecnm.mx)*
****Tecnológico Nacional de México/IT de Chihuahua II. Av. de las Industrias #11101, Complejo Industrial. Chihuahua, Chih. México, C.P. 31130(correo marisela.cf@chihuahua2.tecnm.mx)*
*****Tecnológico Nacional de México/IT de Chihuahua II. Av. de las Industrias #11101, Complejo Industrial. Chihuahua, Chih. México, C.P. 31130(correo leonardo.nc@chihuahua2.tecnm.mx)*
*****Tecnológico Nacional de México/IT de Chihuahua II. Av. de las Industrias #11101, Complejo Industrial. Chihuahua, Chih. México, C.P. 31130(correo hernan.gg@chihuahua2.tecnm.mx)*

Resumen: La tecnología crece a pasos agigantados, es parte fundamental de la vida cotidiana de las personas. Además, se ha integrado en el proceso de la educación, desde la planificación académica y la evaluación hasta el seguimiento de los estudiantes. La tecnología de Realidad Aumentada (RA) juega un papel muy importante en la educación ya que aporta interactividad en el aprendizaje de los alumnos y esto ayuda a la rápida asimilación en los procedimientos de formación y el incremento de la motivación por aprender. El presente trabajo es un estudio de caso de la aceptación de un software de RA por parte de los posibles usuarios. Este software de RA está diseñado para proporcionar la capacitación inicial en el uso de una máquina cortadora láser en el Laboratorio de Prototipos del Tecnológico de Monterrey Campus Chihuahua. Se diseño una encuesta basada en modelos de aceptación y uso de tecnología, la cual se aplicó a estudiantes que acudieron a la capacitación y aceptaron participar en el estudio. Los resultados de la evaluación del software permitirán obtener retroalimentación para el mejoramiento de su diseño como parte del proceso de Ingeniería de Software.

Palabras clave: Realidad aumentada, tecnologías aplicadas a la educación, aceptación tecnológica, TAM, UTAUT2.

Abstract: Technology grows by leaps and bounds, it's a fundamental part of people's daily lives. In addition, it has been integrated into the education process, from academic planning and evaluation to student follow-up. Augmented Reality (AR) technology plays a very important role in education since it provides interactivity in the learning of students and this helps to quickly assimilate in the training procedures and increase the motivation to learn. This paper is a case study of the acceptance of AR software by potential users. This AR software is designed to provide initial training in the use of a laser cutting machine at the Monterrey Campus Chihuahua Technology Prototype Laboratory. A survey based on technology acceptance and use models was designed and applied to students who attended the training and agreed to participate in the study. The results of the evaluation of the software will allow to obtain feedback for the improvement of its design as part of the process of Software Engineering

Keywords: Augmented reality, technologies applied to education, technological acceptance, TAM, UTAUT2.

ISSN en trámite

1. INTRODUCCIÓN

La tecnología crece a pasos agigantados, es parte fundamental de la vida cotidiana de las personas. Además, se ha integrado en el proceso de la educación, desde la planificación académica y la evaluación hasta el seguimiento de los estudiantes. Proporciona muchos beneficios que ayudan a aumentar la eficiencia y la productividad educativa.

La Realidad Aumentada (RA) es una tecnología que ha despertado mucho interés en los últimos años, actualmente está al alcance de cualquier persona ya que hoy en día se puede utilizar en teléfonos inteligentes ("smartphones") de uso cotidiano. Esta tecnología combina objetos reales y virtuales, es interactiva en tiempo real, es decir, incluye elementos virtuales superpuestos a la imagen del entorno en tiempo real, tomada por la cámara (Heras, 2004).

Cañellas y Matos (2017) mencionan que la RA hace un gran cambio en la enseñanza ya que "Facilita a los alumnos las habilidades asociadas a tareas como explorar, comunicar, analizar, interpretar y resolver problemas". Además, la conexión emocional que ofrece una experiencia inmersiva vivida en primera persona, aumenta la motivación y aporta un mayor impacto en los procesos de aprendizaje.

La rápida incorporación de la RA durante el aprendizaje hace que las investigaciones sobre su uso didáctico se encuentren en un estado inicial, por lo que es necesario realizar estudios que faciliten su incorporación en la educación, con el fin de crear contextos de aprendizaje de calidad que extraigan el máximo rendimiento a esta tecnología (Fernández, 2017).

Por otro lado, la Ingeniería de Software considera la realización de pruebas de diferentes tipos, entre las cuales están las Pruebas de Aceptación que consisten en la validación por parte de los usuarios o beneficiarios de un software (Pressman, 2010; Sommerville, 2011).

La ingeniería de Software incluye técnicas que apoyan la especificación, el diseño y la evolución del programa (Sommerville, 2011).

En la Ingeniería del Software la usabilidad busca la forma de tener un diseño que sea fácil de usar y que sea lo más intuitivo posible y el diseño va evolucionando según la interacción de los usuarios con el software (Pressman R. , 2010).

En el presente trabajo se han tomado como base dos modelos para evaluar la Aceptación Tecnológica., que son: el Modelo de Aceptación Tecnológica (conocido por sus siglas en inglés TAM, Technology Acceptance Model) (Davis, 1985), y la Teoría Unificada de Aceptación y Uso de la Tecnología Extendida (por sus siglas en inglés UTAUT 2, Unified Theory of Acceptance and Use of Technology Extend) (Venkatesh, Thong, & Xu, 2012).

El propósito principal del TAM es predecir la aceptabilidad de una tecnología en específico e identificar las modificaciones que deban aplicarse para que esta sea aceptable por los usuarios. Este modelo explica el proceso de adaptación por medio de distintas variables que llevan al usuario a aceptar o rechazar un determinado sistema de información (Sánchez, Olmos, & García, 2015).

Las variables que incluye el TAM son: la "utilidad percibida" que describe el grado en que una persona considera que el uso de un sistema en específico, garantizará una mejoría en el desempeño de sus actividades (Puello, Del Campo, & Scholborgh, 2020), la "facilidad de uso" muestra el grado en que una persona considera fácil de usar un sistema de información en particular, con lo cual realizará menos esfuerzo para hacer sus actividades (Puello, Del Campo, & Scholborgh, 2020), la "actitud hacia el uso" que se refiere al grado de afectación evaluativa de un individuo hacia el comportamiento objetivo (Davis, 1985). La "intensión de uso" se utilizaría en un momento en el que los usuarios no utilizan de manera cotidiana el software y se propone la adopción de su uso.

La Teoría Unificada de Aceptación y Uso de la Tecnología Extendida (por sus siglas en ingles UTAUT2, Unified Theory of Acceptance and Use of Technology Extend), se basa en una recopilación de varios modelos que evalúan la aceptación y uso de la tecnología, entre los cuales está el TAM. UTAUT 2 incluye las variables: desempeño, expectativa de esfuerzo, influencia social, condiciones facilitadoras, el precio que con lleva usar el software, la motivación hedónica y las variables de diferencia individual, las cuales son la edad, el género y la experiencia (Venkatesh, Thong, & Xu, 2012). En el TAM se buscó reducir las variables a considerar en el modelo y UTAUT 2 trato de incorporar más variables al modelo, que también se habían contemplado en el TAM. y agregó la "motivación hedónica" que se considera importante para software que no es de uso obligatorios.

La "motivación hedónica" se define como la diversión o el placer derivado del uso de una tecnología, y se ha demostrado que juega un papel importante en la determinación de la aceptación y el uso de la tecnología (Brown & Venkatesh, 2005).

El presente trabajo propone incluir las variables definidas en los modelos de Aceptación Tecnológica para evaluar la percepción de los posibles usuarios de una aplicación de Realidad Aumentada desarrollada para apoyar el proceso de capacitación de estudiantes en la operación básica de una máquina cortadora láser dentro del Laboratorio de Prototipos del Tecnológico de Monterrey Campus Chihuahua. Dicha aplicación de RA se titula como "Manual operativo de RA para el uso de máquina laser LZ1325-130" (Figura 1). Por lo que se trata de un estudio de caso en el que se incluyen variables propuestas en el TAM y el UTAUT 2 para obtener una evaluación cuantitativa de los factores (variables) relevantes en la aceptación de dicho software por parte de los usuarios como parte del proceso de Ingeniería de Software en las Pruebas de Aceptación para proporcionar

ISSN en trámite

retroalimentación y permita detectar áreas de oportunidad de mejora en su diseño que influyan en la aceptación de los usuarios hacia el uso del software.



Fig. 1. Manual operativo de RA para el uso de máquina laser LZ1325-130.

La evaluación de la Aceptación Tecnológica se realizó por medio de encuestas para interpretar la satisfacción de los estudiantes al usar la aplicación de RA antes mencionada. Además, para complementar el trabajo se agregó a la encuesta una variable de la Teoría Unificada de Aceptación y Uso de la Tecnología Extendida (UTAUT2), el cual explica que el comportamiento de un individuo de usar una tecnología está influenciado por la "motivación hedónica" (Venkatesh, Thong, & Xu, 2012).

Los resultados de la evaluación de la percepción que tienen los usuarios de la aplicación de RA proporcionarán retroalimentación para la mejora en el diseño, es decir tienen una aplicación practica como apoyo al proceso de Ingeniería de Software.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Determinar el grado de aceptación para el uso de la aplicación ""Manual operativo de RA para el uso de máquina laser LZ1325-130"" para la capacitación inicial en el uso de una máquina cortadora láser en el Laboratorio de Prototipos del ITESM Campus Chihuahua, considerando los factores: "utilidad percibida", "facilidad de uso", "actitud hacia el uso", "motivación hedónica" e "intensión de uso" para identificar áreas de mejora en el diseño.

2.2 Objetivos Específicos

Describir la evaluación de "Utilidad Percibida" según los usuarios de la aplicación "Manual operativo de RA para el uso de máquina laser LZ1325-130".

Describir la evaluación de "Facilidad de Uso" según los usuarios de la aplicación "Manual operativo de RA para el uso de máquina laser LZ1325-130".

Describir la evaluación de "Actitud" según los usuarios de la aplicación "Manual operativo de RA para el uso de máquina laser LZ1325-130".

Describir la evaluación de "Motivación Hedónica" según los usuarios de la aplicación "Manual operativo de RA para el uso de máquina laser LZ1325-130".

Describir la evaluación de "Intención de Uso" según los usuarios de la aplicación "Manual operativo de RA para el uso de máquina laser LZ1325-130".

Identificar áreas de oportunidad para la aceptación de la aplicación de Realidad Aumentada en la capacitación inicial del manejo de la máquina cortadora láser.

3. METODOLOGÍA

El presente trabajo es un estudio de caso, no experimental debido a que las variables no se manipulan intencionalmente para variar los resultados, transversal ya que la aplicación de las encuestas se realizó en una ocasión y su alcance es descriptivo porque el propósito es obtener la evaluación de la percepción de los posibles usuarios del Manual operativo de RA para apoyar el proceso de desarrollo de la aplicación identificando áreas de mejora en su diseño, por lo que las correlaciones entre variables están fuera del alcance de este estudio.

A partir de los modelos TAM (Davis, 1985) y UTAUT2 (Venkatesh, Thong, & Xu, 2012)) se diseñó un cuestionario que contempla las variables: "Utilidad Percibida" (UP), "Facilidad de Uso" (FU), "Actitud" (AC), "Motivación Hedónica" (MH) e "Intención de Uso" (IU) (Tabla 1) para evaluar la aceptación de los usuarios hacia la aplicación "Manual operativo de RA para el uso de máquina laser LZ1325-130". En la tabla 1 se detallan las afirmaciones del cuestionario para cada una de las variables. Cada afirmación del cuestionario es evaluada con una escala Likert de 1 a 5 (tabla 2).

Tabla 1. Encuesta para la evaluación de la aceptación tecnológica de aplicación del Manual de RA.

Variable	Clave	Item
Utilidad Percibida (UP)	UP1	La utilización del Manual de RA me facilitaría la operación de la cortadora láser.
	UP2	El Manual de RA es útil cuando se está aprendiendo en el laboratorio.
	UP3	Con la utilización de la tecnología de RA puede mejorar mi desempeño dentro del laboratorio de prototipos.
	UP4	En general considero que la tecnología de RA puede ser útil en el manejo de equipo industrial.
	UP5	La implementación del Manual de RA representa para mí una mejoría en el manejo del equipo del laboratorio.

ISSN en trámite

Facilidad de Uso (FU)	FU1	Será fácil utilizar el Manual de RA para la operación de la cortadora láser.
	FU2	Necesitaré ayuda para utilizar la aplicación.
	FU3	Me adaptaré fácilmente a la tecnología de RA para la utilización del equipo.
	FU4	Mi interacción con el Manual de RA será claro y comprensible.
Actitud (AC)	AC1	El uso del Manual de RA hace que la capacitación sea más interesante.
	AC2	Creo que el uso de la de tecnología de RA en el laboratorio es una buena idea.
	AC3	Aprendiendo a través de la tecnología de RA me parece aburrido.
Motivación Hedónica (MH)	MH1	Usar el Manual de RA es entretenido.
	MH2	Será favorable para mi utilizar el Manual de RA.
	MH3	Usar el Manual de RA es divertido.
Intención de Uso (IU)	IU1	Tengo la intención de utilizar el Manual de RA en el futuro.
	IU2	Se debería utilizar el Manual de RA para aprender la operación de la cortadora láser.
	IU3	Me gustaría utilizar la tecnología de RA en otros equipos del laboratorio.

Tabla 2. Respuestas en escala de Likert.

Respuesta	Valor
Totalmente de acuerdo	5
De acuerdo	4
Ni de acuerdo ni en desacuerdo	3
En desacuerdo	2
Totalmente en desacuerdo	1

Como un grupo de enfoque ("focus group"), se invitó a participar en el estudio a 20 estudiantes que asistieron a la capacitación para la operación básica de la máquina cortadora láser en el Laboratorio de Prototipos del Tecnológico de Monterrey Campus Chihuahua. A cada uno se le explicaron las características y el funcionamiento de la aplicación antes de usarla, y se les proporcionó el enlace al cuestionario en línea para que lo contestaran. Se obtuvo respuesta de 16 participantes.

4. RESULTADOS

Se promediaron las respuestas de las afirmaciones correspondientes a cada variable para obtener una puntuación en cada una (Tabla 3). Todas las variables tuvieron una evaluación alta o positiva, en la escala de 1 a 5, siendo "Utilidad Percibida" la más alta con 4.75 y "Facilidad de Uso" la más baja con un 4.2 de promedio. La "Actitud" y la "Motivación Hedónica" tuvieron una puntuación similar 4.46 y 4.45 respectivamente. Finalmente, la "Intensión de Uso" tuvo un promedio de 4.67, siendo la segunda puntuación más alta.

Tabla 3. Promedio obtenido por cada variable.

Variable	Promedio
Utilidad Percibida	4.75
Facilidad de Uso	4.2
Actitud	4.46
Motivación Hedónica	4.45
Intención de Uso	4.67

Como podemos ver en la figura 2, el porcentaje obtenido de la Utilidad Percibida es de un 95%, es decir, la mayoría de los usuarios expresan que, utilizando la aplicación de RA, su desempeño en el uso de la máquina cortadora láser mejorará significativamente. Cabe mencionar que ninguno de los encuestados expresó estar en desacuerdo (valor de 2 en la escala) o totalmente en desacuerdo (valor de 1 en la escala) con los ítems de la UP.

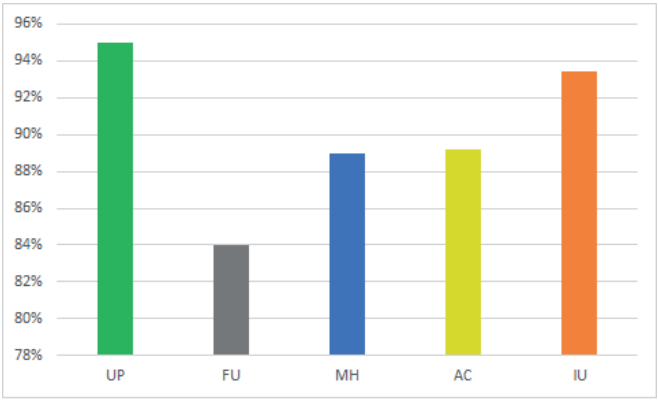


Fig. 2. Resultados de la encuesta.

ISSN en trámite

En cuanto a la "facilidad de uso" el 84% de los usuarios están totalmente de acuerdo (valor de 5 en la escala) y de acuerdo (valor de 4 en la escala) en que se les facilitará el uso del Manual de RA para la operación del equipo. Mientras que el otro 16% de los encuestados se encuentran en una posición neutral, dicho de otra manera, estos usuarios seleccionaron la opción de "ni de acuerdo ni en desacuerdo".

Según los resultados obtenidos en la encuesta el 89% de los encuestados muestran buena actitud, les parece interesante y buena idea usar la tecnología de RA para el manejo de la máquina dentro del laboratorio. Un 10% de los usuarios parecen estar "ni de acuerdo ni en desacuerdo" (valor de 3 en la escala) con la idea de utilizar la RA como herramienta de capacitación y por otro lado solamente a un usuario le parece aburrido utilizar la aplicación de Realidad Aumentada.

En la motivación hedónica el 89% de los encuestados parecen estar totalmente de acuerdo en que será más divertido aprender a usar la cortadora láser por medio de la aplicación de RA, además, perciben la tecnología como agradable, estos usuarios tienen más probabilidades de tener la intención de usar el Manual de RA para el uso de la máquina. El otro 11% de los usuarios se mantienen en una posición neutral (valor 3 de la escala)..

La mayoría de los usuarios tienen intención de usar la aplicación de RA sobre la máquina de cortadora láser, ya que el 95% indicó estar totalmente de acuerdo (valor 5 en la escala de 1 a 5) con la "intención de uso" mientras que el 5% restante seleccionaron estar de acuerdo (valor de 4 en la escala de 1 a 5) en usar el Manual para la capacitación, además comentaron que les gustaría utilizar la tecnología en más equipos del laboratorio.

5. CONCLUSIÓN

En este caso de estudio donde se aplicó un instrumento de medición basado en los modelos de Aceptación Tecnológica como parte del proceso de desarrollo para obtener retroalimentación de los posibles usuarios del software de RA, "Manual operativo de RA para el uso de máquina laser LZ1325-130" se puede concluir según los resultados obtenidos que la implementación de esta aplicación de RA sería bien recibida por los estudiantes debido a que la evaluación general con la media de todas las variables fue alta, con un valor de 4.5 en una escala de 1 a 5, y por lo tanto la hipótesis de trabajo se acepta.

Sin embargo, la percepción de la Facilidad de Uso de la aplicación de RA, obtuvo la media más baja quizás debido a la falta de experiencia en el uso de la tecnología de Realidad Aumentada. Por lo que un área de oportunidad sería verificar el diseño de la aplicación para que sea más intuitivo y en encuestas futuras verificar si con mayor experiencia en el uso de la Realidad Aumentada la evaluación de la "Facilidad de Uso" aumenta.

Es importante destacar que los estudiantes que participaron en el estudio manifestaron estar interesados en que se utilicen aplicaciones de RA para la capacitación de otros equipos en el laboratorio.

6. REFERENCIAS

Brown, S. A., & Venkatesh, V. (2005). Model of Adoption of Technology in Households: A Baseline Model Test and Extension Incorporating Household Life Cycle. *MIS Quarterly*, 399-426.

Cabero, J., Leiva, J., Moreno, N., Barroso, J., & López, E. (2016). Realidad aumentada y educación. Innovación en contextos formativos. *Barcelona: Octaedro, S.L.*

Cañellas, A., & Matos, J. (2017, Diciembre 4). El impacto de la realidad virtual en la nueva educación. *El Periódico Barcelona*, pp. 2-4.

Davis, F. (1985). A technology acceptance model for empirically testing new end-user information systems: theory and results. *Massachusetts: Massachusetts Intitude of Technology.*

Fernández, B. (2017). Aplicación del modelo de aceptación tecnológica (tam) al uso de la realidad aumentada en estudios universitarios. *UCOPress, 275.*

Heras, L. (2004). La realidad aumentada: una tecnología en espera de usuarios. *Revista Digital Universitaria*, 9.

Innovae. (2020). Retrieved from Innovae Group S.L.: https://www.innovae.eu/la-realidad-aumentada/

Pressman, R. (2010). Ingeniería del Software. Un enfoque práctico. *McGraw-Hill.*

Puello, P., Del Campo, V., & Scholborgh, F. (2020). Modelo de Aceptación Tecnológica (TAM) en el Laboratorio de Física III basado en Internet de las Cosas en el Programa de Ingeniería de Sistemas de la Universidad de Cartagena, Colombia. *Revista Espacios*, 13.

Rigueros, C. (2017). La realidad aumentada: lo que debemos conocer. *Universidad Distrital Francisco José de Caldas*, 257-261.

Ruíz, I., Huerta, M., Mota, J., Dodero, J., & Barbosa, I. (2016). Herramienta de autoría con realidad aumentada para la creación de manuales interactivos. *Congreso Universitario de innovación Educativa en las Enseñanzas Técnicas*.

Sánchez, J. C., Olmos, S., & García, F. J. (2015). Evaluación de la aceptación de las tecnologías móviles en los estudiantes del grado de maestro. *Instituto Universitario de Ciencias de la Educación, Grupo de Investigación Grial.*, 9-11.

Sommerville, I. (2011). Ingeniería de Software. *Pearson Eeducación.*

Sutherland, I. E. (1968). A head-mounted three dimensional display. *New York.*

Venkatesh, V., Thong, J. Y., & Xu, X. (2012). Consumer acceptance and use of information technology: extending the unified theory of acceptance and use of technology1. *Mis Quarterly*, 157-178.

ISSN en trámite

Identificación de Fármacos Mediante Técnicas de Visión e Inteligencia Artificial

Vásquez L. Raúl[*, 1] Medrano H. Jesús Alfonso[*, 2] Ramírez Q. Juan Alberto[*, 3] Ponce Ricardo[*, 4]

** Instituto Tecnológico de Chihuahua – División de Estudios de Posgrado e Investigación*
(e-mail: {m20061550[1], jesus.mh[2], juan.rq[3], ricardo.lp[4]}@chihuahua.tecnm.mx).

Resumen: En el presente trabajo, mediante el uso de técnicas de visión e inteligencia artificial, se desarrolla un algoritmo capaz de detectar, clasificar y localizar diversos fármacos con alto nivel de eficiencia. Para realizar la detección de los medicamentos, en una primera etapa, se realiza el procesamiento de las imágenes, para después utilizar *machine learning* y clasificar los fármacos de manera adecuada. Donde finalmente al ser clasificados se obtiene su ubicación cartesianamente.

Palabras Clave: Visión Artificial, Procesamiento de imágenes, Machine Learning.

1. INTRODUCCIÓN

El campo de visión artificial genera conocimiento y desarrolla algoritmos con la intención de que una máquina imite el proceso de visión humana (Chacón (2007), Larcher et al. (2011)); donde tradicionalmente se utilizan cuatro fases de desarrollo (ver Fig. 1).

- *Fase sensorial*. Se adquieren las imágenes digitales mediante cualquier tipo de sensor (cámaras digitales, infrarrojas, térmicas, etc.).
- *Fase de preprocesamiento*. Se adecua la imagen lo mejor posible para su posterior interpretación.
- *Fase de segmentación*. Se ubican los objetos de interés.
- *Fase de reconocimiento*. Se analiza la información y clasifica los objetos segmentados.

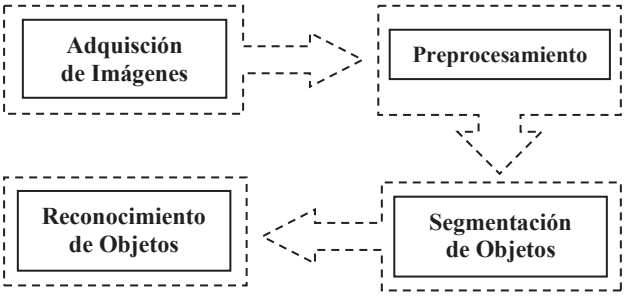


Fig. 1. Enfoque tradicional del procesamiento digital de imágenes.

Por su parte, en las últimas décadas se ha popularizado el uso de técnicas de machine learning para la clasificación de datos y/o objetos (Sen (2020)). Una técnica popular para la clasificación de objetos son las máquinas de vector de soporte (SVM, por sus siglas en inglés), las cuales utilizan los datos (o también llamados vectores de soporte) qué definen un umbral entre una clase u otra (Haykin (2008)).

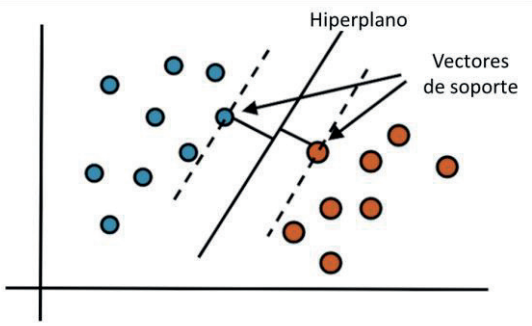


Fig. 2. Clasificador de clases utilizando SVM.

En la Fig. 2 se aprecian dos clases separadas por un hiperplano, dicho hiperplano es determinado por el algoritmo de máquinas de vectores de soporte, donde si la aplicación es un separador binario, el hiperplano se representa mediante (1).

$$g(x) = w^T x + b \;\leftrightarrow\; g(x) = 0 \qquad (1)$$

Donde x representa los patrones de entrada, w los pesos del sistema y b es el *bias*. La determinación de los pesos se obtiene al minimizar la función de costo descrita en (2) con base a los pesos del sistema.

$$J(w, b, \propto) = \frac{1}{2} w^T w - \sum_{i=1}^{N} \lambda_i \left[d_i (w^T x_i + b) - 1 \right] \qquad (2)$$

Donde λ_i representan los diversos multiplicadores de Lagrange.

El artículo propuesto diseña un algoritmo de visión e inteligencia artificial que sea capaz de reconocer medicamentos disponibles en un ambiente controlado, específicamente identificar pastillas, cápsulas y tabletas. A través de una etapa de segmentación por

ISSN en trámite

umbralización local adaptable, se resaltan los objetos de interés y con ello se obtienen sus características más relevantes. Posteriormente, utilizando máquinas de vectores de soporte se clasifican los fármacos correspondientes; una vez clasificados, se calculan sus ubicaciones a través de un factor de calibración basado en las dimensiones de la imagen.

La distribución de este trabajo se realiza de la siguiente forma: la Sección 1 menciona una breve descripción sobre el desarrollo del algoritmo; la Sección 2 habla sobre trabajos relacionados a la medicina mediante inteligencia artificial; la Sección 3 comenta sobre el desarrollo del algoritmo de manera detallada, la Sección 4 describe el rendimiento y resultados del algoritmo. Finalmente, la Sección V menciona las conclusiones y trabajos a futuro.

2. ANTECEDENTES

El uso de inteligencia artificial en el campo de la medicina es un tema relevante en los últimos años, en el cual se desarrollan un sinfín de aplicaciones recientemente, donde algunas propuestas relevantes se presentan a continuación.

En (Esteva et al. (2021)) los autores hablan sobre diversos campos en la medicina impulsados mediante la inteligencia artificial, ellos incluyen cardiología, dermatología, etc. Además, el uso del aprendizaje profundo mediante redes convolucionales son una solución viable cuando se realiza el procesamiento de imágenes médicas.

En (Xia et al. (2019)) se desarrolla un sistema de reconocimiento de medicamentos para máquinas expendedoras. El sistema reconoce la región de texto del medicamento utilizando SVM y componentes conectados; posteriormente procede a la segmentación del texto a través del método *fragment link*; y finalmente utiliza el software de reconocimiento óptico de caracteres (OCR, por sus siglas en inglés) para reconocer el nombre del medicamento.

En (Hnoohom et al. (2018)) los autores presentan el diseño de una aplicación de teléfono inteligente capaz de identificar de manera automática distintos fármacos utilizando la arquitectura de aprendizaje profundo *Inception-V3*, obteniendo un 92.75% de precisión. Las pruebas de uso real demostraron que el modelo de red neuronal propuesto podía identificar correctamente el medicamento indicado en los datos de entrenamiento.

En (Shinde et al. (2020)) se presenta un trabajo de investigación enfocado en la detección de medicamentos falsificados a través de sus firmas hiperespectrales. El sistema implementado utiliza las firmas hiperespectrales de los medicamentos originales y falsificados para entrenar un modelo de aprendizaje automático basado en perceptrón multicapa para reconocer la autenticidad del medicamento. El modelo propuesto logra una media superior al 90% de precisión en la clasificación de los medicamentos.

3. DESARROLLO

3.1 Construcción de base de datos

Antes de realizar el procesamiento de imágenes y de comenzar con los clasificadores, es necesario contar con muestras significativas para el entrenamiento del SVM. Para realizar lo anterior, se tomaron diferentes imágenes que contienen fármacos distintos, todo ello en un ambiente controlado. En las imágenes se distribuyeron pastillas, cápsulas y tabletas con orientaciones y posiciones aleatorias. En la Fig. 3 se visualiza un ejemplo de las imágenes adquiridas.



Fig. 3. Ejemplo de imagen de base de datos.

El campo visual del ambiente controlado corresponde a un espacio rectangular de 42.19 x 56.25 cm, mientras que las dimensiones de las imágenes capturada son 1200 x 1600 pixeles; por lo que el factor de calibración (FC) corresponde a (3).

$$FC = \frac{Dimensiones\ de\ la\ imagen\ en\ \ cm.}{Dimensiónes\ de\ la\ imagen\ en\ pixeles} \qquad (3)$$

Para la aplicación propuesta, el resultado del factor de calibración corresponde a 0.0352 cm/pixel.

3.2 Preprocesamiento y segmentación

En el campo del procesamiento de imágenes, en ocasiones es necesario un preprocesamiento de la imagen para mejorar la representación de sus características (González y Woods (2018)). La segmentación es una herramienta que separa los objetos o escenas de interés del resto de la imagen, lo cual incluye la detección de bordes, ubicación de regiones, dividir líneas o curvas, etc. Es decir, el segmentar una imagen es clasificar cada pixel de la imagen en diferentes clases de tal manera que se destaquen las regiones u objetos de interés (Palomino y Concha (2009)).

Existen diferentes métodos para la segmentación de una imagen (Palomino y Concha (2009)). Sin embargo, la media de

ISSN en trámite

intensidad de pixeles suele ser una herramienta eficaz para la segmentación. Es decir, al encontrar el valor medio de intensidad de los pixeles, se aplica la umbralización local para lograr la segmentación de la imagen correspondiente (González y Woods (2018)). En el algoritmo propuesto se aplica dicha técnica para obtener las imágenes binarias deseadas.

Teniendo en cuenta las imágenes binarias, se procede a eliminar todos los componentes con menos de 2000 píxeles conectados. Donde es importante resaltar que sólo se toma en consideración el canal R del espacio de color RGB de las imágenes originales. Todo esto con el fin de simplificar el procesamiento de las imágenes en las etapas siguientes. En la Fig. 4 se muestra el resultado del preprocesamiento de una imagen de la base de datos, donde se aprecia la segmentación de los objetos de interés.

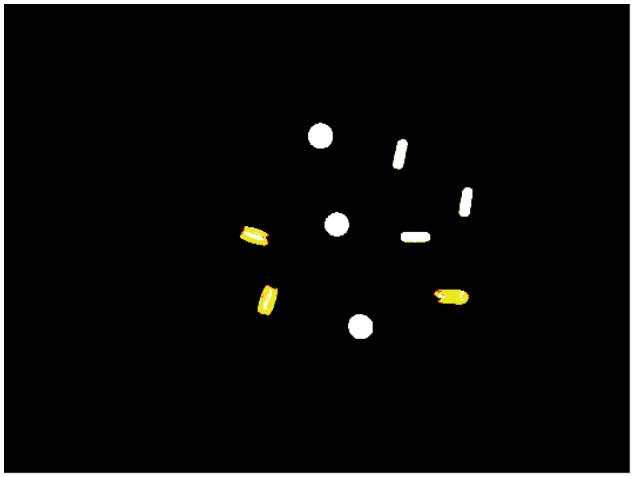


Fig. 4. Segmentación de los objetos de interés.

3.3 Extracción de características

En la etapa de extracción de características se procede a encontrar las partes más significativas de un objeto en la imagen (Theodoridis y Koutrombas (2003)), en el algoritmo propuesto resaltan para la extracción de características el área, redondez y solidez de los fármacos a clasificar. Para el cálculo del área, redondez y solidez se aplican (4), (5) y (6) respectivamente. Al haber calculado las características descritas anteriormente, se obtiene un vector de características compuesto por 3 elementos que permitan el desarrollo de un clasificador óptimo.

$$Área = Número\ de\ pixeles\ de\ la\ región \quad (4)$$

$$Redondez = \frac{4 * Área * \pi}{Perímetro^2} \quad (5)$$

$$Solidez = \frac{Área}{Área\ Convexa} \quad (6)$$

Con el fin de analizar el potencial de las características extraídas para clasificar los medicamentos en pastillas, cápsulas o tabletas, se calcula la matriz de correlación de éstas. En la Tabla 1 se muestra la matriz de correlación de las características obtenidas de los medicamentos, siendo el área y la solidez las características que tienen un menor grado de correlación entre ellas (0.3970); por su parte, la redondez y solidez cuentan con un mayor grado de correlación (0.7917). A partir del análisis implementado, se prosigue con la utilización de dichas propiedades descriptivas para el diseño un clasificador binario basado en SVM.

Tabla 1. Matriz de Correlación de Características

Características	Área	Redondez	Solidez
Área	1	0.7613	0.3970
Redondez	0.7613	1	0.7917
Solidez	0.3970	0.7917	1

3.4 Clasificación

La clasificación de los diversos fármacos en el presente trabajo se realiza utilizando SVM, el cual es un clasificador supervisado binario descrito por una función discriminante lineal (*LDA*, por sus siglas en inglés) descrita por (1). Considerando que las clases son linealmente separables, es necesario definir los pesos $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_l)$ a través de la ecuación dada por (7) (Theodoridis y Koutrombas (2003), Han, et al. (2018)):

$$\omega = \sum_{i=1}^{q} \lambda_i y_i x_i \quad (7)$$

Donde λ_i son los multiplicadores de Lagrange, y_i las etiquetas, x_i el vector de características y q la cantidad de vectores de soporte.

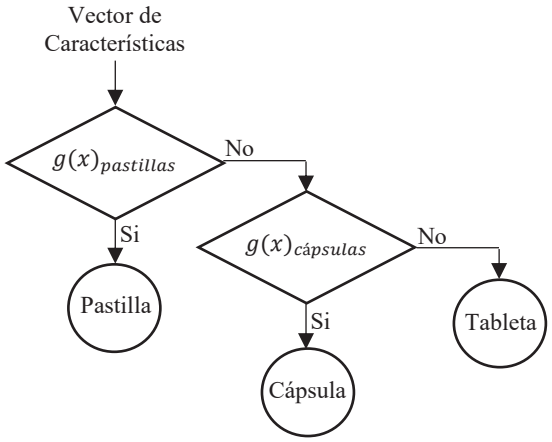


Fig. 5. Diagrama de flujo de clasificación de medicamentos.

El clasificador debe de ser capaz de identificar los tres tipos de medicamentos, por lo que es necesario diseñar dos SVM de clasificación binaria; para esto, se implementa uno para reconocer pastillas ($g(x)_{pastillas}$), y otro para reconocer cápsulas ($g(x)_{cápsulas}$). De esta manera el algoritmo recibe de entrada el vector de características de un medicamento a clasificar, pasa a través de $g(x)_{pastillas}$ para reconocer si es pastilla u otro tipo de

ISSN en trámite

medicamento, y después por $g(x)_{cápsulas}$ para reconocer si es cápsula o lo clasifica como tableta. Este proceso se muestra de manera gráfica en la Fig. 5.

El análisis del entrenamiento y prueba de ambos clasificadores, da como resultado las siguientes funciones discriminantes lineales que definen sus respectivos hiperplanos (8-9).

$$g(x)_{pastillas} = 0.0095x_1 + 1.2332x_2 + 0.0878x_3 - 30.8028 \quad (8)$$

$$g(x)_{capsulas} = -0.0158x_1 + 0.4259x_2 + 0.1659x_3 + 36.4810 \quad (9)$$

En las Fig. 6 y 7 se aprecian los resultados del entrenamiento y prueba del clasificador de pastillas respectivamente, donde los puntos amarillos corresponden a los elementos clasificados como pastillas y los elementos azules clasificados como otro tipo de medicamento; mientras que las Fig. 8 y 9 lo hacen con el clasificador de cápsulas, donde los puntos amarillos corresponden a los elementos clasificados como cápsulas y los elementos azules clasificados como otro tipo de medicamento.

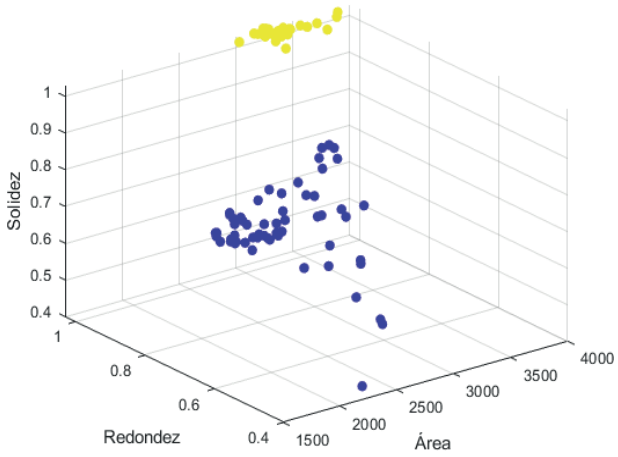


Fig. 6. Resultados del entrenamiento detección de pastillas.

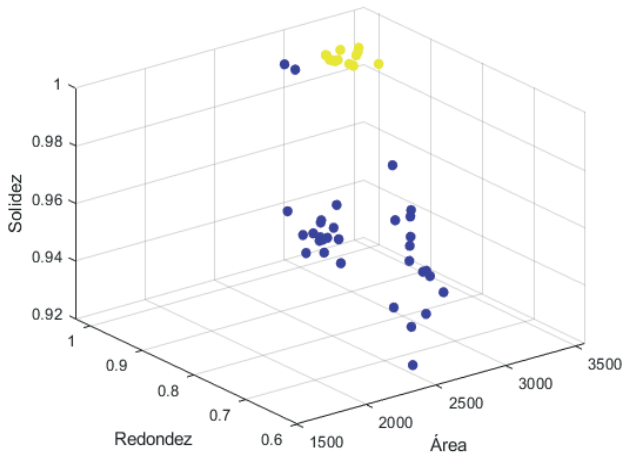


Fig. 7. Resultados de la prueba de detección de pastillas.

3.5 *Localización del medicamento*

La ubicación de los fármacos se realiza por medio del centroide de los objetos de la imagen. El centroide corresponde al centro de masa de los objetos, especificando sus coordenadas en píxeles de la propia imagen (10-11) (Nurnberg (2013)).

$$c_x = \frac{1}{6A}\sum_{i=0}^{N-1}(x_i + x_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1}y_i) \quad (10)$$

$$c_y = \frac{1}{6A}\sum_{i=0}^{N-1}(y_i + y_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1}y_i) \quad (11)$$

Donde A es el área de la figura, y x_i, y_i corresponden a las coordenadas de sus vértices. Una vez encontrado el centroide, se utiliza el factor de calibración calculado en (1) para definir las coordenadas en centímetros de la posición de los medicamentos.

4. RESULATADOS

Los resultados del presente trabajo se analizan a partir de las medidas de desempeño de los clasificadores implementados y pruebas del funcionamiento del sistema.

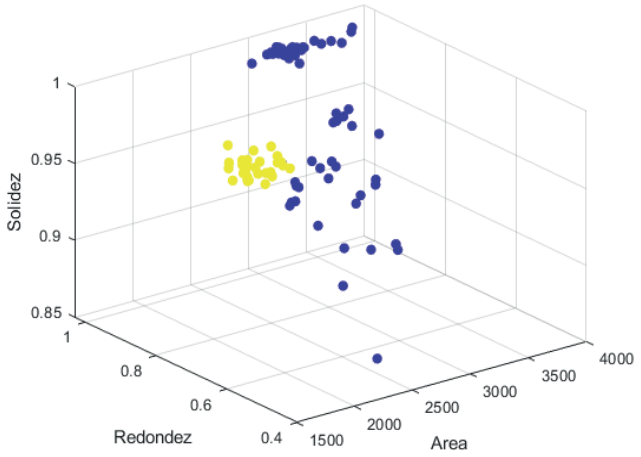


Fig. 8. Resultados del entrenamiento detección de cápsulas.

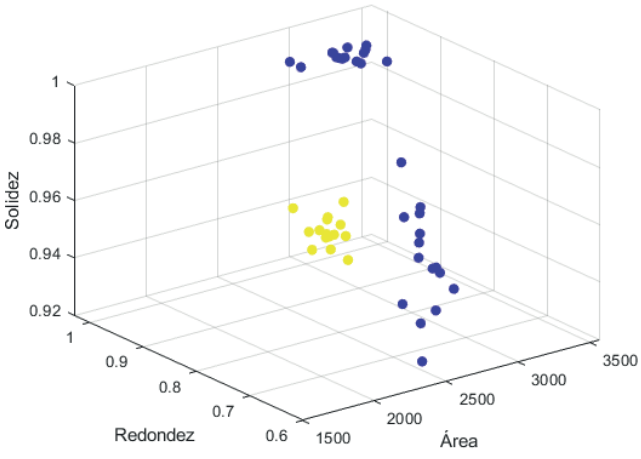


Fig. 9. Resultados de la prueba de detección de cápsulas.

 ISSN en trámite

4.1 Medidas de desempeño

Con base en los resultados de las pruebas de los clasificadores de pastillas y cápsulas, se determinan las matrices de confusión, las cuales se observan en la Tabla 2 y Tabla 3.

Tabla 2. Matriz de Confusión del Clasificador de Pastillas

		Valor Predicho	
		No Pastilla	Pastilla
Valor Real	No Pastilla	TN=15	FP=0
	Pastilla	FN=2	TP=13

Tabla 3. Matriz de Confusión del Clasificador de Cápsulas

		Valor Predicho	
		No Cápsula	Cápsula
Valor Real	No Cápsula	TN=15	FP=0
	Cápsula	FN=0	TP=15

Teniendo en cuenta las matrices de confusión, es posible calcular las medidas de desempeño del clasificador; la precisión mide la calidad del modelo en tareas de clasificación, mientras que la exhaustividad mide la cantidad que el modelo es capaz de identificar (Theodoridis y Koutrombas (2003)). La precisión se calcula mediante (12) y la exhaustividad mediante (13).

$$precisión = \frac{TP}{TP+FP} \quad (12)$$

$$exhaustividad = \frac{TP}{TP+FN} \quad (13)$$

Al analizar los resultados anteriores, se resalta que el clasificador de pastillas es capaz de identificar el 86% de pastillas, mientras que el clasificador de cápsulas reconoce el 100%.

4.2 Pruebas finales

Para comprobar el funcionamiento del sistema, se reservaron diversas imágenes de la base de datos construida y se observó una buena clasificación de los diversos fármacos. Los resultados se pueden apreciar en las Fig. 10-12.

5. CONCLUSIONES

El algoritmo propuesto en este trabajo para el reconocimiento de medicamentos demostró ser capaz de identificar pastillas, cápsulas y tabletas en imágenes contenidas en un ambiente controlado. La implementación de máquinas de vectores de soporte (SVM) para clasificar fármacos es una herramienta eficaz y comprobada, sin embargo, el trabajo propuesto menciona la clasificación de únicamente tres clases, si el lector pretende utilizar más medicamentos, el costo computacional puede llegar a incrementarse. Como trabajo a futuro, utilizando la ubicación de los medicamentos, se pretende manipular los fármacos al diseñar un algoritmo mecatrónico que pueda operar los diferentes medicamentos. Además, es necesario realizar un estudio estadístico para comprobar la efectividad del algoritmo contra los demás trabajos observados en la sección de antecedentes; de esa manera, se podrá observar que el algoritmo propuesto puede estar a la par de la literatura.

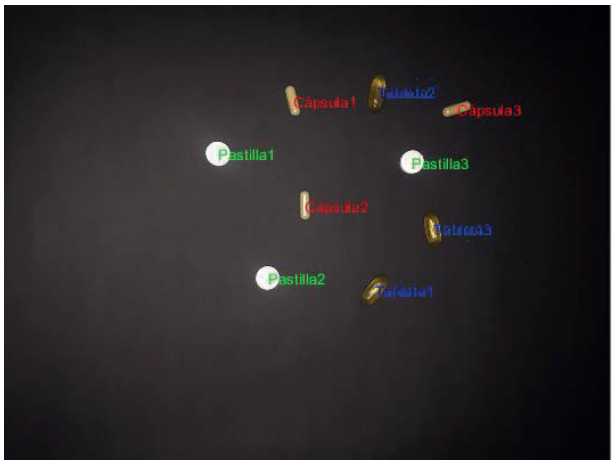


Fig. 10. Primera prueba final de algoritmo de visión artificial.

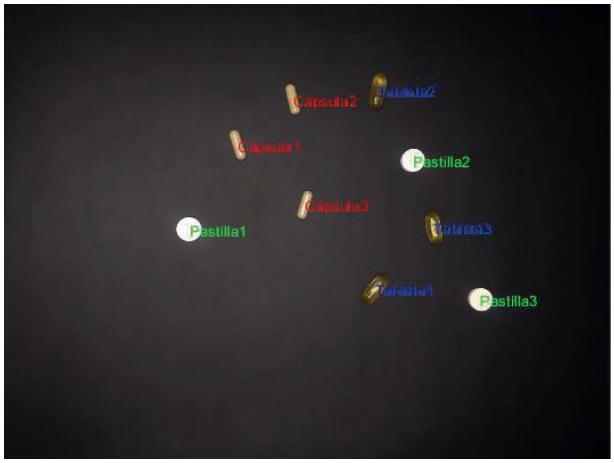


Fig. 11. Segunda prueba final de algoritmo de visión artificial.

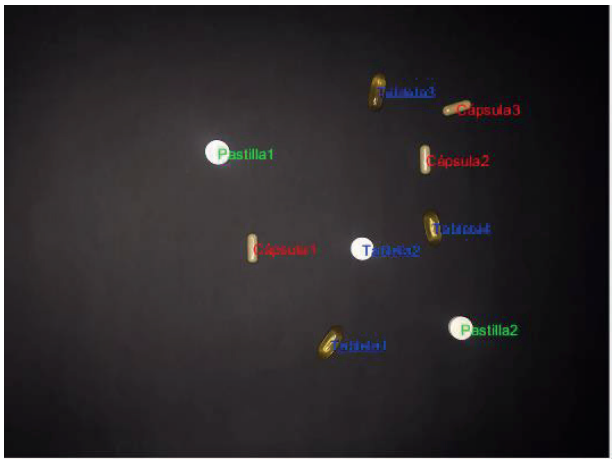


Fig. 12. Tercera prueba final de algoritmo de visión artificial.

ISSN en trámite

REFERENCIAS

Chacón, M. (2007). *Procesamiento Digital de Imágenes*, México: Trillas.

Esteva, A., Chou, K., Yeung, S., Naik, N., Madani, A., Mottaghi, A., Liu, Y., Topol, E., Dean, y J., Socher, R. (2021). Deep learning-enabled medical computer vision. *NPJ Digital Medicine*. 4(5).

González, R. y Woods, R. (2018). *Digital image processing*. New York, NY: Pearson, Fourth edition.

Han, A., Jifan, R., y Mengyang, Z. (2018). The Impact Factors of Online Book Reviews Usefulness: An Empirical Comparison Between ANN and SVM. *2018 15th International Conference on Service Systems and Service Management*

Haykin, S. (2008). *Neural Networks and Learning Machines*. Third edition. McMaster University, Canada: Pearson.

Hnoohom, N., Yuenyong, S., y Chotivatunyu, P. (2018). MEDiDEN: Automatic Medicine Identification Using a Deep Convolutional Neural Network. *2018 International Joint Symposium on Artificial Intelligence and Natural Language Processing*.

Larcher, L. I., Biasoni, E. M., Cattaneo, C. A., Ruggeri, A. I. y Herrera, A. (2011). Algoritmo para detección de bordes y ulterior determinación de objetos en imágenes digitales. *Mecánica Computacional*, 1(30) 2841-2852.

Nurnberg, R. (2013). Calculating the area and centroid of a polygon in 2d. Imperial College London. Disponible en: http://paulbourke.net/geometry/polygonmesh/centroid.pdf

Palomino, L. S. y Concha, Ú. R. (2009). Técnicas de segmentación en procesamiento digital de imágenes. *Revista de ingeniería de sistemas e informática*, 2(6).

Sen P.C., Hajra M., Ghosh M. (2020) Supervised Classification Algorithms in Machine Learning: A Survey and Review. In: Mandal J., Bhattacharya D. (eds) Emerging Technology in Modelling and Graphics. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, (937). Springer, Singapore.

Shinde, S. R., Bhavsar, K., Kimbahune, S., Khandelwal, S., Ghose, A., y Pal, A. (2020). Detection of Counterfeit Medicines Using Hyperspectral Sensing. *2020 42nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC)*.

Theodoridis, S. y Koutrombas, K. (2003). *Pattern recognition*, Elsevier academic press.

Xia, H., Wang, C., Yan, L., Dong, X., y Wang, Y. (2019). Machine Learning Based Medicine Distribution System. 2019 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications.

ISSN en trámite

Detección de objetos durante el desplazamiento vehicular, aplicando RANSAC y DBSCAN

Andrea Palacios Cervantes * **Dante Mújica-Vargas** *
Noé Alejandro Castro Sánchez * **Nimrod González Franco** *

* *Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Cuernavaca-Morelos, México m20ce086@cenidet.tecnm.mx, dante.mv@cenidet.tecnm.mx, noe.cs@cenidet.tecnm.mx , nimrod.gf@cenidet.tecnm.mx*

Abstract:
La detección de objetos es un área fundamental para la conducción autónoma, ya que permite el reconocimiento de su entorno y la planificación de movimiento. En esta investigación se realizó un análisis del proceso de detección de objetos por medio de simulaciones desarrolladas en el entorno de MATLAB, donde se analizó el funcionamiento de cada parte involucrada durante la detección de objetos y la cual fue ilustrada por medio de un diagrama de bloques.

Keywords: Detección de objetos, RANSAC, DBSCAN

1. INTRODUCCIÓN

Un vehículo autónomo cuenta con sensores que lo apoyan en diversas tareas de visión, localización y algunos casos de conducción. Un ejemplo son los autos Tesla que disponen de un total de ocho cámaras que se encuentran distribuidas, en la parte delantera y en la parte trasera del vehículo (Li et al., 2018). Sin embargo, para poder realizar la detección de objetos, los datos adquiridos por medio de los sensores necesitan pasar por un procesamiento para la identificación de cada objeto, con ayuda de diversos algoritmos. Este artículo está dedicado al análisis del proceso de detección de objetos, aplicando los algoritmos RANSAC y DBSCAN.

La detección de objetos es una amplia área de investigación que han permitido realizar diferentes trabajos, como el caso del investigador Li, quien desarrollo una simulación de conducción autónoma aumentada, por medio de imágenes del mundo real con un flujo de tráfico y utilizando un algoritmo de entrenamiento AD, con la finalidad de dar una flexibilidad en un entorno virtual (Li et al., 2019).

Mientras que el investigador Gong hace uso del sensor LIDAR para detectar objetos en tiempo real, basado en la localización simultánea en conjunto a una red neuronal, con el objetivo de resolver los problemas de dispersión y el ruido existente de los datos (Gong et al., 2020).

La detección de objetos en 3D suele ser realizada por medio de automóviles o robots. Los datos adquiridos son aprovechados para el diseño de métodos que permiten identificar objetos, conocer dimensiones, aplicar maniobras de movimiento y reconstrucción mapas en 3D. Sin embargo, los procesos de detección de objetos presentados, aún no son totalmente fiables, ya que en la mayoría de las investigaciones realizadas con respecto a este tema presentan aún el problema de la presencia de ruido que afecta la percepción de los objetos. Además de que los algoritmos utilizados para la el procesamiento de la información obtenida, se encuentran aún en fases de entrenamiento y aunque cumplen con el objetivo de identificar los objetos, al ser utilizados en escenarios reales la efectividad del algoritmo suele disminuir. Por este motivo la detección sigue siendo un amplio campo para la investigación, ya que se busca la disminución de errores y permita que los automóviles autónomos puedan desplazarse en caminos más extremos.

En este trabajo se analizara el proceso de detección, utilizando simulaciones con los sensores LIDAR y RGB-D que recabaran la información que posteriormente será procesada por los algoritmos RANSAC y DBSACAN. Cada objeto será definido en un cuadro delimitador y obtendrá los parámetros de cada objeto detectado durante el desplazamiento vehicular.

El resto del documento se encuentra organizado de la siguiente manera. En la segunda sección, se presentan algunos conceptos teóricos. En la tercera sección, se explica los elementos desarrollados para la propuesta. En la cuarta sección se explica los experimentos realizados. Finalmente en la quinta sección se encuentra la conclusión del trabajo.

ISSN en trámite

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Vehículos Autónomos

Los vehículos autónomos pertenecen a los Sistemas Inteligentes de transporte que tienen el potencial de revolucionar la conducción por medio de la automatización en funciones de seguridad, eficiencia, experiencia de usuario y la percepción del medio que lo rodea (McQueen, 2019).

La automatización de los vehículos según la NHTSA (National Highway Traffic Safety Andministration), se clasifica en 6 niveles de avances tecnológicos en asistencia al conductor, en la que se inicia desde la ausencia de automatización hasta la autonomía total del vehículo (NHT, 2019).

Para el desarrollo de estos vehículos terrestres urbanos es común que cuenten con 3 elementos (Li et al., 2018):

- Sensores: Estos dispositivos se encarga de la detección y transformación de magnitudes físicas o químicas en señales o pulsos electrónicos.
- Computadoras a bordo: Las computadoras en los automóviles permiten la aplicación de métodos de aprendizaje autónomo y la generación de algoritmos que se aplican para ayudar al usuario con las tareas de conducción y localización.
- Actuadores: Los actuadores son una parte esencial en la electromecánica y en su mayoría son implementados en motores eléctricos y motor-reductores o válvulas electromagnéticas que regulan los sistemas de frenado y dirección

2.2 Sensor LiDAR

Los sensores LiDAR se utilizan para el mapeo, localización y evasión de obstáculos por medio de una percepción inteligente de objetos 3D. La información que el sensor detecta a través de una nube de puntos de forma rápida y precisa, teniendo como principal tarea el detectar la curva de un objeto que posteriormente pasará a ser un $multi - frame$ de la curva que se ha proyectado para finalmente obtener el contorno de la extracción (Gong et al., 2020).

Las nubes de puntos generados por LiDAR proporcionan una descripción del entorno que escanea, pero es muy difícil diferenciar los puntos individuales. En el caso de un vehículo en movimiento los mapas producidos con LiDAR, se les aplica un método de filtrado de partículas para correlacionar la información y lograr una localización en tiempo real con 10 cm de precisión y eficacia en entornos urbanos (Liu et al., 2020).

Matemáticamente un punto es simplemente una tupla incorporada con varios atributos y se representa como podemos observar en (1) (Li et al., 2019):

$$pi = xi, xy, x, z, Ii, \ldots \tag{1}$$

Donde xi, xy, x, z, Ii representan las coordenadas espaciales de cada atributo.

La colección de puntos en una nube de puntos se representa en (2):

$$P = p1, p2, p2, pi, \ldots .pi \tag{2}$$

2.3 Sensor RGB-D

Los sensores RGB-D son un tipo de dispositivo de detección de profundidad que funciona en asociación con los colores rojo, verde y azul. La información de profundidad proporciona una contribución importante para la detección de objetos, el análisis de escenas, estimación de pose, seguimiento visual, segmentación semántica, análisis de formas y reconstrucción en 3D (Zhang et al., 2019).

Las detecciones que se realicen por medio de radar a partir de las posiciones y velocidad en la que se encuentre el objeto cercano al vehículo Ego, se calculará ángulo de estimación basado en el movimiento utilizando (3) y (4) (Park et al., 2020).

$$(X_t, Y_t) = (X_{ego}, Y_{ego}) + \mathbf{R}(\Psi_{ego}) \cdot (x_t, y_t)^T \tag{3}$$

Donde $\mathbf{R}$ es la rotación de la matriz, (x, y) son las coordinadas del vehículo ego, (X, Y) son las coordenadas mundiales y $(x_t, y_t)^T$ coordenadas de los objetos.

$$\Psi_{target} = tan^{-1}(\frac{Y_t - Y_{t-1}}{X_t - X_{t-1}}) \tag{4}$$

donde Ψ_{target} es el ángulo del objeto detectado y $(X_t, Y_t)^T$ coordenadas de los objetos.

2.4 RANSAC

El algoritmo de RANSAC funciona como un identificador de valores atípicos en un conjunto de datos y estimando el modelo deseado, utilizando datos que no contienen valores atípicos (Leng et al., 2020).

Para realizar su agrupamiento aplicando este algoritmo se siguen los siguientes pasos (Leng et al., 2020):

- Selecciona aleatoriamente un subconjunto de datos
- Ajustar un modelo al subconjunto seleccionado
- Determinar el número de valores atípicos a partir de la distancia
- Se repiten los pasos 1-3 hasta cumplir con un número prescrito de interacciones.

ISSN en trámite

Algorithm 1 Algoritmo de *RANSAC*

Require: Interacciones N y muestreo K
Ensure: Punto más alto del plano S
1: **for** $K < N$ **do**
2: Selección de puntos
$P_1(x_1, y_1, z_1), P_2(X_2, Y_2, Z_2), P_3(x_3, y_3, z_3)$
3: **if** $A_x + B_y + C = z$ **then** $\begin{Bmatrix} A_{x_1} + B_{y_1} + C = Z_1 \\ A_{x_2} + B_{y_2} + C = Z_2 \\ A_{x_3} + B_{y_3} + C = Z_3 \end{Bmatrix}$
4: **end if**
5: Calcular la distancia $d_i = \frac{|A_x i + B_y i + C - z_i|}{\sqrt{A^2 + B^2 + 1}}$
6: **end for**
7: Punto más alto del plano S

El uso de RANSAC puede mejorar la remoción de tierra, ya que cada punto que es recopilado lo divide en diferentes cuadros con una estructura x, y, z, i, r, donde x, y, z representan las coordenadas tridimensionales, i es la intensidad y r es el número de puntos (GÖNÜLTAŞ et al., 2020).

Posteriormente se extraerán los puntos útiles y líneas verticales. El número de líneas verticales se calcula mediante los parámetros de LIDAR, específicamente la resolución horizontal.

$$n_{ver} = \frac{2\pi}{r_{nor}} x 180^{\circ} \tag{5}$$

Donde n_{ver} son el recuento de las líneas verticales y r_{nor} es la resolución horizontal de LiDAR.

2.5 DBSCAN

Es un algoritmo de agrupamiento basado en densidad que se basa en la muestra de decisión de proximidad. Encuentra todas las regiones densas de los puntos de muestra y trata estas regiones densas como grupo (Wang et al., 2019).

El algoritmo tiene las siguientes características:

- Se basa en una densidad robusta a puntos de ruido alejados del núcleo de densidad.
- No es necesario conocer el número de agrupaciones.
- Se puede encontrar agrupaciones de forma arbitraria.

El algoritmo DBSCAN realiza sus observaciones a partir de un radio de proximidad y para su funcionamiento necesita de dos parámetros los cuales son (Li, 2020):

- Epsilon (ϵ): También llamado ϵ-*neighborhood*, es el radio que define la región vecina a una observación.
- Minimum points ($minPts$): Número mínimo de observaciones dentro de la región de epsilon (ϵ).

Algorithm 2 Algoritmo de *DBSCAN*

Require: ϵ, $dataset$, $minPts$
1: **for** p in $dataset$ **do**
2: Marcar p como vecino
Vecinos N=encontrar los vecinos de p
3: **if** $N \geq minPts$ **then** $N = NUN$
4: **if** $P \notin N$ **then** $P = C$
5: **end if**
6: **end if**
7: **end for**

Durante el agrupamiento DBSCAN define 3 diferentes puntos (Li, 2020):

- Punto central: Contiene una gran cantidad de $minPts$ dentro de ϵ.
- Punto Fronterizo: La cantidad de $minPts$ es menor dentro de ϵ, pero es vecino de un punto central.
- Valor atípico: Un punto que no es central, ni fronterizo.

Tomando en cuenta los puntos anteriormente mencionados, DBSCAN realiza su agrupamiento siguiendo los siguientes pasos (Schubert et al., 2017):

- Encuentra todos los puntos vecinos dentro de ϵ e identifica los puntos centrales.
- Para cada punto central, si no hay una asignación se crea un nuevo clúster.
- Todos los puntos son conectados por su densidad y asignados al mismo grupo que el punto central. Un punto a y b se dice que son de densidad conectada si existe un punto c que tiene un número suficiente de puntos con sus vecinos b y que están dentro de ϵ. Es un proceso de encadenamiento.
- Aquellos puntos que no pertenecen a ningún agrupamiento son considerados como ruido.

3. PROPUESTA

Para analizar el proceso de detección de objetos se realizó un diagrama de bloques que se muestra en la Figura 1, con el objetivo de tener una mejor visualización de los procedimientos que se encuentran involucrados.

3.1 Obteción de la nube de puntos

En el primer bloque para el proceso de detección se realiza la *Obtención de la nube de puntos*. Dentro de este proceso, se encuentran involucrados, dos principales participantes, los cuales son el sensor LIDAR y el sensor RGB-D. LIDAR es el sensor encargado de escanear el ambiente a su alrededor y obtener la información por medio de una nube de puntos. No obstante hay que recalcar que LIDAR puede llegar a obtener datos erróneos debido al ruido que se encuentra en el ambiente por alguna partícula de tierra o gota de lluvia, por lo que para contrarrestar ese error, LIDAR es fusionado con RGB-D.

ISSN en trámite

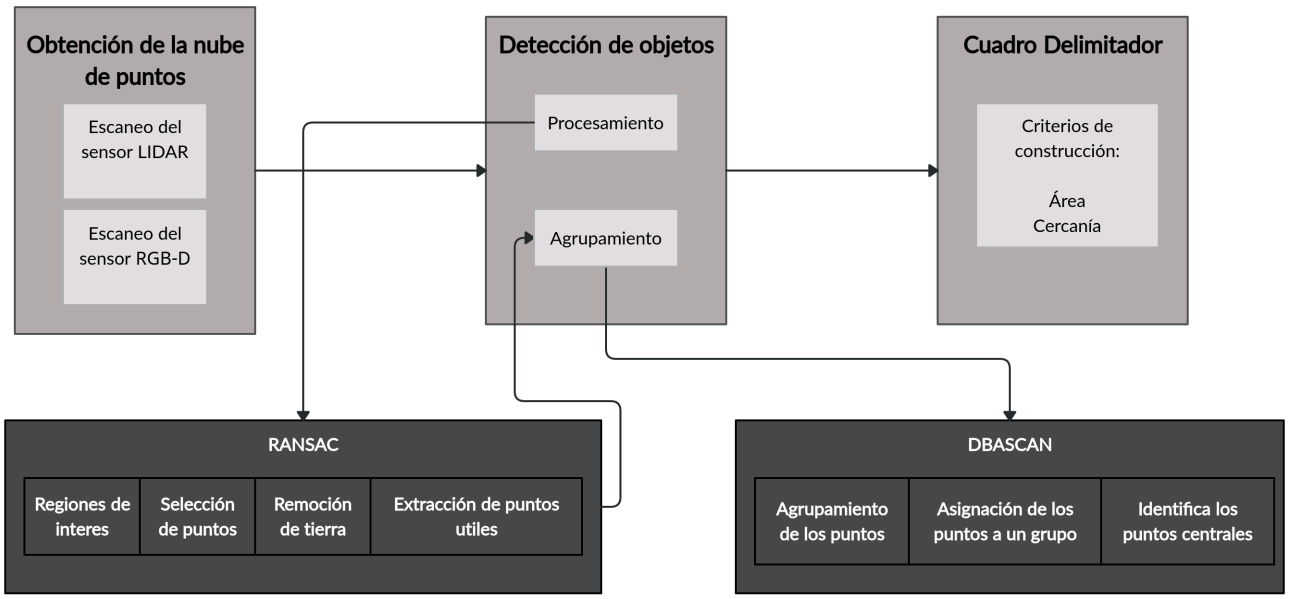


Fig. 1. Diagrama de bloques del proceso de detección de objetos

3.2 Detección de objetos

En el segundo bloque se procede a realizar la *Detección de objetos*. En este proceso se recibe la nube de datos sin procesar para pasar primero por la segmentación de la nube de puntos y finalmente el agrupamiento. Para la segmentación de la nube de puntos se utiliza el algoritmo RANSAC (ver Algoritmo 1), el cual permitirá obtener: Regiones de interés, Seleccionar los puntos, Remover la tierra y Extraer los puntos útiles.

Una vez realizada la segmentación de la nube de puntos y obtener los puntos útiles para la detección de objetos, se puede proceder al agrupamiento. El algoritmo DBSCAN (ver Algoritmo 2), sera el encargado de realizar el agrupamiento a partir de identificar los puntos centrales y asignar cada punto a un grupo.

Es importante mencionar que tanto RANSAC, como DBSCAN son algoritmos de agrupamiento que pueden trabajar solos en la nube de puntos. No obstante ambos algoritmos en conjunto obtienen mejores resultados, dado que RANSAC trabaja con los valores atípicos que DBSCAN no puede identificar. Por lo que al tener un primer tratamiento de la nube de puntos con RANSAC, los resultados permitirán robustecer el agrupamiento realizado con DBSCAN.

3.3 Cuadro Delimitador

En el último bloque se lleva a cabo la construcción del *Cuadro Delimitador*, el cual permitirá identificar los objetos detectados y obtener las características de cada uno (ver Algoritmo 3). Para la construcción de cada cuadro delimitador se toman en cuenta dos criterios de construcción que son: Área y Cercanía.

Algorithm 3 Adaptación del cuadro delimitador basado en búsqueda

Require: range data points $X \epsilon R^{nx2}$
Ensure: rectangle edges $(a_i x + b_i x = c_i | i = 11, 2, 3, 4)$
$Q \leftarrow \theta$
for $\theta = 0$ to $\pi/2 - \delta$ step **do**
  $e \leftarrow (cos\theta, sin\theta)$
  $e \leftarrow (-sin\theta, cos\theta)$
  $C_1 \leftarrow e_1^T$
  $C_2 \leftarrow e_2^T$
  $q \leftarrow$CalculatecriterionX(C_1, C_2)
  insert q into with key (θ)
end for
select key (θ^*) from Q with maximum value
$C_1^* \leftarrow X.(cos\theta^* sin\theta^*)^T, C_2^* \leftarrow X.(-sin\theta^* cos\theta^*)^T$
$a_1 \leftarrow cos\theta^*, b_1 \leftarrow sin\theta^* c_1 \leftarrow min\{C_1^*\}$
$a_2 \leftarrow cos\theta^*, b_2 \leftarrow sin\theta^* c_2 \leftarrow min\{C_2^*\}$
$a_3 \leftarrow cos\theta^*, b_3 \leftarrow sin\theta^* c_3 \leftarrow min\{C_1^*\}$
$a_4 \leftarrow cos\theta^*, b_4 \leftarrow sin\theta^* c_4 \leftarrow min\{C_2^*\}$

$$minimize \sum_{i \epsilon P} (x_i cos\theta + y_i sin\theta - c_1)^2 + \quad (6)$$

$$\sum_{i \epsilon Q} (-x_i sin\theta + y_i cos\theta - c_2)^2 \quad (7)$$

$$subjecttoP \cup Q = 1, 2, ..., m \quad (8)$$

$$c_1, c_2 \epsilon R 0^\circ \leq \theta < 90^\circ \quad (9)$$

Minimizando el error del cuadro, ajustando la disyunción óptima (P, Q divide los m puntos $(x_i | i = 1, ..., m)$ en dos conjuntos) y los parámetros óptimos (θ,c_1,c_2) para las dos rectas perpendiculares que corresponden a los puntos en P y Q respectivamente, la dos expresiones de

ISSN en trámite

recta son $xcos\theta + ysin\theta = c_1$ y $xsin\theta + ycos\theta = c_2$. En otras palabras, la expresión 6 representa la cercanía un agrupamiento de otro y la expresión 8 representan el área, es decir, la cantidad de puntos que se encuentran dentro de un agrupamiento. Para la altura de cada cuadro se toma de referencia un angulo de 0 a 90°, a partir del punto más bajo del agrupamiento.

4. EXPERIMENTACIÓN

Los experimentos realizados para analizar el proceso de detección, fueron desarrollados en la plataforma de MATLAB. El escenario construido para la realización de pruebas (ver Figura 2) tiene las siguientes características:

- Distancia de 60 m
- Ancho de 3 m
- Participan 7 vehículos diferentes
- El vehículo principal se encuentra colocado en el centro de la pista
- El vehículo principal cuenta con el sensor LIDAR y el sensor RGB-D

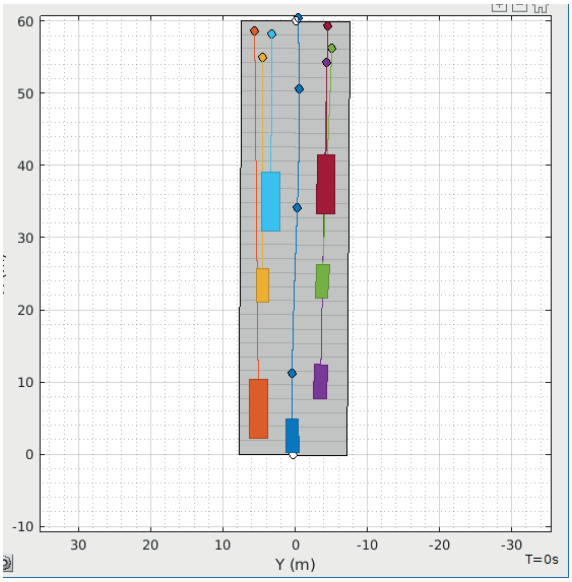


Fig. 2. Pista desarrollada en MATLAB

4.1 Obtención de la nube de puntos

Al colocar el vehículo principal sobre la pista que se muestra en la Figura 2, los sensores colocados en el vehículo comienzan a escanear su entorno y obtienen como una nube de 72000 puntos y la cual se aprecia en la Figura 5. Esta nube de puntos será procesada por los algoritmos de RANSAC y DBSCAN.

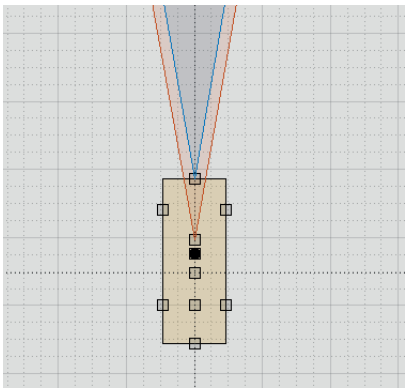


Fig. 3. Vehículos principal con el sensor LIDAR de color azul y el sensor RGB-D de color rojo

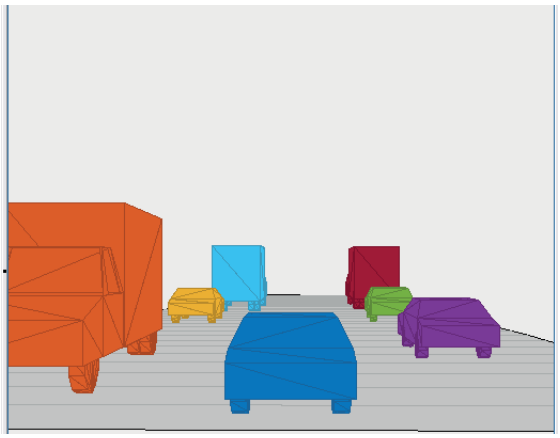


Fig. 4. Vehículos participantes en la simulación

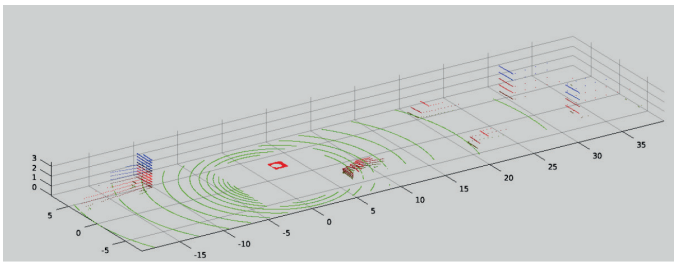


Fig. 5. Nube de puntos obtenida

4.2 Procesamiento de la nube de puntos

Con la entrada de la nube de puntos sin procesar, se aplica el algoritmo RANSAC que recibe los 72000 puntos y obtiene finalmente 10806 puntos que son útiles para el agrupamiento. Como se observa en la Figura 6 los puntos que son colocados en color verde, representan los puntos del suelo y los puntos de color rosa representan los objetos sobre el nivel del suelo.

4.3 Agrupamiento y cuadro delimitador

Finalmente con la nube de 10806 puntos previamente procesada con RANSAC, pasan por el agrupamiento real-

ISSN en trámite

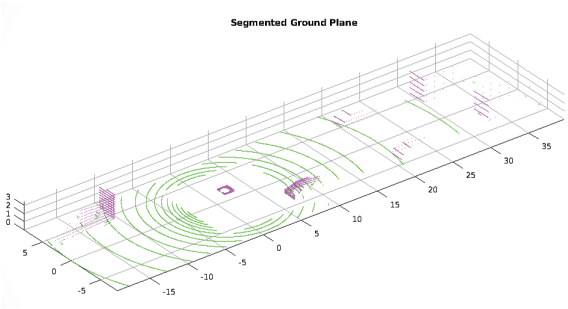


Fig. 6. Segmentación de la nube de puntos

izado por DBSCAN y construir los cuadros delimitadores de cada objeto como se aprecia en la Figura 7.

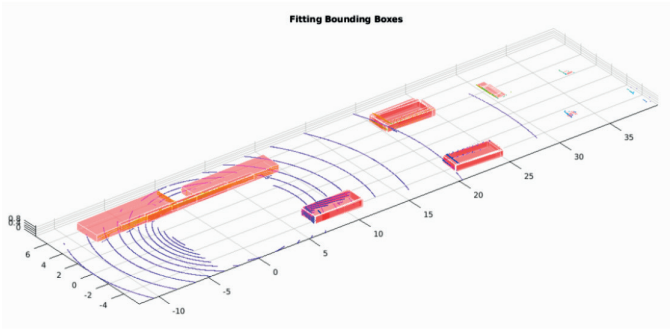


Fig. 7. Cuadro delimitadores de cada objeto

Cada cuadro delimitador contiene los siguientes parámetros:

- Parámetros de longitud
- Dimensión
- Orientación
- Centro

En las Figuras 8 y se aprecian los ´parámetros obtenidos después del proceso de detección.

```
model =

  cuboidModel with properties:

     Parameters: [8.9565 -3.6943 0.6584 4.6658 1.8639 0.6827 0 0 0]
         Center: [8.9565 -3.6943 0.6584]
     Dimensions: [4.6658 1.8639 0.6827]
    Orientation: [0 0 0]


model =

  cuboidModel with properties:

     Parameters: [22.6665 -3.9411 0.6231 4.3236 1.9951 0.5919 0 0 -3.0000]
         Center: [22.6665 -3.9411 0.6231]
     Dimensions: [4.3236 1.9951 0.5919]
    Orientation: [0 0 -3.0000]
```

Fig. 8. Datos obtenidos

```
model =

  cuboidModel with properties:

     Parameters: [33.2042 -3.9381 0.5019 0.8334 0.0811 0.0276 0 0 0]
         Center: [33.2042 -3.9381 0.5019]
     Dimensions: [0.8334 0.0811 0.0276]
    Orientation: [0 0 0]


model =

  cuboidModel with properties:

     Parameters: [39.1372 -4.2314 0.3016 0.2164 0.0018 9.2960e-04 0 0 -89.0000]
         Center: [39.1372 -4.2314 0.3016]
     Dimensions: [0.2164 0.0018 9.2960e-04]
    Orientation: [0 0 -89.0000]
```

Fig. 9. Datos obtenidos

4.4 Evaluación

Para comprobar que los datos obtenidos fueron lo más óptimos, se aplicó la métrica conocida como GOSPA, el cual tiene como objetivo el evaluar el rendimiento de un sistema de seguimiento proporcionando un costo escalar (García-Fernández et al., 2020).

$$GOSPA = [\sum_{i=0}^{m} d_p^c(x_i, y_{\pi(i)}) + \frac{c^p}{a}(n-m)]^{\frac{1}{p}} \qquad (10)$$

Donde d_c es la distancia basada en el corte y $y_{m(i)}$ representan la pista asignada a la verdad x_i. La distancia de corte d_c se define como:

$$d_c = mind_b(x, y), c \qquad (11)$$

Donde $_c$ es el umbral de la distancia de corte, y $d_b(x, y)$ es la distancia base entre la pista x y la verdad y calculada por la función de la distancia. La distancia de corte d_c es el valor más pequeño de db y $c.\alpha$ es el parámetro alfa.

Cuando $\alpha = 2$, la métrica GOSPA se puede reducir a tres componentes:

$$GOSPA = [loc^p + miss^p + false^p]^{\frac{1}{p}} \qquad (12)$$

El componente de localización loc se calcula como:

$$loc = [\sum_{i=l}^{h} d_p^b(x_i, y_{\pi(i)})]^{\frac{1}{p}} \qquad (13)$$

Donde h es el número de asignaciones no triviales. Una tarea trivial es cuando una pista no se asigna a ninguna verdad.

El componente objetivo perdido se calcula como:

$$miss = \frac{c}{2^{\frac{1}{p}}}(n_{miss})^{\frac{1}{p}} \qquad (14)$$

ISSN en trámite

Donde n_{miss} es el número de objetivos perdidos.

El componente de pista falsa se calcula como:

$$false = \frac{c}{2^{\frac{1}{p}}}(n_{false})^{\frac{1}{p}} \tag{15}$$

Donde n_{false} es el número de pistas falsas.

Al aplicar la métrica anterior, sobre la simulación realizada, se obtienen los siguientes resultados. En la Tabla 1 se observan los datos generados con la métrica GOSPA. Los datos que se encuentran perdidos, es decir, aquellos datos que no pudieron ser identificados a causa de estar fuera del umbral determinado, fueron obtenidos a través de columnas que representan los puntos detectados durante la simulación. Los datos perdidos solo se presentan a partir de la columna 8000 que es la parte final de la detección en donde ya no se encuentran más objetos. Mientras que los datos falsos detectados, es decir, el seguimiento falso de los objetos durante la simulación, han sido nulos.

Table 1. Datos obtenidos con la métrica GOSPA

Columnas	Datos perdidos	Datos falsos
1-1000	0	0
1001-2000	0	0
2001-3000	0	0
3001-4000	0	0
4001-5000	0	0
5001-6000	0	0
6001-7000	0	0
7001-8000	43.3013	0
8001-9000	43.3013	0
9001-10 000	43.3013	0
10 001-10 081	43.3013	0

En la Figura 10 y la Figura 11, se observa de forma grafica los datos obtenidos e ilustrados en la tabla anterior.

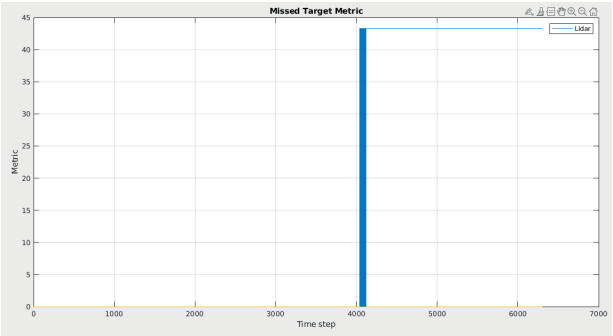


Fig. 10. Grafica de datos perdidos

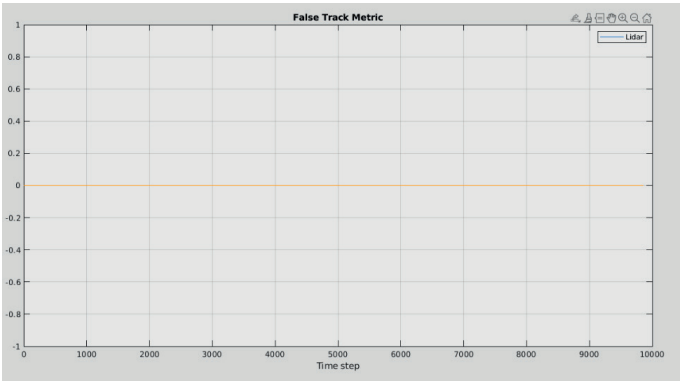


Fig. 11. Grafica de datos falsos

5. CONCLUSIÓN

En conclusión, el diagrama de bloques propuesto para analizar el proceso de detección de objetos durante el desplazamiento vehicular, apoyo en el entendimiento y seguimiento del proceso de detección, dando una mejor percepción de cada elemento involucrado.

Las experimentaciones realizadas permitieron demostrar que los sensores LIDAR y RGB-D permitieron adquirir correctamente la nube de puntos. El sensor RGB-D apoyo al sensor LIDAR con la disminución de ruido del ambiente, permitiendo una mejor recepción de los datos para la nube puntos.

Mientras que los algoritmos de RANSAC y DBSCAN demostraron ser altamente capaces de procesar la nube de puntos y poder realizar la construcción de los cuadros delimitadores. También demostró el aprovechamiento de trabajar con ambos algoritmos, ya que RANSAC robustece a DBSCAN al trabajar con los valores atípicos, que DBSCAN se le dificulta en trabajar. Los resultados obtenidos con las métricas aplicadas para la evaluación de la simulación, confirman la eficiencia del proceso de detección, por lo que se espera que sean igual de efectivos en un escenario real.

ISSN en trámite

REFERENCES

(2019). Vehículos automatizados para la seguridad — NHTSA. URL `https://www.nhtsa.gov/technology-innovation/automated-vehicles`.

García-Fernández, Á.F., Rahmathullah, A.S., and Svensson, L. (2020). A metric on the space of finite sets of trajectories for evaluation of multi-target tracking algorithms. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 68, 3917–3928.

Gong, Z., Lin, H., Zhang, D., Luo, Z., Zelek, J., Chen, Y., Nurunnabi, A., Wang, C., and Li, J. (2020). A frustum-based probabilistic framework for 3d object detection by fusion of lidar and camera data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 159, 90–100.

GÖNÜLTAŞ, F., ATİK, M.E., and DURAN, Z. (2020). Extraction of roof planes from different point clouds using ransac algorithm. *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 7(2), 165–171.

Leng, Z., Li, S., Li, X., and Gao, B. (2020). An improved fast ground segmentation algorithm for 3d point cloud. In *2020 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, 5016–5020. IEEE.

Li, S.S. (2020). An improved dbscan algorithm based on the neighbor similarity and fast nearest neighbor query. *IEEE Access*, 8, 47468–47476.

Li, W., Pan, C., Zhang, R., Ren, J., Ma, Y., Fang, J., Yan, F., Geng, Q., Huang, X., Gong, H., et al. (2019). Aads: Augmented autonomous driving simulation using data-driven algorithms. *Science Robotics*, 4(28).

Li, Y., Díaz, M., Morantes, S., and Dorati, Y. (2018). Vehículos autónomos: Innovación en la logística urbana. *Revista de Iniciación Científica*, 4(1), 34–39.

Liu, S., Li, L., Tang, J., Wu, S., and Gaudiot, J.L. (2020). Creating autonomous vehicle systems. *Synthesis Lectures on Computer Science*, 8(2), i–216.

McQueen, B. (2019). Unsettled topics concerning the field testing of automated driving systems. Technical report, SAE Technical Paper.

Park, S.W., Patil, K., Wilson, W., Corless, M., Choi, G., and Adam, P. (2020). Creating driving scenarios from recorded vehicle data for validating lane centering system in highway traffic. Technical report, SAE Technical Paper.

Schubert, E., Sander, J., Ester, M., Kriegel, H.P., and Xu, X. (2017). Dbscan revisited, revisited: why and how you should (still) use dbscan. *ACM Transactions on Database Systems (TODS)*, 42(3), 1–21.

Wang, C., Ji, M., Wang, J., Wen, W., Li, T., and Sun, Y. (2019). An improved dbscan method for lidar data segmentation with automatic eps estimation. *Sensors*, 19(1), 172.

Zhang, C., Huang, T., and Zhao, Q. (2019). A new model of rgb-d camera calibration based on 3d control field. *Sensors*, 19(23), 5082.

ISSN en trámite

Reconocimiento de emociones mediante el análisis de expresiones faciales

Luis Hernández-Pérez*, Gabriel González-Serna* y Andrea Magadan-Salazar*
Tecnológico Nacional de México campus Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Cuernavaca, Morelos. México.
{m20ce038, gabriel.gs, andrea.ms}@cenidet.tecnm.mx

Resumen: En este artículo se presenta un sistema de reconocimiento de emociones mediante el análisis de expresiones faciales utilizando el algoritmo de clasificación Maquina de Soporte Vectorial. Se extrajeron puntos característicos del rostro utilizando un modelo pre-entrenado el cual localiza 68 puntos (x, y) y los sitúa en el rostro de los cuales se utilizaron solamente 17 puntos para calcular distancias geométricas entre ciertos músculos del rostro, lo que permite describir las emociones. El sistema se entrenó con un DataSet creado en combinación con el conjunto de datos de imágenes FER y un conjunto de datos propio. Las pruebas fueron con el conjunto de datos CK+ usado en la literatura, también se realizaron pruebas con videos. Los resultados obtenidos son del 84.52% de precisión, en el reconocimiento de 3 emociones Felicidad, Enojo, Sorpresa y la expresión Neutral.

Palabras clave: Facial Action Code System, Emotions, artificial vision, classifier, facial recognition.

1. INTRODUCCIÓN

Las expresiones faciales son de gran importancia en la interacción entre personas, ya que revelan estados emocionales y cognitivos complejos los cuales son expresados por las personas de manera inconsciente. En la literatura se proponen técnicas y algoritmos capaces de identificar emociones y estados cognitivos mediante sistema de reconocimiento de expresiones faciales los cuales varían en su nivel de precisión. La diferencia en la exactitud se debe a que existen factores que impiden una buena identificación de las características del rostro como lo son: la oclusión, el ruido, la luminosidad de la imagen, pose u orientación del rostro, etc. Otro factor que influye en el reconocimiento de emociones son los repositorios de imágenes que se utilizan para el aprendizaje de los algoritmos de clasificación ya que son adquiridas, generalmente, en ambientes controlados, diferentes a los utilizados en los sistemas reales. Y si se desea un alto nivel de precisión por ejemplo con arquitecturas de aprendizaje profundo, implica tener un alto costo computacional por la cantidad de imágenes para ser entrenados y tener un óptimo rendimiento.

El objetivo de este trabajo es presentar el desarrollo de un sistema que realice el reconocimiento de emociones mediante el análisis facial, pero con la diferencia de que será utilizado durante el proceso de evaluación de la experiencia de usuario (UX) con la finalidad de obtener información sobre el impacto emocional del usuario con respecto al uso de un producto digital (software) y que sirva a los evaluadores de la UX para identificar la polaridad de experiencia de usuario. Para validar los resultados de esta investigación, se verificó el desempeño del sistema mediante las métricas clásicas del reconocimiento y buscando que el costo computacional no sea elevado.

El artículo está organizado de la siguiente manera. En la sección II se revisa el estado del arte, en la sección III se presenta el marco teórico del trabajo, en la sección IV se detalla la propuesta de solución. En la sección V se presenta la experimentación realizada y finalmente en la sección VI se dan las conclusiones.

2. ESTADO DEL ARTE

Como se menciona en Nwosu, et al. (2017) titulado Deep Convolutional Neural Network For Facial Expression Recognition Using Facial Parts “los desafíos clave en el reconocimiento de expresiones faciales, incluyen un pre-procesamiento óptimo, extracción o selección de características y clasificación; particularmente en condiciones de variabilidad de datos de entrada, vista o pose de la cabeza, desorden ambiental e iluminación, múltiples fuentes de variabilidad facial”.

En el contexto de reconocimiento y clasificación de estados mentales utilizando algoritmos de machine learning y deep learning, se realizó una revisión sistemática de artículos y se analizaron los trabajos como los de Sunitha A, et al. (2017), Nwosu, et al. (2017), Krestinskaya, et al. (2017), Liu xiao, et al. (2018), M. Alvarez, et al. (2018), Dewi, et al. (2018), Mangal, et al. (2018), Kartali, et al. (2018), Rabbi, et al. (2018), Cadena, et al. (2019), Sawhney, et al. (2019), Lacort, et al. (2017), Hussain, et al. (2018), Bahera, et al. (2020), jain, et al. (2018), sharma, et al. (2016). En el estudio de Bahera, et al. (2020) resalta que la exploración en la detección automática de gestos de las manos sobre la cara, movimientos de la cabeza y los ojos

ISSN en trámite

son fundamentales para el reconocimiento de emociones y estados cognitivos en conjunto con las expresiones faciales durante el aprendizaje. Además, la implementación de diferentes algoritmos de aprendizaje automático permite obtener resultados favorables, pero aun con oportunidad de mejora. El estado del arte está dividido en dos secciones: Detección de rostro y expresiones faciales y Reconocimiento de emociones.

En la primera sección se analizaron los trabajos de Cadena, et al. (2019), Sawhney, et al. (2019) y Valderrama. (2019) los cuales aportaron ideas relevantes para la localización y pre procesamiento del rostro basado en la calidad de las bases de datos, extractores de características y clasificadores de patrones. En la segunda sección del análisis del estado del arte se estudiaron los trabajos de Sunitha A, et al. (2017), Nwosu, et al. (2017), Krestinskaya, et al. (2017), Liu xiao, et al. (2018), M. Alvarez, et al. (2018), Dewi, et al. (2018), Mangal, et al. (2018), Kartali, et al. (2018), Rabbi, et al. (2018), Lacort, et al. (2017), Hussain, et al. (2018), Bahera, et al. (2020), jain, et al. (2018), sharma, et al. (2016) en donde su principal objetivo fue realizar el reconocimiento de emociones haciendo uso de técnicas de pre-procesamiento y algoritmos de Machine Learning y Deep Learning. Estos trabajos sirvieron de base para la construcción del sistema de clasificación de emociones objetivo de esta investigación. Trabajos como el de Nwosu, et al. (2017) y Liu xiao, et al. (2018) reportan haber implementado arquitecturas de redes neuronales y a pesar de tener buenos resultados el costo computacional es alto, por lo que para esta investigación se decidió utilizar algoritmos clásicos de aprendizaje maquina supervisado, como el de M. Alvarez, et al. (2018); además de considerar los trabajos de Dewi, et al. (2018) y Mangal, et al. (2018) los cuales hacen uso de técnicas geométricas para el reconocimiento de emociones con buenos resultados.

3. MARCO TEORICO.

El rostro humano es considerado el principal sistema visual para mostrar las emociones, además de ser la parte más importante y compleja de la comunicación no verbal.

3.1. Estados Mentales.

El estado mental son los pensamientos e ideas que acompañan al estado de ánimo se divide en dos categorías: los estados cognitivos y estados afectivos Soriano Terrazas. (2018). Un estado cognitivo es una condición neuropsicológica que presenta un sujeto durante la realización de una o más tareas cognitivas, las cuales contemplan los procesos necesarios para el cálculo, la concentración y la memoria, mientras que se entiende por estados afectivos a la condición neuropsicológica que presenta un sujeto. Los estados afectivos se clasifican en emociones y sentimientos Soriano Terrazas. (2018). una categorización de estados mentales según la neurociencia se puede apreciar en la (Fig. 1).

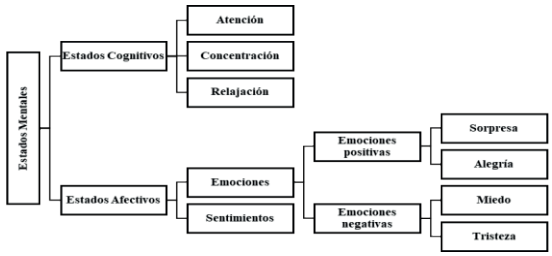


Fig. 1. Clasificación de estados mentales (Soriano Terrazas. 2018)

3.2. Unidades de Acción

Cada movimiento facial observable recibe el nombre de Unidad de Acción (AU por sus siglas en inglés “Action Units”) así la composición de la expresión de una emoción puede ser dividida en una o varias AU para las distintas representaciones de una o varias emociones. La forma más eficaz para poder medir las emociones en el rostro humano es mediante algún sistema de codificación de acción facial con el cual se pueda relacionar el movimiento de ciertas regiones del rostro con algún identificador (unidad de acción) y que los algoritmos puedan aprender de ello. El sistema de codificación de acción facial está establecido como un estándar para la medición de las expresiones faciales, el psicólogo Paul Ekman y Wallace V. Friesen adoptaron una taxonomía de los movimientos faciales humanos por su apariencia en la cara denominado Sistema de Codificación de Acción Facial (FACS por sus siglas en inglés) P.E Group. (2016), basado en un sistema desarrollado originalmente por un anatomista sueco llamado Carl-Herman Hjortsjö. Es un estándar común para categorizar sistemáticamente la expresión física de las emociones y ha resultado útil para psicólogos y animadores.

3.3. Puntos de referencia facial.

La descripción del rostro es una fase muy importante para el desarrollo del algoritmo. En este caso, se realiza mediante la detección de puntos de referencia faciales o puntos de referencia clave en el rostro. Esta tarea se complementa con información como la alineación facial, estimación de la postura de la cabeza, intercambio de caras, detección de parpadeo, detección de somnolencia, detección de expresiones faciales (emociones), etc. En el contexto de los puntos de referencia faciales, es necesario detectar las estructuras faciales importantes en la cara utilizando métodos de predicción de forma. La detección de puntos de referencia faciales se realiza en dos etapas: 1) Localización del rostro en la imagen y 2) detección de estructuras faciales clave en la cara como la Nariz, Mandíbula, Ojos, Ceja y Boca.

4. PROPUESTA DE SOLUCIÓN

ISSN en trámite

Para el desarrollo del algoritmo se planteó el esquema de solución que se muestra en la (Fig. 2). A continuación, se describen cada una de las fases planteadas.

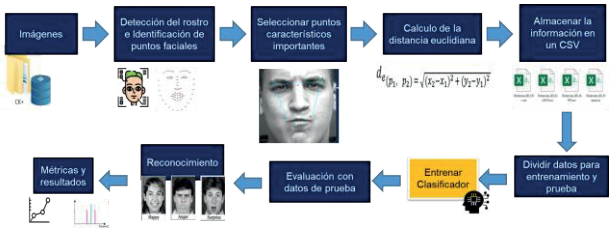


Fig. 1 Propuesta de solución

4.1. Imágenes

En esta primera fase se realizó un análisis del estado del arte con la finalidad de seleccionar los repositorios de imagenes públicos más utilizados. Se seleccionó uno: Cohn-Kanade extended (CK+) Lucey, et al. (2010), adicionalmente a este conjunto de datos se creó un conjunto de datos propio con la finalidad de robustecer el entrenamiento del algoritmo utilizado. La Tabla 1 muestra las características de los conjuntos de datos seleccionados.

Tabla 1. Repositorios para Train y Test de los algoritmos.

BD	Cant.	Emociones	Cant. por clase
Ck+	432 Frontal escala Gris	Felicidad, Sorpresa, Enojo, Neutral	108
Propia	432 Frontal RGB	Feliz, Enojo, Sorpresa, Neutral	108

De acuerdo con lo reportado, la variación de iluminación en las imágenes de los conjuntos seleccionados es mínima ya que se tomaron en ambientes controlados; es decir, en un área bien iluminada. En las (Fig. 3 y 4) se visualiza ejemplos de cada conjunto de datos.



Fig. 3 Rostros con las emociones de Felicidad, Enojo, Sorpresa y Neutral respectivamente del conjunto de datos CK+ Lucey, et al. (2010)

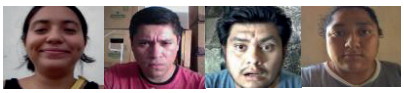


Fig. 4 Rostros con las emociones de Felicidad, Enojo, Sorpresa y Neutral respectivamente del conjunto de datos PROPIO

Cada conjunto de imágenes se dividió en carpetas con una etiqueta numérica del 0 al 3 que corresponde a las 4 emociones que se pretenden reconocer con el clasificador 0 = Alegría, 1 = Enojo, 2 = Sorpresa y 3 = Neutral.

4.2. Detección de Rostro e identificación de puntos faciales.

El sistema de detección de expresiones faciales comienza con la localización del rostro en una imagen para extraer las características o rasgos faciales que se requieren para poder reconocer las emociones. Para la detección del rostro se redimensionan las imágenes a un tamaño de 280 x 280 píxeles y se transforman a niveles de gris. Debido a que la descripción del rostro se lleva a cabo mediante distancias geométricas entre algunos puntos de los componentes del rostro, se elimina la información de color. Posteriormente, se localiza el rostro en la imagen mediante el detector de puntos de referencia facial, previamente entrenado, que se incluye en la librería Dlib D.King. (2015). Esta librería se presentó en el artículo Alineación de cara de un milisegundo con un conjunto de árboles de regresión Kazemi y Sullivan (2014) donde estima la ubicación de 68 puntos que asignan a estructuras faciales en la cara.

En este trabajo la descripción del rostro se realiza a través de distancias geométricas de ciertos movimientos de músculos especificados por Ekman P.E Groups. (2016) de acuerdo con cada expresión. Por ello, se toman las coordenadas de los rasgos faciales de esta forma: [punto de inicio, punto final]. Es decir, para que el detector realice la predicción de los puntos se le pasa como parámetro de entrada las imágenes en escala de grises, en ella se localiza el rostro obteniendo los puntos del predictor en un rostro que está presentando una expresión facial como en la (Fig. 6).



Fig. 6 Los 68 puntos de referencia faciales posicionados en el rostro que presenta la emoción de felicidad.

4.3. Selección de puntos característicos importantes

De los 68 puntos solo se consideran aquellos que sirven como base para calcular las distancias necesarias que permitan identificar las emociones y posteriormente guardar esas distancias en un archivo CSV, para poder obtener las distancias de la apertura de los ojos se crearon nuevos puntos agregando 4 puntos a la mascarilla asignándoles un número quedando de la siguiente manera los puntos [69,70] para la apertura del ojo derecho y [71,72] para la apertura del ojo izquierdo. Los 17 puntos seleccionados son los siguientes:

- Ojo izquierdo: puntos [45, 71,72]
- Boca: puntos [60, 64, 62, 66, 48, 54]

 ISSN en trámite

- Ceja izquierda: puntos [22, 25]
- Nariz: puntos [27]
- Ceja derecha: puntos [18,21]
- Ojo derecho: puntos [36, 69,70]

Los puntos seleccionados en el rostro se pueden visualizar en la (Fig. 7) y las distancias consideradas para la descripción de la expresión facial presente en el rostro en la (Fig. 8).



Fig. 7 Los 17 puntos de referencia faciales posicionados en el rostro de una de las personas de la Base de Datos de CK+ Lucey, et al. (2010) expresión de Enojo.

1.- Long_Elevador_de_parpado_superior_de_Ojo_Derecho	[69,70]
2.- Long_Elevador_de_parpado_superior_de_Ojo_Izquierdo	[71,72]
3.- Long_comisura_derecha_de_Elevador_de_ceja_interior_derecha	[18,69]
4.- Long_comisura_izquierda_de_Elevador_de_ceja_interior_derecha	[21,69]
5.- Long_comisura_izquierda_de_Elevador_de_ceja_interior_izquierda	[25,71]
6.- Long_comisura_derecha_de_Elevador_de_ceja_interior_izquierda	[22,71]
7.- Long_comisura_derecha_de_Elevador_de_ceja_interior_comisura_derecha_ojo_derecho	[18,36]
8.- Long_comisura_izq_de_Elevador_de_ceja_interior_comisura_izquierda_ojo_izquierdo	[25,45]
9.- Long_comisura_derecha_de_ceja_izquierda_inicio_tabique	[22,27]
10.-Long_comisura_izquierda_de_ceja_derecha_inicio_de_tabique	[21,27]
11.-Long_mejillas_elevadas_derecha	[36,48]
12.-Long_mejillas_elevadas_izquierda	[45,54]
13.-Long_comisura_interior_izquierda_y_derecha_de_la_boca	[60,64]
14.-Long_labio_interior_inferior_y_superior_de_la_boca	[62,66]

Fig. 8 Combinación de puntos faciales que se toman como características para entrenar el algoritmo de clasificación.

4.4. Cálculo de la distancia euclidiana

Una vez que se tienen identificado los puntos se procede a realizar el cálculo de las distancias entre estos utilizando la ecuación de la distancia euclidiana como indica la fórmula 1 obteniendo 14 combinaciones de puntos, que son los que intervienen en cada una de las Unidades de Acción de cada emoción a reconocer, determinadas por el psicólogo Paul Ekman, en su Sistema de codificación de Acción Facial P.E Groups. (2016)

$$d_{e(p_1,\ p_2)} = \sqrt{(x_2-x_1)^2 + (y_2-y_1)^2} \qquad (1$$

Donde $d_{e(P1,\ P2)}$ es la distancia que se pretende calcular de un punto característico del rostro a otro punto característico del rostro; por ejemplo, para calcular la longitud del parpado superior e inferior del ojo izquierdo se tiene que calcular la distancia entre el punto 71 y 72 como se ve en la (Fig.8) de la sección 4.3.

4.5. Almacenar la información en un CSV.

Una vez que se ha realizado el cálculo de las distancias entre los puntos se recopilan en un vector el cual se almacena en un archivo CSV con el que más adelante se entrenará el algoritmo de clasificación. El conjunto de datos contiene 14 combinaciones de puntos que serán las características y una columna llamada clase que es la etiqueta de la emoción que le corresponde a cada imagen, la (Fig. 8) muestra estas 14 características.

4.6. Dividir los datos en entrenamiento y prueba.

De acuerdo con la literatura, el porcentaje de división que más se utiliza para cada una de las fases es de 80% de los datos para el entrenamiento y 20% para la etapa de evaluación. Otros autores manejan el 70% para el entrenamiento y 30% para pruebas incluso se llega a usar el 75% para entrenamiento y el 25% para pruebas. En este caso, para realizar el entrenamiento se optó por dividir los datos en 80% para el entrenamiento y 20% para realizar nuestras predicciones.

4.7. Entrenar el clasificador

De acuerdo con el estudio del estado del arte se seleccionó un algoritmo para la clasificación el cual es uno de los algoritmos que se han utilizado en el reconocimiento de emociones con base geométrica M. Alvares et al (2018), Mangala et al (2018) y Dewi et al (2018). El algoritmo se denomina Maquina de Vector Soporte o más conocido en inglés como Support Vector Machine SVM Joaquín A.R. (2021). es un algoritmo de clasificación y regresión desarrollado en la década de los 90, dentro del campo de la ciencia computacional. Aunque inicialmente se desarrolló como un método de clasificación binaria, su aplicación se ha extendido a problemas de clasificación múltiple y regresión. SVMs ha resultado ser uno de los mejores clasificadores para un amplio abanico de situaciones, por lo que se considera uno de los referentes dentro del ámbito de aprendizaje estadístico y machine learning.

Para iniciar con el entrenamiento del algoritmo de clasificación, se procedió dividir el conjunto de datos propio combinado con el conjunto de datos FER2013, para cada clase se tomó 108 imágenes con esto evitamos tener un desbalanceo de clases en nuestro DataSet posteriormente se establecieron los hiperparametros óptimos con los cuales permitieron obtener un 84.52% de precisión en el reconocimiento. También se realizó el entrenamiento y experimentación de dos algoritmos más, RandomForest y KNN, se entrenaron con el mismo conjunto de datos que el primer algoritmo y se eligieron los hiperparametros óptimos para cada uno, en la sección 5 se muestra los resultados obtenidos para cada algoritmo. Los algoritmos fueron desarrollados en el lenguaje de programación Python, utilizando las librerías de Sklearn para el clasificador, Matplotlib para generar los gráficos, Pandas para manejo de los *dataset* y Numpy para las matrices y vectores.

4.8. Evaluación con datos de prueba

Posteriormente al aprendizaje, se evaluó el modelo, en esta prueba se consideró el conjunto de datos CK+. De este *dataset* se tomó el 20% de los datos para probar nuestro clasificador.

ISSN en trámite

5. EXPERIMENTACIÓN

En este apartado se presentan los resultados de precisión que obtuvo cada clasificador, ver la Tabla 5 y la comparación con otros trabajos similares ver Tabla 6.

J. Métricas

Las métricas que se evaluaron en este experimento fueron *precisión, Recall y F1-Score*. En las Tablas de la 2 a la 4 se presentan los resultados de las métricas mencionadas, obtenidas por cada emoción por cada algoritmo evaluado y en la tabla 5 se presenta el porcentaje de precisión de cada algoritmo.

Tabla 2 Métricas del Algoritmo MSV.

Emoción	Precisión	Recall	F1-Score
Felicidad	0.96	0.92	0.94
Enojo	0.71	0.62	0.67
Sorpresa	0.91	1.00	0.95
Neutral	0.76	0.79	0.78

Tabla 3 Métricas del Algoritmo Random Forest.

Emoción	Precisión	Recall	F1-Score
Felicidad	1.00	0.88	0.93
Enojo	0.57	0.75	0.65
Sorpresa	0.97	0.95	0.97
Neutral	1.00	0.74	0.72

Tabla 4 Métricas del Algoritmo KNN.

Emoció	Precisión	Recall	F1-Score
Felicidad	1.00	0.96	0.98
Enojo	0.80	0.50	0.62
Sorpresa	1.00	0.90	0.95
Neutral	0.67	0.92	0.77

Tabla 5 Exactitud De Cada Algoritmo.

Algoritmo	Accuracy
MSV	84.52 %
Random Forest	82.14 %
KNN	84.52 %

Tabla 6 Comparación de clasificación de emociones con base geométrica y el propuesto.

Autor	Algoritmo	Accuracy	Puntos Faciales
Dewi et al (2018)	FCM	93.67 %	44
Dewi et al (2018)	SVM	93.10%	44
M. Alvares et al (2018)	MLP	88.03 %	68
M. Alvares et al (2018)	SVM	38.46%	68
Propuesto	SVM	84.52%	17

Como se puede ver en las tablas, se obtuvieron buenos resultados con los tres algoritmos, pero, aunque se obtuvieron buenos resultados en el Accuracy en las métricas se ve realmente que algoritmo fue el mejor en la clasificación de las cuatro emociones de los tres el que mejor resultados dio en las métricas fue el clasificador con Maquina de Soporte Vectorial realizando un buen reconocimiento en cada emoción dada. El desarrollo del sistema se llevó a cabo mediante la librería OpenCV, Dlib, Sklearn, Numpy y Pandas con el lenguaje de programación Python.

Se realizó un experimento más con el procesamiento de video implementando el algoritmo de Máquina de Soporte Vectorial el cual dio el mejor resultado en las pruebas anteriores, obteniendo un buen porcentaje de reconocimiento para cada emoción los resultados de clasificación en un video con el porcentaje de probabilidad de reconocimiento de cada emoción, Felicidad, Enojo, Sorpresa y Neutral respectivamente se puede ver en la (Fig.9)

.

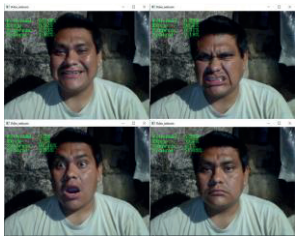


Fig. 9. Clasificación en video con el algoritmo implementado Maquina de Soporte Vectorial con los porcentajes de reconocimiento en cada emoción.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este artículo se presentó el desarrollo de un sistema de reconocimiento de emociones, mediante el análisis de expresiones faciales tomando algunos puntos de referencia del rostro. El sistema se evaluó con dos conjuntos de imágenes. El sistema presenta un buen desempeño. Sin embargo, aún hay trabajo para mejorar la precisión de reconocimiento que es del 84.52 %, para mejorar estos resultados se puede trabajar con la mejora del procesamiento de las imágenes, aplicando filtros de iluminación y contraste, realizando una alineación del rostro, obtener imágenes con una mayor nitidez y que los rostros tengan más pronunciadas las expresiones para cada emoción y aumentar el número de imágenes para cada clase. Como trabajo futuro el clasificador se implementará en una plataforma de evaluación de la experiencia del usuario denomina UXLab con la finalidad de identificar estados mentales en usuarios que participen en el proceso de evaluación de la experiencia de usurario de productos digitales.

REFERENCES

Behera Ardhendu, et al (2020, abril), International Journal of Artificial Intelligence in Education. Associating Facial Expressions and Upper-Body Gestures with Learning Tasks for Enhancing Intelligent Tutoring Systems, https://doi.org/10.1007/s40593-020-00195-2

ISSN en trámite

Cadena Moreano, J.A, La Serna Palomino, N., Llano Casa, A, C. (2019, September). A Facial recognition technique using SVM: A comparative analysis. e-ISSN: 1390-6542 / p-ISSN: 1390-9363.

Dewi, Y.L, Widyanio, M., Basaruddin, T. (2018). Geometric facial components feature extraction for facial expression recognition.

D. King, "dlib C++ Library," 2015. [Online]. Available: Www.Dlib.Net.

Hussain, J., Ali Khan, W., Hur, T., Bilal, H., Bang, J., Hassan, A. . . . Lee, S. (2018, Mayo 18). A Multimodal Deep Log-Based User Experience (UX) Platform for UX Evaluation. Sensors, 18(5). doi:10.3390/s18051622.

Jeovanny Soriano Terrazas (2018). Metodología para caracterizar e inducir estados mentales a través de realidad virtual inmersiva e interfaz cerebro computadora (Tesis de maestría). CENIDET, Morelos, México.

Joaquín A.R. (2021) Máquinas de Vector Soporte (SVM) con Python available under a Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) at https://www.cienciadedatos.net/documentos/py24-svm-python.html

James Garrett, Jesse (2011) The Elements of User Experience: User-Centered Design for the Web and Beyond, Second Edition, ISBN 13: 978-0-321-68368-7

Jain Udit, et al. (2018, mayo), 2do Congreso Internacional de Tendencias en Electrónica e Informática (ICOEI). Tirunelveli, India. Analysis of Face Detection and Recognition Algorithms using Viola Jones Algorithm with PCA and LDA. 10.1109 / ICOEI.2018.8553811

Krestinskaya, et al. (2017, septiembre 13-16). Conferencia Internacional sobre Avances en Informática, Comunicaciones e Informática (ICACCI) Udupi, India, Facial Emotion Recognition using Min-Max Similarity Classifier. IEEE. 10.1109/ ICACCI.2017.8125932

Kartali, et al. (2018, November 20-21).14th Symposium on Neural Network and Aplication (NEUREL), Belgrade, serbia real-time algorithms for facial emotion recognition: a comparison of different approaches.IEEE.

Kazemi, V, Sullivan, J. (23-28 June 2014). IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Columbus, OH, USA. One millisecond face alignment with an ensemble of regression trees. IEEE. 10.1109/CVPR.2014.241

Lucey, P., Cohn, J. F., Kanade, T., Saragih, J., Ambadar, Z., & Matthews, I. (2010). The Extended Cohn-Kanade Dataset (CK+): A complete expression dataset for action unit and emotion-specified expression. Proceedings of the Third International Workshop on CVPR for Human Communicative BehaviorAnalysis (CVPR4HB 2010), San Francisco, USA, 94-101.

Liu Xiao, Lee Kiju. (2018, August 15-17). IEEE Games, Entertainment, Media Conference (GEM), Galway, Irlanda, Optimized Facial Emotion Recognition Technique for Assessing User Experience.IEEE, 10.1109 / GEM.2018.8516518

Lacort, J. (21 agosto 2017). Las claves de los sistemas de reconocimiento facial: ¿cuál es su verdadero nivel de seguridad? Recuperado el 2 de junio del 2020 de https://www.xataka.com/seguridad/las-claves-de-los-sistemas-de-reconocimiento-facial-cual-es-su-verdadero-nivel-de-seguri

Michael J. Lyons, Shigeru Akamatsu, Miyuki Kamachi, Jiro Gyoba. Coding Facial Expressions with Gabor Wavelets, 3rd IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition, pp. 200-205 (1998). http://doi.org/10.1109/AFGR.1998.670949 Open access content available at: https://zenodo.org/record/3430156

M. Alvarez V, et al. (2018, August 22-24). Conferencia Internacional sobre Investigación en Inteligencia y Computación en Ingeniería (RICE), San Salvador, El Salvador, Facial Emotion Recognition: A Comparison of Different Landmark-Based Classifiers. IEEE. 10.1109 / ARROZ.2018.8509048

Mangal, Divya., Prajwala.(2018, Abril 3-5). International Conference on Communication and Signal Processing, Facial expression recognition by calculating euclidian distance for Eigenfaces using pca.

Nwosu, L, Wang, H., Lu, J, Unwala,I, Yang, Zhang, T.(2017, Septiembre). deep convolutional neural network for facial expression recognition using facial parts. DOI 10.1109/DASC-PICom-DataCom-CyberSciTec.2017.213

P.E Group "FACS Archives - Paul Ekman Group, LLC.," 2016 [Online]. Available: http://www.paulekman.com/product-category/facs/

Rabhi Yassine, et al. (2018, March 21-24). 4a Conferencia internacional sobre tecnologías avanzadas para el procesamiento de señales e imágenes (ATSIP), Susa, Túnez, A Real-time Emotion Recognition System for disabled persons.IEEE. 10.1109 / ATSIP.2018.8364339

Sambare, M. (2020, Julio 19). FER-2013 Learn facial expressions from an image. Version 1. https://www.kaggle.com/msambare/fer2013/metadata

Sunitha A, P. Ajay Kumar Reddy, S.Nanda Kishore3, G.N Kodanda Ramaiah (2017), Recognition of Facial Emotions Based on Sparse Coding. Journal of Engineering Research and Application, ISSN: 2248-9622.

Sawhney Shreyak, et al. (2019, January 10-11). IX Conferencia Internacional sobre Cloud Computing, Data Science & Engineering (Confluence), Noida, India, India Real-Time Smart Attendance System using Face Recognition Techniques.IEEE. 10.1109/ CONFLUENCE.2019.8776934

Sharma S., et al. (2016, mayo 25-27). Conferencia Internacional sobre Tecnologías Avanzadas de Computación y Control de Comunicaciones (ICACCCT). Ramanathapuram, India, FAREC - CNN Based Efficient Face Recognition Technique using Dlib. IEEE. 10.1109 / ICACCCT.2016.7831628

Valderrama Cárdenas, W. (2019). Reconocimiento automático del rostro para verificación de identidad para evaluación en línea (tesis de maestría). Morelos, México: CENIDET.

ISSN en trámite

Adaptación de una métrica orientada a objetos hacia Microservicios

Iván Daniel Joya de la Cruz*. Juan Carlos Rojas Pérez*. Olivia Fragoso Díaz*

**Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, C.P. 62490, México.*
(e-mail:{ m20ce039, juan.rp, olivia.fd }@cenidet.tecnm.mx).

Abstract: Las arquitecturas de software han evolucionado en las últimas décadas, en general de arquitecturas monolíticas hacia las orientadas a servicios, en este proceso de transición los mecanismos para evaluar la calidad de arquitecturas previas a la de microservicios requieren de cambios para su aplicación. En este trabajo se presenta un estudio de las métricas utilizadas en arquitecturas orientadas a objetos para su adaptación hacia microservicios. El resultado fue la adaptación de la métrica RFC (Response For a Class) a través de la creación de las métricas RSM (Respuestas para Solicitudes de Microservicio), NIU (Número de Interfaces Utilizadas) y NO (Número de Operaciones). Las métricas fueron probadas en repositorios de microservicios, con la ejecución de seis casos de prueba, obteniendo resultados que muestran el grado de complejidad contenido en la comunicación de los microservicios y el entendimiento en su funcionamiento interno.

Keywords: microservicios, granularidad, métricas para microservicios.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de software hoy en día requiere del uso de nuevas tecnologías, paradigmas y metodologías que contribuyan a obtener mejor software (Taibi, Kari, 2019). Se han propuesto cambios y mejoras en las arquitecturas para desarrollar sistemas de software, en general pasando de las monolíticas hacia las orientadas a servicios (SOA).

Bandeira, Medeiros y Paixao (2019) describen que la arquitectura monolítica se construye como una unidad lógica única, compartiendo recursos (memoria, bases de datos, archivos). Entre algunos de los problemas presentados por esta arquitectura se encuentran: la dificultad en su mantenimiento y evolución y alta dependencia de sus componentes, ya que cualquier cambio en el monolito requiere reiniciar toda la aplicación, limites en la escalabilidad, los módulos no pueden ejecutarse independientemente (Dragoni, Dragoni, Giallorenzo, Lluch, Mazzara, Montesi, Mustafin, Safina 2017).

Por otro lado, SOA resuelve la complejidad de sistemas grandes y complicados. SOA divide las aplicaciones en conjuntos de aplicaciones que ofrecen servicios a través de diferentes protocolos (Taibi, 2017).

Dentro de las arquitecturas SOA, los microservicios y las Arquitecturas de Microservicios (MSA) surgen como un estilo arquitectónico novedoso para desarrollar aplicaciones. MSA se compone de una sola aplicación como una colección de servicios independientes, bien definidos e intercomunicados (Bandeira, Medeiros, Paixao, 2019; Di Francesco, Lago y Malavolta, 2019). Entre las propiedades que hacen a los microservicios diferentes de otras arquitecturas se pueden listar: autonomía, aislamiento, elasticidad, resistencia y receptividad (Taibi, 2017). Sin embargo, como un estilo arquitectónico emergente, existen algunos problemas, tanto para investigadores como para profesionales. Ulander (2017) describe que pueden estar relacionados con una confusa visión de las soluciones existentes, la falta de comprensión de la transición y los principios y actividades que implican este tipo de arquitecturas, tales como el diseño y evaluación de los servicios que la componen (Di Francesco, Lago y Malavolta, 2019).

En el proceso de transición hacia arquitecturas de microservicios, las métricas constituyen medidas que permiten evaluar objetivamente la calidad arquitectónica de los microservicios. Las métricas proporcionan a desarrolladores y arquitectos de software indicadores claros de deficiencias y errores, así como mejoras y atributos de calidad en que deben enfocarse (Ulander, 2017).

Las métricas orientadas a objetos (OO) no son completamente aplicables a arquitecturas SOA. Las razones son las características arquitectónicas, por ejemplo, la comunicación

ISSN en trámite

entre los componentes. En las arquitecturas monolíticas la comunicación se lleva a cabo dentro de un mismo entorno de ejecución, es decir, un solo equipo. En MSA, se lleva a cabo entre diferentes entornos, incluso bajo diferentes tecnologías. La mayoría de estas métricas podrían ser aplicables a microservicios con algunas modificaciones (Ulander, 2017).

Este trabajo de investigación propone la selección y adaptación de una métrica OO hacia una arquitectura de microservicios, analizando las métricas propuestas por Chidamber y Kemerer (1994), Lorenz y Kidd (2018) y Abreu y Melo (1996); La razón de utilizar las métricas propuestas por estos autores, se debe a su utilización por más de dos décadas, siendo aceptadas por la comunidad científica y contar con múltiples estudios.

De las métricas analizadas se seleccionó para su adaptación la métrica Response For a Class (RFC), considerando en este análisis los enfoques estructurales y de comportamiento en una arquitectura de microservicios. Los enfoques estructurales capturan la topología y/o las dependencias entre las unidades de construcción de la arquitectura de microservicios. Los enfoques conductuales capturan las acciones de estas unidades en varios escenarios en tiempo de ejecución en los que opera el microservicio modelado (Hassan, Bahsoon y Kazman, 2020). Cubrir ambos aspectos para modelar una arquitectura, aborda uno de los problemas fundamentales, la transición a arquitecturas de microservicios.

2. ADAPTACIÓN DE LA MÉTRICA

En este trabajo, la metodología para adaptar una métrica orientada a objetos hacia una arquitectura de microservicios consiste de tres actividades principales: a) análisis de la arquitectura, b) identificación de las métricas y c) adaptación de la métrica, las cuales se describen a continuación.

2.1 Análisis de la arquitectura

La arquitectura de microservicios muestra características distintivas de otras arquitecturas, como el tamaño, autonomía, organización, escalabilidad, disponibilidad y libertad tecnológica. El tamaño de un microservicio es una característica difícil de definir, es decir, ¿Qué tan grande o pequeño debe ser un microservicio? El uso idiomático de la arquitectura de microservicios sugiere que, si un servicio es demasiado grande, debe dividirse en dos o más servicios, preservando así la granularidad y manteniendo el enfoque de proporcionar solo una capacidad empresarial (Asik, Selcuk, 2017).

La granularidad de los microservicios influye en la calidad del servicio debido a que depende en gran medida de la responsabilidad y capacidad empresarial del servicio. En la mayoría de los casos puede resultar difícil medir directamente algunas características. Para medir la calidad del servicio en una arquitectura MSA, es importante definir que atributos de calidad están directamente relacionados con la granularidad. Por ello se definieron las características que en conjunto puedan describir la granularidad, entre estas características se pueden listar: rendimiento, fiabilidad, escalabilidad, mantenibilidad y complejidad (Dragoni, Dragoni, Giallorenzo, Lluch, Mazzara, Montesi, Mustafin, Safina, 2017).

Se puede decir que cuando se habla de granularidad de microservicios, se habla de complejidad. Hassan, S., Bahsoon, R. y Kazman, R. (2020) describen atributos de calidad que se deben consideran al razonar sobre la granularidad de los microservicios, por ejemplo, la complejidad. Minimizar la complejidad implica seguir 2 principios de diseño cruciales: acoplamiento estrecho y/o baja cohesión. Esto se puede medir en términos de comunicación.

En esta investigación se seleccionó la característica de *complejidad.* La complejidad es un atributo relacionado con la arquitectura de microservicios, ya que por su definición “Es el grado en el que el diseño o el código de un sistema es difícil de entender debido a los numerosos componentes o relaciones entre los componentes” (IEEE, 2010), está directamente relacionado con el tamaño y la comunicación entre microservicios. Por esta razón se identifica una métrica para su adaptación a microservicios definido en la siguiente sección.

2.2 Identificación de las métricas

Existe un gran número de métricas que se han propuesto para medir varios aspectos de calidad interna (estructurales) del software, como el acoplamiento, cohesión y complejidad (Bogner, Wagner y Zimmermann, 2017), por ello, para reducir la lista de métricas que se pueden adaptar para una arquitectura MSA, se definió una lista de criterios:

- Atributo estructural: La métrica debe medir un atributo estructural. Los atributos estructurales se refieren a qué tan bien está desarrollado el software, como son: acoplamiento, cohesión y complejidad.
- Granularidad: La métrica debe medir atributos relacionados directamente con la granularidad de microservicios, como es la complejidad.
- Aplicación: La métrica debe ser aplicable a un microservicio, es decir, debe considerar las características de estos.
- Complejidad: La métrica debe contar con suficiente información de su definición, utilización, pruebas y resultados.

El proceso de selección de métricas se llevó a cabo en tres etapas. En la primera etapa se seleccionaron todas las métricas definidas para arquitecturas orientadas a objetos. En la segunda etapa se seleccionaron las métricas relacionadas con algún atributo estructural. En la tercera etapa se seleccionaron aquellas métricas que cumplieran con el criterio de granularidad, considerando su

ISSN en trámite

definición, pruebas y resultados. La lista de métricas seleccionadas se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Métricas seleccionadas

Métrica	Descripción
WMC	Weighted Methods per Class
DIT	Depth of Inheritance Tree
NOC	Number of Children
LCOM	Lack of Cohesion in Methods
CBO	Coupling Between Objects
RFC	Response For a Class
NCR	Number of times a Class is Reused
CF	Coupling Factor

Como resultado final se seleccionó la métrica "Response For a Class (RFC)" de Chidamber y Kemerer (1994).

2.3 Adaptación de la métrica

Chidamber y Kemerer (1994) describen la base teórica para las métricas de Diseño Orientado a Objetos (DOO). En donde RFC tiene como base el uso de métodos como medidas de comunicación. RFC cuenta las ocurrencias de llamadas a otras clases de una clase en particular.

$$RFC = |RS|$$

donde,

RS es el conjunto de respuestas para la clase.

En el enfoque orientado a objetos, los objetos se comunican principalmente a través del paso de mensajes. Un mensaje puede hacer que un objeto se "comporte" de una manera particular al invocar un método particular. Los métodos pueden verse como definiciones de respuestas a posibles mensajes. Por lo tanto, es razonable definir un conjunto de respuestas para una clase de objetos de la siguiente manera:

> Conjunto de respuestas de una clase de objetos = { Conjunto de todos los métodos que se pueden invocar en respuesta de un mensaje a un objeto de la clase }

Considerando la definición teórica de RFC, se planteó el mismo objetivo de medición en el contexto de microservicios. En la comunicación entre servicios (Fig. 1) se consideraron todas las interfaces por las que se puede realizar una petición a un servicio. Asik y Selcuk (2017) presentan una forma de definir las solicitudes recibidas por un servicio y un método que maneja las solicitudes recibidas a un servicio identificado por un URI. Por lo tanto, podemos plantear el conteo de interfaces como:

> Conjunto de interfaces de un microservicio = { El conjunto de todas las solicitudes recibidas por un servicio identificado por un URI }

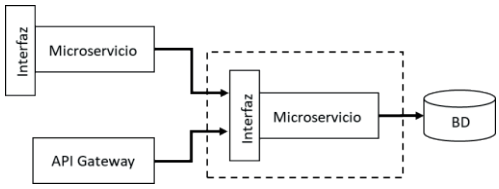


Fig. 1. Comunicación y estructura de un microservicio

Por otro lado, la realización de una solicitud debe resolverse ejecutando diferentes operaciones. Una forma de definir el número de operaciones realizadas para responder una solicitud es identificar el número de métodos/clases ejecutadas (Fig. 2). Por lo tanto, podemos plantear el número de operaciones a realizar por solicitud de la siguiente forma:

> Conjunto de operaciones por solicitud = { El conjunto de todos aquellos métodos ejecutados para resolver una petición a través de una interfaz }

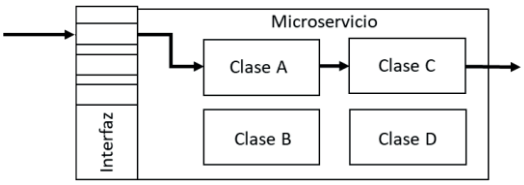


Fig. 2. Solicitud a un microservicio

La adaptación de la métrica Response For a Class (RFC) (Chidamber y Kemerer, 1994) se realizó con base a las similitudes en sus características con microservicio: solicitudes, respuestas y métodos utilizados en la comunicación, con lo que se buscó medir las Respuestas en la Arquitectura del Microservicio.

- Respuestas para Solicitudes a Microservicios (RSM)

El valor de Respuestas para Solicitudes de Microservicio está dado por la suma de los sub-atributos que la componen, estos son: número de interfaces utilizadas y número de operaciones. El cálculo de su valor esta expresado en la ecuación (1).

$$RSM = NIU(valor) + NO(valor) \qquad (1)$$

En donde:

RSM = Respuesta para solicitudes de microservicios.
NIU = Número de interfaces utilizadas.
NO = Número de Operaciones.
Valor = El valor especificado en la Tabla 1.

Los valores en los límites que puede tener cada variable de *RSM*, están dados en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores aceptados por RSM

No.	Variable	Valor
1	*NIU*	0.5
2	*NO*	0.5

ISSN en trámite

El peso asignado a cada sub-atributo es de 0.5. El cálculo de la métrica está determinado por un umbral de 0 a 1, donde, si el valor tiende a 1, la complejidad en la comunicación del microservicio será mucho menor, de lo contrario, si el valor tiende a 0, el microservicio presenta una alta complejidad en su comprensión y comunicación.

La razón del peso asignado a cada sub-atributo se debe a que no existe investigación previa ni pruebas preexistentes que indiquen cual sub-atributo es más importante, por lo que en esta investigación se les considera con el mismo peso, mismo que podrá ser modificado al obtener resultados de pruebas.

El método para calcular cada uno de los sub-atributos utilizados en la ecuación (1) es explicado en los siguientes puntos.

- Número de Interfaces utilizadas *(NIU)*

Esta métrica mide el número de interfaces *i* definidas en un microservicio *m*, por las que se pueden realizar solicitudes.

El valor del atributo *NIU* está dado por la división del número de Interfaces accedidas entre el número de interfaces totales. El cálculo de su valor está expresado en la ecuación (2).

$$NIU = \frac{NIA}{NIT} \qquad (2)$$

En donde:

NIU = Número de interfaces utilizadas.
NIA = Número de interfaces accedidas.
NIT = Número de interfaces totales.

Los valores para cada variable se describen en la Tabla 3.

Tabla 3. Valores aceptados por NIU

Variable	Descripción
NIA	El número de interfaces que son utilizadas es mayor a 0.
NIT	El número de interfaces definidas en un microservicio es mayor a 0.

El cálculo de la métrica está determinado por un umbral de 0 a 1, en donde, el peor valor tiende a 0, lo que indicaría que el microservicio no se está comunicando con otros componentes.

- Número de Operaciones (*NO*)

Esta métrica mide el número de operaciones *o* realizadas para resolver una solicitud *s* realizada a un microservicio *m*.

El valor del atributo está dado por la división del número de operaciones utilizadas entre el número de operaciones totales. El cálculo de su valor esta expresado en la ecuación (3).

$$NO = \frac{MU}{MT} \qquad (3)$$

En donde:

NO = El número de operaciones.
MU = Las operaciones que son utilizadas
MT = El número de operaciones totales.

Los valores para cada variable se describen en la Tabla 4.

Tabla 4. Valores aceptados por NO

Variable	Descripción
MU	El número de operaciones que son utilizadas es mayor a 0.
MT	El número de operaciones definidas en un microservicio es mayor a 0.

El cálculo de la métrica está determinado por un umbral de 0 a 1, en donde, el peor valor tiende a 0, lo que indicaría que el microservicios utiliza/realiza operaciones cuando resuelve una petición.

3. RESULTADOS

Las pruebas a las métricas se realizaron de forma manual, para tal fin se desarrolló un plan de pruebas con el propósito de comprobar que las métricas cumplieran con su definición.

Se planteó que, del número total de microservicios evaluados, el 100% estuviese arriba del 0.5 para la métrica NIU, el 50% arriba del 0.5 para la métrica NOC y más del 50% arriba del 0.5 para RSM. Esto se determinó con base al número de actualizaciones y correcciones realizadas a los repositorios de prueba.

Tabla 5. Valores esperados

Métrica	Peor Valor	Mejor valor	Esperado
RSM	0	1	1
NIU	0	1	1
NO	0	1	1

Las pruebas se aplicaron a repositorios obtenidos en la red, los cuales fueron replicados en un entorno controlado. Las pruebas se identifican por la nomenclatura MMic-(Métricas para Arquitecturas Orientadas a Microservicios) CP-(Caso de prueba) XX(Número de prueba). El caso de prueba MMic-CP-01 corresponde a un microservicio con la capacidad de procesar la información de un contacto (agenda) y almacenarla en una base de datos (Contacts, 2017). MMic-CP-02 corresponde al microservicio Movies, encargado de realizar consultas del catálogo, así como de generar sus horarios, salas y precios (Ramírez, 2017). MMic-CP-03 corresponde al microservicio Notifications, encargado de realizar notificaciones a través de correo electrónico enviando a los clientes la información de sus boletos de cine (Ramirez, 2017). MMic-CP-04 corresponde al

ISSN en trámite

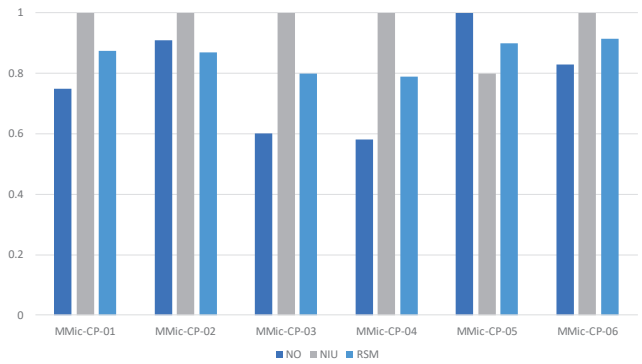
microservicio Travel Plan, encargado de realizar consultas del catálogo de trenes y filtrar diferentes tipos de viajes (Train Ticket, 2018). MMic-CP-05 corresponde al microservicio Routes, encargado de realizar consultas del catálogo de rutas y registrar, eliminar o modificar rutas de los diferentes trenes (Train Ticket, 2018). MMic-CP-06 corresponde al microservicio Food, encargado de administrar órdenes de comida en los viajes y crear, eliminar o buscar órdenes (Train Ticket, 2018).

En la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos en algunos casos de prueba. Los valores obtenidos se mantuvieron dentro de los umbrales definidos (0 a 1), por lo que se determinó como exitosa cada una ellas.

Tabla 1. Resultados de los casos de prueba

Caso de prueba	Métrica/Valor		
	NO	***NIU***	***RSM***
MMic-CP-01	0.75	1	0.875
MMic-CP-02	0.91	1	0.87
MMic-CP-03	0.6	1	0.8
MMic-CP-04	0.58	1	0.79
MMic-CP-05	1	0.8	0.9
MMic-CP-06	0.83	1	0.915

Los valores calculados en los diferentes casos de prueba se encuentran en ambos extremos de los umbrales.



Gráfica 1. Comparativa de los resultados

Los valores obtenidos para la métrica *NO* que se muestran en la gráfica 1, representan el comportamiento de los microservicios en relación a las operaciones utilizadas para resolver peticiones. La gráfica muestra que de todos los casos de prueba, el caso MMic-CP-05 tiene el valor más alto para esta métrica, esto significa que utiliza la totalidad de los métodos definidos en el microservicio para resolver peticiones, por lo que su granularidad es la adecuada para solventar su capacidad empresarial. Para los casos con los valores más bajos, MMic-CP-03, MMic-CP-04 y MMic-CP-01 se aprecia una calidad baja en su definición, por lo que aún se puede mejorar reestructurando/eliminando todos aquellos métodos que se encuentran sin utilizar cuando se resuelven peticiones. Por último existe un caso en particular, MMic-CP-02, que si bien el valor calculado no es el más alto, indica que el microservicio requiere una modificación mínima.

Los valores obtenidos en la métrica *NIU* que se muestran en la gráfica 1, describen el comportamiento de los microservicios en relación al número de interfaces utilizadas para realizar peticiones. La gráfica muestra que la mayoría de los casos de prueba utilizan en su totalidad las interfaces definidas en el microservicio, esto significa que la comunicación y utilización del microservicio está respondiendo exactamente a su capacidad empresarial y apoyando una granularidad adecuada para solventar solicitudes.

El caso MMic-CP-05, presenta un valor fuera de lo esperado a diferencia de los demás, su valor de 0.8 significa que dentro de la definición del microservicio las interfaces de acceso son excedidas de su capacidad empresarial, es decir, hay interfaces que en ningún momento son accedidas, en la gráfica 1 observamos que para este caso el valor obtenido para *NO* fue el mejor en comparación con el de *NIU*, que fue el peor valor. Por lo que, se puede hablar de una reestructuración en su comunicación.

Por último, los valores obtenidos para la métrica RSM muestran el grado de complejidad contenido en la comunicación de los microservicios. Los casos de prueba MMic-CP-05 y MMic-CP-06 tienen los valores más altos, nos dice que existe un menor grado de complejidad en contestar solicitudes. Y con ello se da respuesta a la pregunta de la sección 2.1, la granularidad que debe tener un microservicio de acuerdo a su capacidad empresarial. Mientras que en los casos restantes, su valor demuestra servicios con una definición desproporcionada, es decir, con más funcionalidad de la que necesita para solventar solicitudes.

Las métricas muestran una idea más precisa del estado de los microservicios en un sistema, sin embargo, existen factores que no fueron considerados en su desarrollo, por ejemplo: el código autogenerado por las herramientas de desarrollo, métodos reutilizados, clases auxiliares y llamadas externas para resolver solicitudes en conjunto, que podrían incluirse después de aplicar pruebas más extensas.

4. CONCLUSIONES

La arquitectura de microservicios es sin duda un tema de investigación creciente en los últimos años. Muchos puntos de vista se han presentado en múltiples publicaciones en diferentes plataformas, muchas de ellas han ayudado a comprender el funcionamiento, adopción y transición hacia esta arquitectura.

La adaptación de la métrica RFC se realizó satisfactoriamente con un resultado de tres métricas que en conjunto miden el grado de complejidad en la comunicación de microservicios.

ISSN en trámite

En las pruebas realizadas se observó el comportamiento esperado según los umbrales definidos, es decir, la métrica nos indica un valor de complejidad en la comunicación entre microservicios. Se encontró que en el caso MMic-CP-05 se presenta un comportamiento diferente al de los otros casos sin embargo es totalmente correcto.

Por tanto, se concluye que la métrica funciona como se esperaba en cuanto a la granularidad y complejidad de los microservicios con base a los casos de prueba estudiados. Con ello se cumple el objetivo de realizar la adaptación de una métrica del modelo orientado a objetos hacia a microservicios, aportando una forma de medir la calidad de microservicios.

REFERENCIAS

Al-Debagy, O., Martinek, P., (2020) 'Extracting Microservices Candidates from Monolithic Applications: Interface Analysis and Evaluation Metrics Approach', *IEEE 15th International Conference of System of Systems Engineering*, Budapest, Hungary, 2-4 June, pp. 289-294, doi: 10.1109/SoSE50414.2020.9130466.

Asik, T., Selcuk Y., (2017) 'Policy Enforcement upon Software Based on Microservice Architecture', *IEEE SERA 2017*. London, UK.

Bandeira, A., Medeiros, C., Paixao, M., and Maia, P., (2019) 'We Need to Talk about Microservices: an Analysis from the Discussions on StackOverflow', *2019 IEEE/ACM 16th International Conference on Mining Software Repositories*, Montreal, 25-31 May, pp. 255–259.

Bogner, J., Wagner, S., and Zimmermann, A., (2017) 'Automatically Measuring the Maintainability of Service- and Microservice-based Systems - a Literature Review', *WSM/Mensura '17*, Gothenburg, Sweden, 25–27 October, https://doi.org/10.1145/3143434.3143443.

Brito e Abreu, F., Goulao M., Esteves. R., (1995) 'Toward the Design Quality Evaluation of OO Software Systems', *5th International Conference on Software Quality*, Austin, Texas, 23-26 Oct.

Brito e Abreu, F., Melo, W., (1996) 'Evaluating the impact of ObjectOriented Design on Software Quality', *3rd International Software Metrics Symposium*, Berlin, 25-26 March, pp. 90-99, doi: https://doi.org/10.1109/METRIC.1996.492446.

Chidamber, S., Kemerer C., (1994) 'A metrics suite for object-oriented design', *IEEE Transactions on Software Engineering*, vol. 20, no. 6, pp. 476-493, doi: 10.1109/32.295895.

Contacts (2017). Disponible en: https://github.com/sinbugs/blog/tree/master/contacts-ws (Consulta: 12 de septiembre de 2020).

Di Francesco, P., Lago, P., Malavolta, I., (2019) 'Architecting with microservices: A systematic mapping study', Journal of Systems and Software, vol. 150, pp. 77-97.

Dragoni, N., Giallorenzo, S., Lluch, A., Mazzara, M., Montesi, F., R. Mustafin, and Safina, L., (2017) 'Microservices: yesterday, today, and tomorrow', Present and Ulterior Software Engineering. Springer, Cham, pp. 195–216, https://doi.org/10.1007/978-3-319-67425-4_12.

H. Khazaei, C. Barna, N. Beigi-Mohammadi and M. Litoiu, (2016) 'Efficiency Analysis of Provisioning Microservices', *2016 IEEE 8th International Conference on Cloud Computing Technology and Science*, 12-15 Dec., pp. 261-268, doi: 10.1109/CloudCom.2016.0051.

Hassan, S., Bahsoon, R., Kazman, R., (2020) 'Microservice transition and its granularity problem: A systematic mapping study', *Software: Practice and Experience*, pp.1651–1681, 2020, https://doi.org/10.1002/spe.2869.

IEEE, *INTERNATIONAL STANDARD ISO/IEC/IEEE 24765*, 2010.

Lorenz, M. and Kidd. J., *Object-Oriented Software Metrics*, Prentice Hall, 2008.

Ramírez, C. (2017) Cinema Microservice . Disponible en: https://github.com/Crizstian/cinema-microservice (Consulta: 15 de octubre de 2020).

Santos, N. and Silva, A., (2020) 'A Complexity Metric for Microservices Architecture Migration', *2020 IEEE International Conference on Software Architecture (ICSA)*, pp. 169-178, doi: 10.1109/ICSA47634.2020.00024.

Taibi, D., Kari, S., (2019) 'A Decomposition and Metric-Based Evaluation Framework for Microservices', *Cloud Computing and Services Science*, pp.133-149.

Taibi, D., Lenarduzzi, V., Pahl, C., Janes, A., (2017) 'Microservices in Agile Software Development: A Workshop-Based Study into Issues Advantages and Disadvantages', *the XP2017 Scientific Workshops*, Germany, 22-16 May, pp 1-5, doi: https://doi.org/10.1145/3120459.3120483

Taibi, D., Systä, K., (2019) 'From Monolithic Systems to Microservices: A Decomposition Framework based on Process Mining', *9th International Conference on Cloud Computing and Services Science*, vol. 1, pp. 153-164.

Train Ticket (2018). Disponible en: https://github.com/hechuan73/train_ticket (Consulta: 26 de noviembre de 2020).

Ulander, D., (2017) *Software architectural metrics for the scania internet of things platform: from a microservice perspective*, Master thesis, Uppsala universited, Available at: https://www.divaportal.org/smash/get/diva2:1115342/FULLTEXT01.pdf, (Accessed: 14 October 2020).

ISSN en trámite

Patrones de comportamiento ocular durante inducción emocional en diferentes intensidades

Derick A. Lagunes-Ramírez *, Gabriel González-Serna*, Leonor Rivera-Rivera **

** Departamento de Ciencias Computacionales, TecNM/CENIDET, Cuernavaca, Morelos México (Tel: +52 777 3637770; e-mail: d18ce078@cenidet.tecnm.mx, gabriel.gs@cenidet.tecnm.mx).*

*** Centro de Investigación en Salud Poblacional, Instituto Nacional de Salud Pública, Cuernavaca, Morelos México (e-mail: lrivera@insp.mx).*

Resumen: En este trabajo se analizan datos del comportamiento ocular de usuarios que participaron en un proceso de inducción emocional en laboratorio, se busca obtener información útil para aplicaciones de cómputo afectivo a través de sensores de seguimiento ocular. Los datos fueron extraídos utilizando un sensor de seguimiento ocular infrarrojo y la plataforma de grabación multimodal UXLab. El experimento se realizó con un paradigma de visualización libre con estímulos emocionales clasificados en positivos, neutrales y negativos. Se obtuvieron datos del seguimiento ocular de los participantes como: Puntos de visión, fijaciones, sácadas y áreas de interés, estos se analizaron mediante técnicas de visualización de datos del seguimiento ocular como mapas de calor y mapas de rutas. Se encontraron algunos patrones de comportamiento ligados al tipo de estímulos que se indujeron en los usuarios y patrones generales. Se concluye que el seguimiento ocular puede lograr brindar información relevante para aplicaciones de cómputo afectivo que utilicen contexto a partir del usuario como sus emociones.

Palabras clave: Computo afectivo, seguimiento ocular, patrones de comportamiento.

1. INTRODUCCIÓN

En el contexto del cómputo afectivo se busca desarrollar sistemas computacionales capaces de identificar, procesar y responder al comportamiento de los humanos. Hablamos de estados afectivos que se pueden clasificar en emociones y sentimientos (Soriano Terrazas, 2018). Las emociones son reacciones bioquímicas y eléctricas ante un estímulo emocional que alteran el estado físico de una persona (Farnsworth, 2020). Mientras que, los sentimientos son provocados por las emociones y moldeados por experiencias personales, creencias, recuerdos y pensamientos vinculados a esa emoción en particular, por lo que el sentimiento es la experiencia consciente de una reacción emocional propia de una persona (Farnsworth, 2020). En otras palabras, un sentimiento es el producto secundario del cerebro que percibe una emoción y le asigna un cierto significado (LeDoux, 2012).

Cada vez es más común observar como la tecnología se va entrelazando en nuestras vidas diarias ofreciendo herramientas u opciones personalizadas a cada usuario. Esto se debe principalmente al uso de técnicas de obtención del contexto del usuario como las páginas web que visita, los temas que le interesan y las aplicaciones que utiliza con más frecuencia. En el futuro se comenzará a implementar de manera similar el contexto emocional del usuario, mediante análisis de emociones con el rostro, voz y mediante sensores fisiológicos, se podrá ofrecer características mucho más personalizadas a los usuarios de acuerdo con su estado afectivo (Märtin et al., 2021).

Estos algoritmos permitirán a las aplicaciones de aprendizaje adaptar sus contenidos al estado de ánimo de los alumnos para lograr un método de enseñanza más dinámico y efectivo (Wang & Lin, 2018). Además, el contenido dinámico en función de los estados mentales podría ayudar a controlar los síntomas de personas con problemas mentales como la depresión y la ansiedad (Vazquez et al., 2016).

Para obtener el contexto afectivo del usuario, existen diferentes técnicas como en el trabajo de Kratzwald et al. (2018) donde la predicción emocional se realiza utilizando análisis de la escritura o el análisis de características del cuerpo humano a través de sensores, por ejemplo: Electroencefalograma (EEG), Electrocardiograma (ECG), respuesta galvánica en la piel (GSR), seguimiento ocular (Eye-tracking), entre otros.

Hoy en día la tecnología de seguimiento ocular es más accesible que nunca gracias a la simplificación de sensores y a la mejora de las cámaras digitales, esto ha aumentado la precisión y la usabilidad de los sensores de seguimiento ocular (Ho, 2014).

ISSN en trámite

Esto ha permitido que las investigaciones con técnicas de Eye-tracking aumenten de manera significativa.

El seguimiento ocular permite analizar el movimiento de los ojos mientras el usuario observa estímulos visuales, como por ejemplo: imágenes, videos, aplicaciones móviles o de escritorio, páginas web o cualquier objeto convencional. El análisis de las características oculares (pupila, fijaciones, sácadas y parpadeos), proporciona información sobre el estado afectivo, el comportamiento y la atención de los usuarios. Los estudios del seguimiento pueden proporcionar una forma natural y eficiente de observar el comportamiento de los usuarios (Lu et al., 2015).

En este trabajo se presentan los resultados de un experimento de inducción emocional utilizando seguimiento ocular y estímulos en imágenes de los repositorios: International Affective Picture System (IAPS) (Lang et al., 2008) y Open Affective Standardized Image Set (OASIS) (Kurdi et al., 2016). El objetivo principal del presente estudio fue analizar los patrones de comportamiento que presentan los usuarios al inducir estímulos emocionales positivos, negativos y neutrales, prestando especial atención al comportamiento ocular mediante el análisis de métricas de sensores de seguimiento ocular. Los patrones de comportamiento identificados en esta investigación podrían utilizarse en aplicaciones de cómputo afectivo para identificar el estado afectivo de las personas, básicamente analizando el movimiento de sus ojos.

2. MÉTODOS

2.1 Participantes

Se seleccionaron a 12 personas que no mostraron síntomas de ansiedad ni depresión al responder el cuestionario PHQ9 (Kroenke et al., 2001) y el cuestionario STAI (Spielberger et al., 1983). Además, cada usuario respondió un cuestionario de perfil sociodemográfico y firmó un consentimiento donde se explica el procedimiento de las pruebas en el laboratorio. Para realizar el estudio se analizaron los datos de comportamiento de los 12 participantes (Media de edad = 27.75, Desviación estándar = 4.76), siendo 6 hombres y 6 mujeres estudiantes de posgrado y con conocimientos avanzados en el uso de tecnología. Ningún participante reportó tener algún impedimento visual.

2.2 Aparatos

Para el experimento se utilizó un sensor de seguimiento ocular de tecnología infrarroja, el cual procesa la reflexión de la luz infrarroja en la pupila del usuario, esta reflexión es registrada por el sensor y calcula la posición, en coordenadas (x, y), del punto que representa la mirada del usuario en el plano espacial de la pantalla.

Adicionalmente, para obtener la mayor cantidad de datos posibles de las pruebas y posteriormente realizar más investigaciones sobre el comportamiento, se utilizó una cámara web con micrófono para tomar video y audio del durante el proceso de inducción. Además, se utilizaron sensores fisiológicos como una diadema para registrar datos EEG Emotiv®, sensores de ECG y GSR Seeed Studio® y MySignals® con una placa *shield* para Arduino®. Todo el hardware utilizado en las pruebas es compatible con la herramienta de extracción de datos UXLab.

2.3 Herramientas de extracción de datos

Para grabar datos se utilizó la herramienta UXLab que es un producto digital resultado de la investigación de Fouilloux Quiroz (2018). UXLab utiliza algoritmos de sincronización de datos, necesarios para tomar las señales de diferentes sensores y alinear el flujo de datos durante la grabación de evaluaciones de la experiencia de usuario (UX). Con el tiempo la herramienta ha evolucionado añadiendo el trabajo de otras investigaciones que suman funcionalidades al software. La figura 1 muestra la arquitectura de 4 capas de UXLab y con líneas rojas punteadas los módulos de seguimiento ocular que se utilizaron en esta investigación.

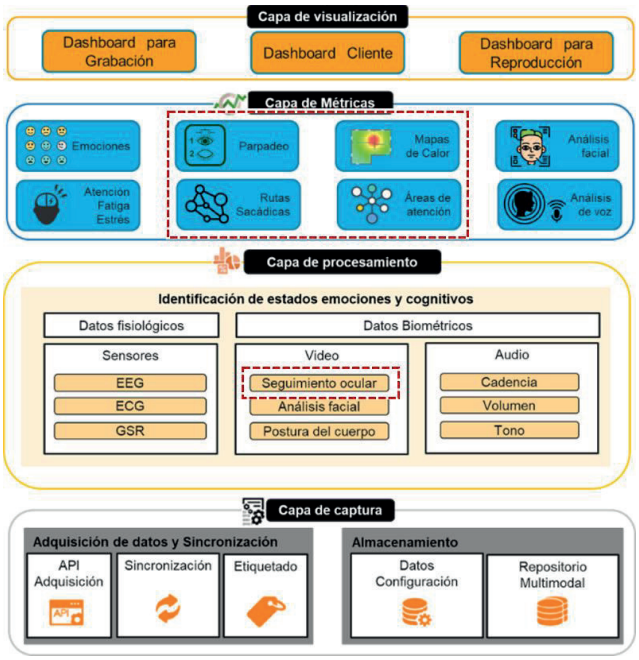


Figura 1. Arquitectura de UXLab. Fuente: UXLab Arquitectura (Diapositiva 6), de G. González, 2019, Todos los derechos reservados 2021.

UXLab permite grabar simultáneamente y de manera sincronizada diferentes sensores biométricos y fisiológicos mientras un usuario interactúa con un estímulo. Aunque UXLab contiene varias funciones de procesamiento de la información como la predicción de emociones descrita en el trabajo de Morales Morante (2020), para este investigación se utilizaron las funcionalidades de procesamiento de datos del seguimiento ocular. UXLab puede procesar las señales para indicar el nivel

ISSN en trámite

de atención del usuario, predecir emociones y generar métricas visuales como mapas de calor, mapas de rutas sacádicas y áreas de interés. Las métricas visuales permiten observar el comportamiento de los usuarios sobre los estímulos que observan.

2.4 Estímulos emocionales

Se utilizaron dos repositorios de imágenes con carga emocional: IAPS (Lang et al., 2008) y OASIS (Kurdi et al., 2016). El conjunto IAPS contiene estímulos en imágenes que inducen distintas emociones. Originalmente este repositorio de imágenes fue probado en países de habla inglesa pasando por una adaptación en España y fue probado en México en el trabajo de Madera-Carrillo et al. (2015). El repositorio se utiliza en el laboratorio de Sistemas Híbridos Inteligentes del TecNM/CENIDET para diferentes pruebas e investigaciones relacionadas con el computo afectivo.

Los estímulos IAPS seleccionados se tomaron en función de su intensidad desde baja hasta alta (Se clasifican los estímulos en tres dimensiones: valencia, activación y dominio), para las pruebas con IAPS fueron seleccionados cuatro estímulos de cada emoción: alegría, tristeza, neutro y ansiedad

El repositorio de imágenes OASIS cuenta con más de 900 estímulos clasificados en cuatro clases: personas, animales, objetos y escenarios. Cada uno cuenta con un valor de dos dimensiones: valencia y activación. Para el experimento con estímulos de OASIS se seleccionaron cuatro estímulos de las siguientes cinco emociones: alegría, tristeza, neutro, ansiedad y relajación (verfigura 2).

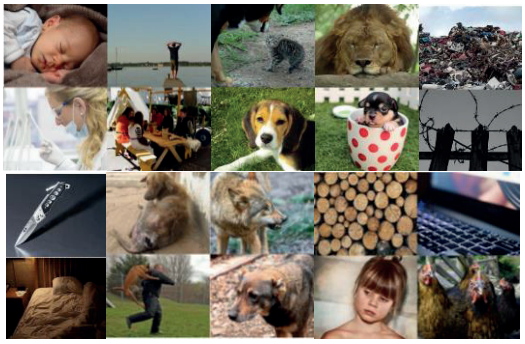


Figura. 2. Imágenes OASIS seleccionadas para la inducción.

2.5 Paradigma experimental

El experimento consistió en un ejercicio de visualización libre presentando estímulos visuales en periodos de 15 segundos mientras se graba la interacción visual del usuario con el sensor de seguimiento ocular y la plataforma UXLab, para la inducción emocional se adaptó la Metodología de Proceso de Inducción Emocional (PIE), desarrollada en Soriano Terrazas (2018), la adaptación cambia el paradigma original de realidad virtual a aplicaciones de escritorio utilizando como dispositivo de salida un monitor convencional.

El PIE se estructura en 3 etapas, la primera menciona las consideraciones iniciales que deben de tener los sujetos de prueba así como el ambiente de laboratorio ideal para la realización de grabaciones. La segunda etapa es la ejecución del ambiente de inducción donde en un principio se le dan las instrucciones de visualización al usuario y se tiene un periodo de línea base de 60 segundos donde el usuario cierra los ojos y respira profundamente con el objetivo de nivelar el estado afectivo del usuario antes de la prueba, seguido de la línea base y por cada emoción, el usuario se expone a 4 estímulos visuales durante 15 segundos: 1) Intensidad baja, 2) media, 3) alta y 4) baja para devolver al usuario a un nivel neutral. Seguido de la inducción de una emoción el usuario autoevalúa sus niveles de valencia, activación y dominio utilizando como referencia el modelo SAM (Bradley & Lang, 1994). Finalmente, por cada conjunto de una emoción el usuario tiene un descanso de 15 segundos para devolver estado afectivo a un nivel neutro base. Finalmente se mide el impacto emocional de los usuarios con el cuestionario *Positive and Negative Affect Schedule* PANAS (Watson et al., 1988).

Los tiempos utilizados en la metodología fueron adaptados del trabajo de Soriano Terrazas, 2018. Se consideran suficiente tiempo 15 segundo de exposición a los estímulos para inducir la emoción deseada, de no lograr este efecto en el usuario esto se debe principalmente a la interpretación y reacción propia de cada persona ante el estímulo.

Las pruebas de exposición a estímulos visuales se dividieron en dos grupos para el análisis del movimiento ocular del usuario: 1) Pruebas con una sola imagen emocional y 2) Pruebas con imágenes emocionales mixtas que tienen diferentes niveles de valencia y activación. Las imágenes mixtas representan una combinación de dos estímulos de las emociones: Alegría, relajación, neutro, tristeza y ansiedad, estas imágenes son ordenadas aleatoriamente de tal manera que el orden en que parecen las emociones no afecte el comportamiento visual.

2.6 Consideraciones ambientales y del área de pruebas

Se utilizó una habitación aislada de ruido e interferencias de otras personas, el usuario fue el único presente en el espacio de prueba, se buscó retirar cualquier objeto y fuente de ruido que distrajera al usuario, la temperatura ambiente fue controlada a 22°c, todos los participantes usaron la misma silla con descansabrazos y se buscó garantizar un nivel de luz apropiado y controlado.

Para la grabación y presentación de los estímulos emocionales se contemplaron las siguientes características del hardware: Se utilizó una pantalla de 32 pulgadas con una resolución de 1920 x 1080 pixeles, se ajustó y normalizó la intensidad de brillo del monitor, la distancia entre el sensor de seguimiento ocular y el usuario se definió en 90 centímetros y se aseguró que los ojos del usuario estuvieran de frente al sensor.

ISSN en trámite

3. RESULTADOS

3.1 Datos obtenidos

Las grabaciones de la plataforma UXLab dan como salida archivos de video del rostro del usuario y de la pantalla, también se generan archivos de valores separados por comas (CSV) con los datos del sensor de seguimiento ocular, estos datos son procesados por la misma herramienta para que en conjunto con el video de interacción en pantalla se generen videos de métricas oculares como: 1) Mapas de calor que representan la concentración de puntos de visión o fijaciones, 2) mapas de rutas, muestran una secuencia de fijaciones y sácadas (Holmqvist, et al., 2010) y 3) áreas de interés que identifican áreas específicas del estímulo que recibieron más atención. Estas herramientas ayudan a analizar la atención de un usuario o de un conjunto de ellos durante la interacción con estímulos de cualquier clase.

Se obtuvieron los datos demográficos de los participantes, las respuestas de evaluación de trastornos mentales y finalmente los datos de los cuestionarios SAM y PANAS para observar el efecto de los estímulos emocionales según el auto reporte del usuario. En la tabla 1 se muestran los resultados de la auto evaluación SAM para los distintos conjuntos de estímulos emocionales.

Tabla 1. Promedio de los resultados de la autoevaluación SAM para todos los estímulos.

Emoción	Valencia	Activación	Dominio
Alegría	6.58	3.83	5.83
Relajación	6.16	2.58	5.91
Neutro	5.58	2.25	6.41
Tristeza	5.41	2.75	5.75
Ansiedad	3.91	3.75	5.16
Mixto	5.08	4	5.25

Nota. En la escala SAM la valencia, activación y dominio se miden de 1 a 9 donde para la valencia 1 es un sentimiento negativo y 9 un sentimiento positivo; para la activación 1 es un impacto débil y 9 es un gran impacto; para el dominio 1 es muy influenciado y 9 es muy dominante.

3.2 Comportamiento observado

El análisis de los patrones oculares, utilizando mapas de calor y áreas de interés (ver figura 3), demuestra que los usuarios concentran su mirada en rostros de personas, animales y en objetos, antes que en los alrededores o en el paisaje de fondo lo cual empata bien con lo reportado en Iskra & Gabrijelčič Tomc (2016). También podemos observar que los mapas de rutas no siguen un patrón específico, no existe una ruta de exploración universal para ningún estímulo (Bojko, 2005).



Figura. 3. Algunos estímulos emocionales con métricas oculares, resultados de las pruebas.

En el estímulo de alegría solo se han notado expresiones faciales alegres o sonrisas durante la inducción, mientras que, para el estímulo de tristeza se notaron expresiones faciales tristes en la inducción y falta de movimiento corporal (ver figura 4).



Figura 4. Expresiones faciales de algunos usuarios.

Para los estímulos de tipo relajación que no contienen escenas impactantes se puede notar como los usuarios fijan su mirada en pequeños detalles como la ropa y los objetos dentro de la escena del estímulo. Durante la inducción de estímulos neutrales los usuarios realizaron algunos bostezos y se observa un aumento en la frecuencia del parpadeo, lo cual denota aburrimiento o falta de atención (Zagermann et al., 2018). Esto podría explicarse al observar que las fijaciones se encuentran esparcidas por las imágenes ya que no existe algo que capte la atención de los usuarios. Para el estímulo de ansiedad, los usuarios reportaron sentirse incomodos, el comportamiento de los usuarios durante la inducción mostró signos de nerviosismo o ansiedad como movimientos repetidos de los dedos de las manos y movimientos en las piernas.

En el análisis de los estímulos mixtos se observa que la visión de los usuarios se concentró en la parte positiva del estímulo mixto la mayor parte del tiempo (en segundos). A continuación, en la tabla 2, se analizan otros comportamientos visuales como el primer estímulo observado por el usuario y la concentración de fijaciones por sexo de los usuarios en cada emoción.

ISSN en trámite

Tabla 2. Comportamiento ocular en estímulos mixtos.

Estimulo	Primera fijación	Concentración de fijaciones	
		Hombres	Mujeres
Alegría-Neutro	50-50	50-50	Neutro
Alegría-Relajación	Alegría	Alegría	Alegría
Alegría-Ansiedad	Alegría	Alegría	Ansiedad
Alegría-Tristeza	Alegría	50-50	Alegría
Tristeza-Neutro	Tristeza	Neutro	Neutro
Ansiedad-Tristeza	Tristeza	50-50	Tristeza
Ansiedad-Relajación	50-50	Relajación	Ansiedad
Tristeza-Relajación	Tristeza	50-50	Tristeza
Tendencia	Equilibrado	Mayormente positivo	Mayormente negativo

Nota. 50-50 = Empate entre las dos emociones del estímulo mixto.

Se observa que no hay una tendencia clara para la primera fijación, no parece importar si la emoción es positiva o negativa para que el usuario comience a escanear el estímulo mixto. Por otro lado, se puede observar una tendencia por visualizar más los estímulos positivos en hombres, y lo contrario para las mujeres quienes tienden a observar más los estímulos negativos, esto puede reforzar lo establecido en la literatura donde se ha encontrado que las mujeres tienden a presentar mayores síntomas de depresión que se presenta por el aumento de atención a lo negativo como se describe en Suslow et al. (2020).

3.3 Discusión

Los resultados de la autoevaluación SAM muestran que la valencia corresponde a la mayoría de las emociones inducidas, teniendo una valencia mayor a 5 en las emociones positivas y menor a 5 en las negativas. Sin embargo se puede notar que los estímulos clasificados como tristeza no se percibieron con un sentimiento negativo. De la misma manera que los estímulos mixtos se percibieron con un sentimiento de neutralidad. En la dimensión de la activación y dominio se muestra que los estímulos no tuvieron un gran impacto en los usuarios por lo que en trabajos futuros se debería reconsiderar la elección de estímulos emocionales. Se recomendaría realizar un estudio con una muestra de sujetos de prueba donde se evalúen las características de valencia, activación y dominio de los estímulos emocionales utilizando la escala SAM antes de ser usados en el experimento.

La muestra de usuarios presentada en este trabajo fue relativamente reducida, debido a la situación de la pandemia del Covid-19 que comenzó en el año 2020., el número de participantes disponibles para pruebas de inducción emocional se vio afectado.

Para futuras investigaciones se recomendaría usar una muestra de usuarios mayor y separar el estudio en 2 grupos uno de control para la evaluación de los estímulos emocionales y otro de experimentación para la evaluación del comportamiento con los estímulos probados.

Los participantes no reportaron incomodidad con el uso de otros sensores durante las pruebas, sin embargo es posible que el comportamiento de los usuarios se haya visto afectado debido a la sensación de tener estos aparatos en el cuerpo. Por este motivo también se recomendaría que si se busca realizar un estudio de comportamiento ocular solamente se utilicen sensores no invasivos o no vestibles que afecten el comportamiento natural de los participantes.

4. CONCLUSIONES

Las métricas visuales como mapas de calor y áreas de interés proporcionan una idea clara de qué partes de los estímulos emocionales llamaban más la atención de los usuarios. Los mapas de rutas fueron utilizados para observar la ruta que seguían los ojos de los usuarios, sin embargo, no se encontró un patrón específico ya que cada usuario seguía una ruta diferente.

Se pueden hacer varias conclusiones sobre el comportamiento de los sujetos de prueba mientras estaban expuestos a estímulos de imágenes: 1) El 100% de los usuarios comenzaron por observar los rostros de las personas o animales antes que cualquier objeto en los estímulos, 2) Aproximadamente 50% de los usuarios prefirieron observar estímulos neutros o de alegría antes de estímulos con temas de tristeza o ansiedad, 3) Las autoevaluaciones SAM del 100% de los usuarios correspondieron con el tipo de emoción que los estímulos IAPS deberían hacer sentir a los usuarios (por ejemplo, estímulos de alegría dieron como resultado un valor de casi 7 en la escala SAM) y 4) Algunos estímulos de ansiedad y tristeza, impactaron en los movimientos corporales y expresiones faciales de algunos de los usuarios expuestos (33.3%).

Finalmente, se deben mencionar las técnicas de visualización de datos oculares que permiten a los investigadores analizar a fondo los aspectos del comportamiento de las personas de manera objetiva ya que los patrones oculares dejan ver ciertas características que son incontrolables para los usuarios. Los mapas de atención y áreas de interés ayudan a analizar el aspecto

ISSN en trámite

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

REFERENCIAS

Blascheck, T., Kurzhals, K., Raschke, M., Burch, M., Weiskopf, D., & Ertl, T. (2014). *State-of-the-Art of Visualization for Eye Tracking Data* (R. Borgo, R. Maciejewski, & I. Viola (eds.)). The Eurographics Association. https://doi.org/10.2312/eurovisstar.20141173

Bojko, A. (2005). Eye Tracking in User Experience Testing: How to Make the Most of It. *Proceedings of the 14th Annual Conference of the Usability Professionals' Association (UPA). Montréal, Canada*.

Bradley, M. M., & Lang, P. J. (1994). Measuring emotion: The self-assessment manikin and the semantic differential. *Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry*, *25*(1), 49–59. https://doi.org/10.1016/0005-7916(94)90063-9

Farnsworth, B. (2020). *How to Measure Emotions and Feelings (And the Difference Between Them)*. Imotions. https://imotions.com/blog/difference-feelings-emotions/

Fouilloux Quiroz, D. E. (2018). *Método para integrar y sincronizar datos EEG y multimedia para su aplicación en el proceso de evaluación de la experiencia del usuario*. Cenidet.

Ho, H.-F. (2014). The effects of controlling visual attention to handbags for women in online shops: Evidence from eye movements. *Computers in Human Behavior*, *30*, 146–152. https://doi.org/10.1016/j.chb.2013.08.006

Iskra, A., & Gabrijelčič Tomc, H. (2016). Eye-tracking analysis of face observing and face recognition. *Journal of Graphic Engineering and Design*, *7*(1), 5–11. https://doi.org/10.24867/JGED-2016-1-005

Kratzwald, B., Ilić, S., Kraus, M., Feuerriegel, S., & Prendinger, H. (2018). Deep learning for affective computing: Text-based emotion recognition in decision support. *Decision Support Systems*, *115*, 24–35. https://doi.org/10.1016/j.dss.2018.09.002

Kroenke, K., Spitzer, R. L., & Williams, J. B. W. (2001). The PHQ-9. *Journal of General Internal Medicine*, *16*(9), 606–613. https://doi.org/10.1046/j.1525-1497.2001.016009606.x

Kurdi, B., Lozano, S., & Banaji, M. (2016). Introducing the Open Affective Standardized Image Set (OASIS). *Behavior Research Methods*, *49*. https://doi.org/10.3758/s13428-016-0715-3

Lang, P. J., Bradley, M. M., & Uthbert, B. N. (2008). *International affective picture system (IAPS): Affective ratings of pictures and instruction manual*.

LeDoux, J. (2012). Rethinking the Emotional Brain. *Neuron*, *73*(5), 1052. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2012.02.018

Lu, Y., Zheng, W.-L., Li, B., & Lu, B.-L. (2015). Combining Eye Movements and EEG to Enhance Emotion Recognition. *Proceedings of the 24th International Conference on Artificial Intelligence*, 1170–1176. http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2832249.2832411

Madera-Carrillo, H., Zarabozo, D., Ruiz-Díaz, M., & Nanclares, P. (2015). *El Sistema Internacional de Imágenes Afectivas (IAPS) en población mexicana. Autoevaluación con maniquíes y etiquetas*. https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3220.3683

Märtin, C., Bissinger, B. C., & Asta, P. (2021). Optimizing the digital customer journey—Improving user experience by exploiting emotions, personas and situations for individualized user interface adaptations. *Journal of Consumer Behaviour*, cb.1964. https://doi.org/10.1002/cb.1964

Morales Morante, J. A. (2020). *Máquina de aprendizaje para el reconocimiento de emociones mediante datos fisiológicos multimodales*. Cenidet.

Soriano Terrazas, J. (2018). *Metodología para caracterizar e inducir estados mentales a través de realidad virtual inmersiva e interfaz cerebro computadora*. Centro nacional de investigación y desarrollo tecnológico.

Spielberger, C. D., Gorsuch, R. L., Lushene, R., Vagg, P. R., & Jacobs, G. A. (1983). *Manual for the State-Trait Anxiety Inventory*. Consulting Psychologists Press.

Suslow, T., Hußlack, A., Kersting, A., & Bodenschatz, C. M. (2020). Attentional biases to emotional information in clinical depression: A systematic and meta-analytic review of eye tracking findings. *Journal of Affective Disorders*, *274*, 632–642. https://doi.org/10.1016/j.jad.2020.05.140

Vazquez, C., Blanco, I., Sanchez, A., & McNally, R. J. (2016). Attentional bias modification in depression through gaze contingencies and regulatory control using a new eye-tracking intervention paradigm: study protocol for a placebo-controlled trial. *BMC Psychiatry*, *16*(1), 439. https://doi.org/10.1186/s12888-016-1150-9

Wang, C.-H., & Lin, H.-C. K. (2018). Emotional Design Tutoring System Based on Multimodal Affective Computing Techniques. *International Journal of Distance Education Technologies*, *16*(1), 103–117. https://doi.org/10.4018/IJDET.2018010106

Watson, D., Clark, L. A., & Tellegen, A. (1988). Development and validation of brief measures of positive and negative affect: The PANAS scales. *Journal of Personality and Social Psychology*, *54*(6), 1063–1070. https://doi.org/10.1037/0022-3514.54.6.1063

Zagermann, J., Pfeil, U., & Reiterer, H. (2018). Studying Eye Movements as a Basis for Measuring Cognitive Load. *Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1–6. https://doi.org/10.1145/3170427.3188628

ISSN en trámite

Clasificación de métodos y algoritmos para la detección de caídas en adultos mayores

Angel Israel Daza-Castillo, Manuel Erazo-Valadez, Javier Ortiz-Hernández, Juan Antonio Miguel-Ruiz
Yasmín Hernández, Alicia Martínez-Rebollar
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico/CENIDET, Cuernavaca, México
m21ce007@cenidet.tecnm.mx, m20ce059@cenidet.tecnm.mx), javier.oh@cenidet.tecnm.mx, m20ce065@cenidet.tecnm.mx,
yasmin.hp@cenidet.tecnm.mx, alicia.mr@cenidet.tecnm.mx

Resumen: Aproximadamente el 30% de los adultos mayores sufren una caída por lo menos una vez al año y el 50% de esa cantidad sufrirá dos caídas. Asimismo, la cantidad de caídas que puede sufrir un adulto mayor se eleva al aumentar la edad. Las caídas tienen un alto índice de morbimortalidad y se consideran un problema importante de salud pública. Se estima que un 7% de las visitas de los adultos mayores al hospital son consecuencia de alguna caída y de estas el 40% necesitan de una hospitalización. En este artículo se presentan algunos de los principales métodos de detección y algoritmos utilizados para la detección de caídas y se efectúa un análisis de sus ventajas y desventajas. Cada uno de estos métodos y algoritmos demanda directa o indirectamente diversas capacidades de procesamiento, conectividad y almacenamiento y portabilidad y brinda diversos grados de precisión.

Palabras clave: Caídas de adultos mayores, Métodos y algoritmos de detección de caídas, Adultos mayores

1. INTRODUCCIÓN

La Organización Mundial de la Salud (OMS) define una caída como un acontecimiento involuntario que afecta a una persona que le provoca perder el equilibrio y golpear el suelo u otra superficie que lo detenga [1].

"El envejecimiento acelerado de la población ha provocado que se genere un nuevo problema de salud pública: las caídas de personas de la tercera edad" [2]. Se estima que durante un año suceden aproximadamente 37.3 millones de caídas por adultos mayores, provocando lesiones graves en las personas que las sufrieron [3].

Estudios epidemiológicos han arrojado como resultado que una de cada tres personas mayores de 65 años, sufre una caída al año y la mitad de estas personas sufre más de una [4]. Las muertes como resultado de alguna caída de adultos mayores con edad de 65 años y mayores representan tres cuartas partes de las muertes por caída en los Estados Unidos [5].

La incidencia y la gravedad de los daños provocados por las caídas aumentan de acuerdo con la edad, ya que con la edad también se ve afectado el equilibrio y la reacción de las personas de la tercera edad [6]. Las consecuencias provocadas por las caídas pueden ser físicas y psicológicas. Las consecuencias físicas más comunes son inflamaciones provocadas por el golpe y las fracturas se presentan en un 6% del total de las caídas. Mientras que las consecuencias psicológicas más comunes son la pérdida de la confianza en sí mismo y el miedo o ansiedad a sufrir de nuevo una caída [4].

Las personas de 65 años y más, son propensas a sufrir una mayor cantidad de caídas. Por cuestiones de la edad pueden presentar diversas enfermedades crónicas y/o degenerativas como lo son los problemas cardiovasculares, trastornos del sistema nervioso y la osteoporosis las cuales pueden influir en la dificultad para caminar, pérdida de equilibrio y movimiento [5], [7].

Varios estudios han demostrado que personas que consumen tres medicamentos o más, tienen mayor probabilidad de sufrir una caída [3], [4]. Los medicamentos que elevan la probabilidad de sufrir una caída en las personas de la tercera edad son los siguientes: drogas psicotrópicas, sedantes, hipnóticos, antidepresivos, benzodiazepinas y neurolépticos [5], [7].

Se han detectado una gran variedad de factores extrínsecos e intrínsecos que se han asociado a las caídas que sufre este grupo de la población. Los factores extrínsecos más comunes son los relacionados con el ambiente del hogar y los intrínsecos detectados son: las discapacidades, enfermedades crónicas agudizadas, caídas previas, cambios del cuerpo provocados por la edad y la medicación múltiple. La presencia de dos o más de estos factores está relacionado con la probabilidad de que ocurra una caída [8].

En México residen 15.4 millones de personas con una edad de 60 años o mayores, de las cuales 7.4 millones viven solas. El 41.4% son económicamente activos, mientras que el 69.4 sufre de alguna discapacidad [9].

2. SISTEMAS, MÉTODOS Y ALGORITMOS PARA LA DETECCIÓN DE CAÍDAS

En la revisión bibliográfica se clasificaron los trabajos obtenidos en tres grupos: Sistemas, Métodos o Algoritmos.

-Como Sistemas se entiende la propuesta de soluciones completas relacionadas con la atención de caídas. Estas

ISSN en trámite

soluciones generalmente presentan prototipos completos que incluyen todo el hardware y software necesario para asegurar la funcionalidad de la solución. Los sistemas propuestos se pueden basar en un. solo método o en una combinación de métodos. Asimismo, un determinado método puede ser implementado por un algoritmo o por variantes de un determinado algoritmo. Estos sistemas pueden tener asociadas a la detección de caídas diversas funcionalidades por ejemplo para notificar la caída a una tercera persona y describen con detalle los dispositivos y sistemas de comunicación utilizados.

-Como Métodos se entiende la propuesta del uso de una determinada técnica para detectar y caracterizar el fenómeno de la caída.

-Como Algoritmos se entiende la programación necesaria para implementar computacionalmente el método de detección.

Se identifican principalmente dos tipos de métodos para la detección de caídas. Cada uno de estos métodos puede tener algunas variantes.

2.1 Métodos de detección de caídas basados en monitoreo ambiental

En esta categoría se incluyen los sistemas de detección que utilizan sensores los cuales son instalados alrededor del entorno del usuario y son los encargados de monitorear las actividades que realizan las personas diariamente. Las tecnologías más utilizadas en este tipo de detectores son los sensores infrarrojos y los que utilizan cámaras para el monitoreo [10].

Ventajas:

- La persona no porta ningún tipo de dispositivo de detección de caídas, puede que incluso no se entere que está siendo monitoreada.
- Los dispositivos instalados se alimentan de manera continua, no dependen de baterías.

Desventajas

- Los muebles del lugar, personas u otros objetos pueden afectar la precisión de la detección de la caída
- Es necesario instalar diversas tecnologías para evitar puntos ciegos dentro de cada una de las habitaciones
- Costo elevado de implementación

2.2 Métodos de detección de caídas basados en dispositivos vestibles

En esta categoría se incluyen los sistemas de detección que utilizan sensores que puede llevar una persona sin afectar las actividades de la vida diaria. Estos sistemas utilizan generalmente los sensores integrados en equipos móviles tales como Smartphones, pulseras inteligentes, dispositivos portables, etc. [10]. En este estudio sólo se consideraron trabajos que utilizan como dispositivo sensor acelerómetros integrados de 2 y 3 ejes.

Ventajas:

- Se puede realizar el monitoreo en múltiples espacios, abiertos o cerrados
- Monitoreo constante en diversos espacios
- Un solo dispositivo de detección puede ofrecer un grado adecuado de precisión.
- Los muebles, personas u otros objetos no son un obstáculo para su funcionamiento.
- Al preinstalarse los sensores en la instalación puede asegurarse su suministro constante de energía eléctrica
- Pueden instalarse diversos tipos de sensores para el monitoreo

Desventajas:

- La autonomía del dispositivo depende del respaldo de la batería.
- El usuario debe de recordar colocarse el dispositivo correctamente.
- El usuario puede dañar el dispositivo voluntaria o involuntariamente impidiendo su funcionalidad.

3. Principales métodos y algoritmos basados en dispositivos vestibles

3.1 Métodos de detección de caídas basados en umbrales

Estos algoritmos utilizan límites (umbrales) para detectar las distintas fases de la caída, generalmente los límites superiores, que al ser alcanzados o rebasados desencadenan acciones para analizar y verificar que ha sucedido una caída.

Ventajas:

- Bajo consumo de recursos computacionales
- Utiliza cálculos aritméticos simples para realizar la detección de la caída [11].

Desventajas:

- Es difícil determinar el umbral que brinda mejores resultados
- Una mala elección en los umbrales puede ocasionar que se presenten detecciones de caídas erróneas
- No existe un estándar para definir los umbrales
- La mayoría de las investigaciones realizadas, se han probado sólo en ambientes controlados [12]

En el trabajo “Desarrollo de una plataforma de monitoreo de caídas en domicilio para adultos mayores”, [13] utilizan un algoritmo de detección de caídas basado en umbrales. El algoritmo implementado utiliza 3 umbrales distintos que son usados para realizar la detección de 3 fases de la caída; caída libre, impacto y el reposo.

ISSN en trámite

-El umbral 1 se utiliza para detectar la fase de caída libre, durante esta fase se espera que se produzca una aceleración en el eje x similar a la aceleración de la gravedad, por lo que se definió un valor de umbral 0.6 g donde g=9.82 m/s^2.
-El valor del umbral 2 se definió en 1.5 g y se utiliza para detectar la fase de impacto en donde se realiza la suma de los tres vectores del acelerómetro (eje x + eje y + eje z). El resultado de la suma debe de superar el valor del umbral 2 para detectar que hubo una desaceleración del cuerpo al haber impactado. Después, se determinará si se alcanza o se supera el valor del umbral en un tiempo de 2 segundos, sino se alcanza el valor se regresará a la fase anterior.
-El umbral 3 es el umbral de reposo, después de que se alcanzó el umbral de la fase anterior se espera un tiempo de 2 segundos donde el eje x debe de permanecer con una aceleración dentro del rango del umbral 3, el rango es de -0.5g a 0.5g, si en el tiempo establecido no se mantiene dentro del rango no se detectaría la caída, si se mantiene dentro del rango se detectaría la caída. En la figura 1 se muestra el diagrama de flujo del funcionamiento del algoritmo [13].

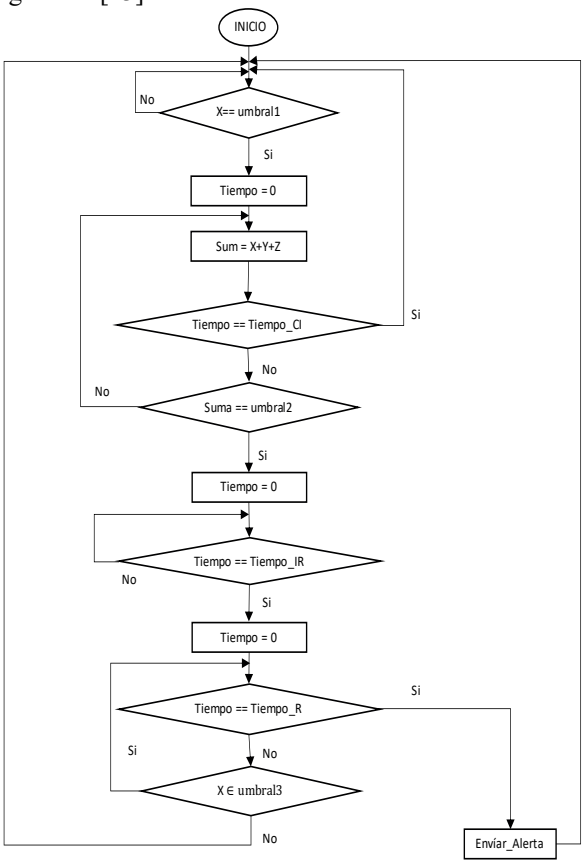


Figura 1: Diagrama de flujo del trabajo a partir de figura en [13]

En el trabajo "A smartphone-based fall detection system", utilizan un algoritmo de detección de caídas que se basa en la incidencia de un pico de 3g considerado como el umbral que inicia el análisis de las siguientes etapas de detección de caídas. Este se mantiene en el estado de muestreo en la primera fase, hasta que detecta un pico ≥3g y se mueve al *Post-peak*, en este punto espera un lapso de 1000ms, en el cual no debe de existir ningún otro pico y se mueve al *Post-fall*, si no vuelve nuevamente al *Post-peak.* En el *Post-fall* se esperan 1500 ms, en el cual no existe actividad y avanza al *Activity-test*, pero si se detecta un nuevo pico de umbral hace que se regrese al *Post-peak*. En el *Activity test* si no pasa la prueba se regresa al Sampling, pero si lo pasa se detecta como un evento de caída [14].

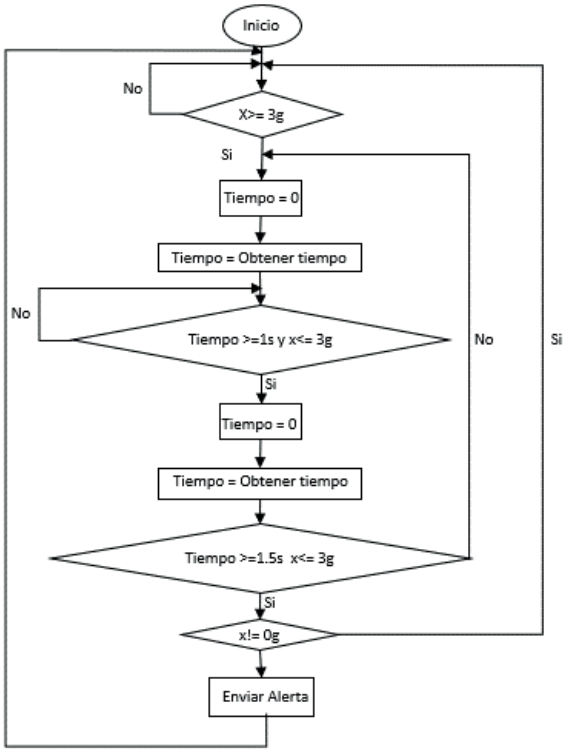


Figura 2: Diagrama de flujo basado en umbrales a partir de la figura en [14].

3.2 Algoritmos basados en el aprendizaje automático

3.2.1 Algoritmos de detección de caídas basados en redes neuronales

Los algoritmos de redes neuronales imitan el comportamiento del pensamiento humano, que pasa información entre neuronas para obtener un resultado. Se componen por neuronas que a su vez están dentro de una capa y se comunican mediante enlaces llamados pesos. Los pesos pueden aumentar o inhibir la activación de las neuronas con las que se comunica.

ISSN en trámite

Ventajas:

- Este tipo de algoritmos puede diferenciar entre actividades de la vida diaria y caídas
- Al tomar en cuenta la naturaleza de varias actividades evita errores

Desventajas:

- Es necesario contar con un dispositivo extra como una computadora para realizar el entrenamiento de la red
- La aplicación necesita entrenarse antes de utilizarse
- Consume mayores recursos computacionales
- Un mal entrenamiento de la red puede influir en la eficacia de la detección de caídas.

Estos tipos de algoritmos implementan una red neuronal que utiliza los datos recopilados para su clasificación de dos maneras: actividad normal o caída. Es una red de avance que se compone de 3 capas y cada una de ellas cuenta con 5 neuronas. La entrada de valores a la red son los datos del acelerómetro, éste se conecta a la primera capa con la matriz W1kj que son los pesos de las conexiones de la capa de entrada y la capa uno. Las capas uno y dos son conectadas mediante la matriz W2kj, la cual contiene los pesos de las conexiones de la capa uno y dos. La matriz W3kj es la que contiene los pesos de las conexiones de la capa dos y tres. Entre la capa tres y la capa de salida se tiene la matriz W4kj, la cual contiene los pesos de las conexiones entre esas capas. La figura 3 muestra la estructura que tiene la red neuronal utilizada en el trabajo [12]

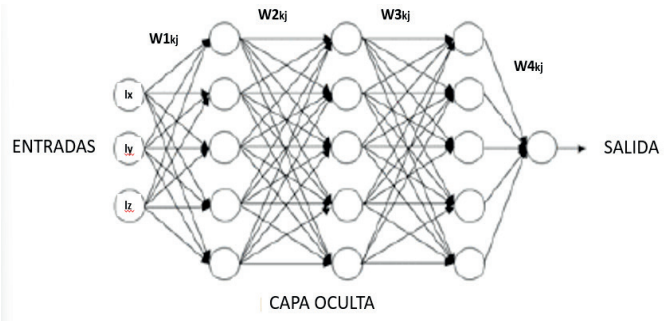


Figura 3: Estructura de la red neuronal utilizada para la detección de caídas de tres capas y cinco neuronas [12].

3.2.2 Algoritmos de detección de caídas basados en árboles de decisión

Estos tipos de algoritmos utilizan las comparaciones que están presentes en los árboles de decisión generados. Los árboles de decisión son generados utilizando los puntos mínimos y máximos en la aceleración tomando en cuenta actividades de la vida diaria y diferentes tipos de caídas. Una vez teniendo los árboles se genera el algoritmo, utilizando comparaciones de los cambios en la aceleración para determinar si se trata de alguna actividad de la vida diaria o de algún tipo de caída.

Ventajas:

- Implementación sencilla.
- Bajo consumo de recursos computacionales
- Este tipo de algoritmos puede diferenciar entre actividades de la vida diaria y caídas

Desventajas:

- Se deben de realizar distintas experimentaciones para obtener los datos que servirán para generar los árboles de decisión
- Una mala experimentación en la medición de las caídas puede influir en la eficacia en la detección de la caída.
- Se necesita contar con una gran cantidad de datos para generar el árbol de decisión y otro para probar el funcionamiento.

En el trabajo "Algoritmo de detección de caídas en un sistema embebido", se implementa un algoritmo que se desarrolló utilizando dos tipos de árboles de decisión. Para la construcción de los árboles se utilizó la información obtenida por un acelerómetro triaxial tanto de caídas como de actividades que se realizan en la vida diaria como: caminar, acostarse, agacharse, bajar escaleras, saltar, sentarse y subir escaleras. Los árboles de decisión utilizan los picos máximos y mínimos que se detectaron en la aceleración al realizar cada una de las actividades y en las simulaciones de las caídas. En la Figura 4 se muestra el árbol de decisión generado para los picos mínimos de las aceleraciones [15].

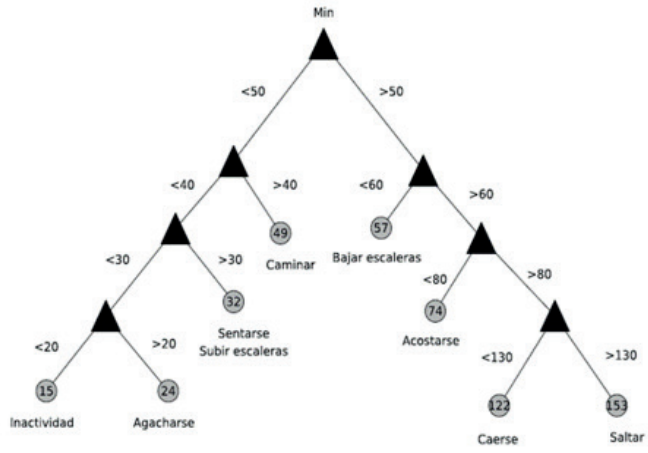


Figura 4: Árbol de decisión de los picos mínimos obtenidos a partir de figura en [15]

Los árboles de decisión generados son utilizados para desarrollar el algoritmo. El algoritmo trabaja con 100 muestras y con ellas se determina el mínimo y el máximo adquirido, se utiliza un filtro para eliminar oscilaciones provocadas por la respiración o actividades de baja frecuencia, posteriormente los datos ingresan al algoritmo donde por medio de comparaciones generadas por los árboles de decisión se detecta si los datos se tratan de una

ISSN en trámite

caída de una de las actividades de la vida diaria que fueron tomadas en cuenta.

En este trabajo se presenta como resultado que el algoritmo obtuvo un 97% de verdaderos positivos en la detección de caídas y el porcentaje 3% restante fueron falsos positivos [15].

4. TRABAJOS FUTUROS

En este trabajo se propone una clasificación de los tipos de algoritmos para la detección de caídas. Posteriormente y con base a una selección de los algoritmos que reportan mejores resultados, se pretende realizar su codificación para ponerlos a prueba bajo las mismas condiciones señaladas en los trabajos relacionados. La intención es evaluar experimentalmente los algoritmos y generar un reporte de los resultados obtenidos comparando su precisión para la detección de caídas.

5. CONCLUSIONES

Dado el incremento en la población de adultos mayores a nivel mundial, se ha incrementado la necesidad de soluciones a problemas que presenta este segmento de la población para ayudarlos a llevar una vida más autónoma y con mayor bienestar.

La detección de caídas se ha vuelto un tema muy importante debido a las consecuencias graves que conlleva el retraso en el auxilio oportuno de las personas mayores. Las opciones actuales para la detección de caídas son muy limitadas y de difícil acceso para la mayoría de las personas en edad avanzada.

Se realizó una investigación de diversos trabajos relacionados con la detección de caídas con la finalidad de observar y conocer sus resultados, con el objetivo de identificar los métodos más adecuados para el desarrollo de una solución de bajo costo y confiable para la detección de las caídas. Ver tabla 1.

Método de detección de caídas	Precisión	Requisitos de procesamiento	Requisitos de configuración
Umbrales	87.85%	Bajo	Bajo
Redes neuronales	98.4%	Alto	Alto
Árboles de decisión	97%	Bajo	Alto

Tabla 1: Comparativo de métodos de detección de caídas

Identificamos tres métodos principales con algunas variantes. Se compararon considerando su precisión, sus requisitos de procesamiento (tiempo de procesamiento, complejidad de los algoritmos), así como sus requisitos de configuración (tiempo y dificultad del entrenamiento y configuración del método previo a su utilización). Para el caso de la precisión se realizaron promedios de los resultados obtenidos de la revisión bibliográfica.

Se pudo observar que los algoritmos basados en umbrales utilizan diferentes etapas, constantes y cálculos matemáticos para determinar si se ha detectado una caída.

Consideramos que la clasificación de estos algoritmos facilitará el desarrollo de nuevos sistemas de detección de caídas y facilitará a los desarrolladores de estos sistemas el proceso de elección del algoritmo que se apegue mejor a sus necesidades y al tipo de dispositivo de medición que utilizará.

REFERENCIAS

[1] E. R. Durán, G. F. R. Camarero, and E. H. Martínez-Esparza, “Incidencia y características de las caídas en un hospital de cuidados intermedios de Barcelona”, *Gerokomos*, vol. 28, no. 2, pp. 78–82, 2017.

[2] Z. A. da Silva-Gama and A. Gómez-Conesa, “Factores de riesgo de caídas en ancianos: revisión sistemática Risk factors for falls in the elderly” *Rev Saúde Pública*, vol. 42, no. 5, pp. 946–956, 2008.

[3] J. R. Silva-Fhon, R. Partezani-Rodrigues, K. Miyamura, and W. Fuentes-Neira, “Causas y factores asociados a las caídas del adulto mayor Causes and factors associated to falls among the Elder Causas e fatores associados aquedas no idoso”, *Enfermeria Universitaria*, vol. 16, no. 1, 2019.

[4] F. Varas-Fabra, E. Castro Martín, L. Á. Pérula De Torres, M. J. Fernández Fernández, R. Ruiz Moral, and I. Enciso Berge, “Caídas en ancianos de la comunidad: Prevalencia, consecuencias y factores asociados”, *Atencion Primaria*, vol. 38, no. 8, pp. 450–455, 2006, doi: 10.1157/13094802.

[5] L. Z. Rubenstein and K. R. Josephson, “The epidemiology of falls and syncope”, *Clinics in Geriatric Medicine*, vol. 18, no. 2, pp. 141–158, 2002, doi: 10.1016/S0749-0690(02)00002-2.

[6] P. Kannus *et al.*, “Fall-Induced Injuries and Deaths Among Older Adults”, vol. 281, no. 20, pp. 1895–1899, 2014.

[7] A. Zorrilla and G. Dahily, “Aspectos sociodemográficos de las caídas en ancianos atendidos por un Grupo Básico de Trabajo”, *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, vol. 44, no. 8, p. 51, 2011, doi: 10.1088/1751-8113/44/8/085201.

[8] S. P. De, S. Hernández, A. Moctezuma, G. Rodrigo, G. Ortega, and R. María, “Caídas en el adulto mayor. Factores intrínsecos y extrínsecos”, *Revista Médica del Instituto Mexicano del Seguro Social*, vol. 40, no. 6, pp. 489–493, 2002.

[9] E. Nacional and N. Unidas, “Comunicado De Prensa Núm . 337 / 19 10 De Julio De 2019 ‘Estadísticas a Propósito Del … Día Mundial De La Población (11 De Julio)”, *INEGI*, vol. 337, no. 19, pp. 1–13, 2020, [Online]. Available: https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2020/Poblacion2020_Nal.pdf

ISSN en trámite

[10] G. Pérolle and I. Etxeberria Arritxabal, “Detector automático de caídas y monitorización de actividad para personas mayores”, *Revista Española de Geriatría y Gerontología*, vol. 41, no. Supl 2, pp. 33–41, 2006, doi: 10.1016/s0211-139 x (06)73006-2.

[11] L. Tong, W. Chen, Q. Song, and Y. Ge, “A research on automatic human fall detection method based on wearable inertial force information acquisition system”, *International Conference on Robotics and Biomimetics*, Dec. 2009.

[12] M. Vallejo, C. v. Isaza, and J. D. Lopez, “Artificial Neural Networks as an alternative to traditional fall detection methods”, *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS”*, no. 1, pp. 1648–1651, 2013, doi: 10.1109/EMBC.2013.6609833.

[13] S. C. A. Murray Toledo, “Desarrollo de una plataforma de monitoreo de caídas en domicilio para adultos mayores”, Tesis, 2020.

[14] L. Valcourt, Y. de La Hoz, and M. Labrador, “Smartphone-based Human Fall Detection System”, Tesis, *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 2, pp. 1011–1017, 2016, doi: 10.1109/TLA.2016.7437252.

[15] C. E. Moran Garabito, “Algoritmo de detección de caídas en un sistema embebido”,Tesis, 2017.

ISSN en trámite

HERRAMIENTA PARA LA DETECCIÓN DE SIMILITUD EXTRÍNSECA EN DOCUMENTOS DE TEXTO

Melina Molina[1], Arturo Alvarado[2], Hernán de la Garza[3], Arturo Legarda[4], Leonardo Nevárez[5], Tonatiuh Garcia-Reyes[6]

Instituto Tecnológico de Chihuahua II

Ave. de las Industrias #11101, Complejo Industrial Chihuahua,

Chihuahua, México, C.P. 31130.

M19550003@chihuahua2.tecnm.mx[1], jesus.ag@chihuahua2.tecnm.mx[2], hernan.gg@chihuahua2.tecnm.mx[3], arturo.ls@chihuahua2.tecnm.mx[4], leonardo.nc@chihuahua2.tecnm.mx[5], carlos.gr@ chihuahua2.tecnm.mx [6]

Resumen: El presente trabajo tiene la intención de la creación de una herramienta gratuita que detecte la similitud en documentos de texto comparados externamente, mostrando un resultado cuantificado para que pueda ser utilizado para distintos fines al ser implementada. Para su creación se hizo uso del Procesamiento del Lenguaje Natural (PLN) una rama de la inteligencia artificial, calculando el parecido mediante vectores e implementando la medida de similitud del coseno para la comparación de textos con gran diferencia de tamaño. Desplegando resultados buenos de acuerdo a lo esperado en su mayoría referente a la copia sintáctica, pero a su vez descubriendo que hace falta más algoritmos para un mejor resultado en la detección de similitud semántica sin comprometer demasiado el tiempo de respuesta de la herramienta, además de adecuaciones en la interfaz.

Palabras Clave: NLP, Similitud, Herramienta, Plagio, Semántico, Sintáctico, Sinonimia.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente el impacto y evolución que ha tenido el Internet en nuestra vida diaria ha permitido que prácticamente cualquier persona con residencia en un sector urbanizado, pueda acceder al Internet a través de cualquier dispositivo con un navegador web en cualquier momento, lugar y a gran velocidad de transmisión. Los usuarios de Internet cuentan con la capacidad de acceder a distintas fuentes de información de interés rápidamente, a diferencia de como solía ser hace 50 años, cuando las bibliotecas jugaban un papel crucial en la forma de buscar y encontrar información. Lamentablemente a pesar de vivir en la era digital con todas las virtudes que conlleva, nuevos retos han surgido, siendo algunos de ellos los relacionados con el plagio de investigaciones y/o la omisión de la cita del Autor, tal como las normas internacionales lo establecen puntualmente para los temas relacionados a las investigaciones de nivel escolar, profesional y de posgrado.

Es importante destacar un estudio realizado por Huamaní, Dulanto y Rojas (2008) acerca del plagio en investigaciones, en dicho estudio se realizó una revisión de los distintos tipos de copia/plagio en un total de 24 trabajos realizados por alumnos de nivel pregrado, arrojando un resultado de 8 textos en la categoría de copia textual, 3 con copia parcial, 12 con copia mixta y, lo que no es de sorprender, solamente 1 trabajo original. Con esta referencia podemos reafirmar que es muy común y factible encontrar similitudes en textos.

En la actualidad se han desarrollado aplicaciones que sirven como herramienta para ayudar a detectar la existencia de similitudes en los textos al ser cotejados con otros documentos disponibles en Internet, tal y como lo expone el autor Díaz (2017), quien investigó y puso a prueba distintas herramientas para la detección de similitudes entre textos, además de los servicios adicionales que ofrecen. Algunas de las aplicaciones mencionadas por el autor son Plagiarisma, Essay Have, PlagScan, entre otros. Se identificó que la mayoría de estas herramientas tienen una versión gratuita, pero con algunas deficiencias o restricciones. Un ejemplo de estas deficiencias son el límite de archivos que se pueden revisar por día o resultados de bajo nivel de confiabilidad al momento de hacer la comparación.

Dada el área de oportunidad descrita, se decidió incursionar en esta investigación a la mejora de la tecnología dirigida a la revisión de textos en busca de similitudes y desarrollar una app[1] gratuita. Los aspectos de interés en esta investigación son:

1 Aplicación de SW de computadora.

ISSN en trámite

- El lapso de tiempo que se invierte para dicha tarea.
- La experiencia de la persona en el ramo de interés.
- La generación de un análisis detallado.
- La capacidad de recordar los textos analizados a priori[2].

Estas tareas pueden resultar extenuantes y con requerimientos de tiempo significativos.

Visualizamos un escenario donde es necesario comparar manualmente los textos pertenecientes a un corpus[3] con un número extraordinario de ejemplares (como lo sería una base de datos de artículos de investigación), en principio se requeriría de un tiempo directamente proporcional al número de ejemplares de textos, además de un gran número de personas realizando la tarea y algún sistema de coordinación de esfuerzos. Este ámbito es idóneo para el uso de una herramienta que detecte similitud entre textos, capaz de arrojar un resultado cuantificado para complementar los reportes de la revisión de textos, que además cuente con la capacidad de disminuir potencialmente[4] el tiempo necesario para la tarea en general, ya que solamente se tomaría interés en aquellos textos que presenten un porcentaje de similitud predeterminado, logrando así, la reducción de la interacción humana.

El propósito de esta investigación es el desarrollo de una aplicación que permita agilizar el proceso de identificación de similitudes entre diferentes textos, al proveer un dato cuantificado de similitud y esto pueda ser utilizado para distintos propósitos entre ellos la detección de plagio, para esto se hará uso de una rama de la inteligencia artificial la cual es el Procesamiento de Lenguaje Natural (PLN, denominado también NLP por sus siglas en inglés).

Del autor Gelbukh (2010), se describe lo siguiente “Por PLN se entiende la habilidad de la máquina para procesar la información comunicada, no simplemente las letras o los sonidos del lenguaje”, de esta manera se puede lograr que la computadora sea capaz de tener diversas aplicaciones referentes a los textos como los son los asistentes inteligentes, texto predictivo, análisis de datos, traducciones, similitud de textos, entre muchas más.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En la creación de esta herramienta, se descartó el uso del internet para obtener datos o el procesamiento respectivo, realizando la revisión de manera local.

Para iniciar con la detección de similitud en los textos es necesario realizar un preprocesamiento para esto, el texto pasa por los siguientes cambios:

- Normalización. - Al texto se le cambian diversos aspectos que no son necesarios para ser procesado más adelante, los cambios principales pasar a minúsculas o mayúsculas los caracteres, quitar signos de puntuación y extraer también las palabras vacías o stopwords[5].

- Tokenización.- Es separar las palabras, convirtiéndolas cada una en un token. Esta parte puede variar ya que al normalizar se puede optar por dejar las palabras con puntuación, si darán importancia a las mayúsculas o un token contendrá más de una palabra.

- Lematización.- Es el proceso lingüístico que sustituye una palabra con forma flexionada (plural, femenino, verbo conjugado, etc.) por su lema[6].

Una vez terminado el preprocesamiento del texto, se puede comenzar a aplicar una vectorización, que significa transformar el texto a números para poder ser implementado a un algoritmo y pueda ser calculado, por ejemplo, para calcular la similitud del coseno, uno de los distintos algoritmos que nos presentan Gomaa y Fahmy (2013), en busca de copia sintáctica[7] que consiste en obtener la medida de similitud entre dos vectores de un espacio de producto interno que mide el coseno del ángulo entre ellos, esto nos ayuda a que no haya problema al buscar similitud entre dos textos con gran diferencia de tamaño, figura 1.

$$\cos(\theta) = \frac{\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}}{\|\mathbf{A}\|\|\mathbf{B}\|} = \frac{\sum_{i=1}^{n} A_i B_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} A_i^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n} B_i^2}}$$

Figura 1. Similitud del coseno.

Se busca abarcar por lo menos uno los distintos tipos de paráfrasis[8] que nos presentan Barrón, Vila y Rosso (2010), algunos de ellos son:

2 De lo visto con anterioridad.
3 Conjunto lo más extenso y ordenado posible de datos o textos científicos, literarios, etc., que pueden servir de base a una investigación.
4 La reducción está interrelacionada con el número de ejemplares que requieran intervención humana.
5 Palabras que no tienen un significado por sí solas, sino que modifican o acompañan a otras, este grupo suele estar conformado por artículos, pronombres, preposiciones, adverbios e incluso algunos verbos.
6 Forma de citación de una palabra (p. ej., el lema de leíamos es leer).
7 Área de la gramática dedicada a las reglas de composición de los elementos en oraciones. Las palabras son similares léxicamente si tienen una secuencia de caracteres similar.
8 Frase que, imitando en su estructura otra conocida, se formula con palabras diferentes.

ISSN en trámite

- Sinonimia.- Sustitución de una pieza léxica por uno de sus sinónimos.
- Antonimia.- Sustitución de una pieza léxica por su antónimo.
- Palabra-definición.- Sustitución de una pieza léxica por su definición.
- Eliminación.- Eliminación de una o más piezas léxicas.

La herramienta está desarrollada en el lenguaje de programación Python 3.7.4, el cual facilita la creación de la herramienta ya que existen en esa versión, diversas librerías especializadas para el PLN como lo son:

Spacy.- Comúnmente usado para PLN de una forma industrializada realizando muchas actividades de NTKL pero de una forma mucho más rápida, para uso en producción y crear aplicaciones.

Scipy.- Librería de uso libre para matemáticas, ciencia e ingeniería.

Sklearn.- Cuenta con algoritmos de clasificación, regresión, clustering y reducción de dimensionalidad, además cuenta con compatibilidad con otras librerías de Python como NumPy, SciPy y matplotlib.

3. EXPERIMENTACIÓN

La herramienta abarcó la detección de similitud extrínseca[9] de copia exacta y paráfrasis por lo menos de un tipo, entre dos documentos arrojando un resultado cuantificado. Descartando que sea un detector de similitud intrínseco y multilingüe.

Los siguientes ejemplos de frases, párrafo se utilizaron para observar el funcionamiento de la herramienta.

Sinonimia.

- "Me dijo que no pensaba participar en el concurso".
- "Me comentó que no pensaba participar en el concurso".

Antonimia.

- "Las ciudades del norte son más ricas que la zona costera".
- "La zona costera es más pobre que las ciudades del norte".

Palabra-Definición.

- "Necesito cuerda".
- "Necesito algo para atar".

Eliminación

- "Juan hizo un intento para dejar de fumar".
- "Juan intentó dejar de fumar".

Párrafo

- "Cuando el tren mixto descendente, núm. 65 (no es preciso nombrar la línea), se detuvo en la pequeña estación situada entre los kilómetros 171 y 172, casi todos los viajeros de segunda y tercera clase se quedaron durmiendo o bostezando dentro de los coches, porque el frío penetrante de la madrugada no convidaba a pasear por el desamparado andén. El único viajero de primera que en el tren venía, bajó apresuradamente, y dirigiéndose a los empleados, pregunta si aquél era el apeadero de Villa".
- "En la estación ferroviaria que se encuentra entre los kilómetros 171 y 172, se detuvo el tren mixto número 65. Era tanto el frío en esa madrugada, que ninguno de los pasajeros de los vagones de segunda y tercera clase quiso bajar, prefirieron dormir dentro del vagón antes que caminar por el solitario y frío andén. En el vagón de primera clase había un solo pasajero, que bajó apresuradamente, preguntando a los empleados si ahí era la estación de Villa".

Párrafo copia textual

- "El texto descriptivo, en este caso un retrato de una persona provoca en el receptor una imagen tal que la realidad descripta cobra forma, se materializa en su mente. En este caso el texto habla de un personaje real: Doña Uzeada de Ribera Maldonado de Bracamonte y Anaya. Como se trata de una descripción literaria, la actitud del emisor es subjetiva, dado que pretende transmitir su propia visión personal al describir y la función del lenguaje es predominantemente poética, ya que persigue una estética en particular".

Archivos del mismo tema más de 10 hojas.

Archivos cortos del mismo tema.

4. RESULTADOS

Los siguientes fueron los resultados al ejecutar la aplicación.

En donde los textos son sometidos a un preprocesamiento que primero quita todos los caracteres especiales, a continuación, se normaliza el texto y luego se lematiza. Una vez preprocesado el texto los lemas son pasados a ser vectorizados creándose una matriz de vectores para cada texto y se calcula el coseno del ángulo entre los dos vectores (una matriz de vectores para cada

9 Que es externo a la naturaleza de una cosa. Referente al texto, quiere decir que se comparará contra otros textos externos a él.

ISSN en trámite

texto a comparar), a este ángulo se le resta un entero (1) el cual se multiplica por 100 para obtener el porcentaje de similitud.

Por ejemplo, el ángulo de coseno calculado fue de 0.16666666 en porcentaje de similitud seria 83.33%.

Similitud = (1-0.16666666)*100 = 83.33%.

Además, el valor esperado se baso de acuerdo a la cantidad de palabras en las frases y textos a comparar similares, ya que a cada experimento se cambió un porcentaje de palabras para usar como contraste.

Frase Sinonimia

Para el primer experimento se contempló un valor esperado de similitud detectada del 90%, el obtenido a través de la aplicación logro un 86.6%, tal como se muestra en la figura 2:

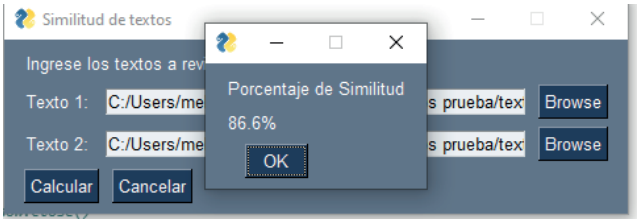


Figura 2. Pantalla de resultado sinonimia.

Frase Antonimia

El segundo experimento fue contemplado con un valor esperado de similitud detectada del 90% de similitud, el valor obtenido por la aplicación fue de un 80%, como se muestra en la figura 3:

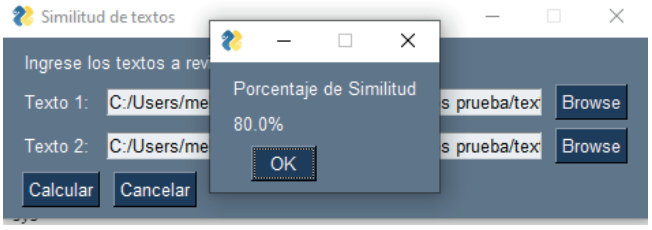


Figura.3 Pantalla de resultado antonimia.

Frase Palabra-definición

El tercer experimento contemplaba un valor esperado de similitud detectada del 80%, mientras el valor obtenido fue de un 50%, mostrado en la figura 4:

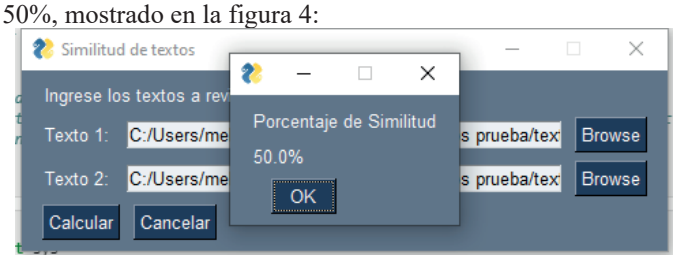


Figura 4. Pantalla de resultado Palabra - Definición.

Frase Eliminación

El cuarto experimento contemplaba un valor esperado de similitud detectada del 90% mientras el valor obtenido fue de un 100%, tal como es mostrado en la figura 5. Es importante notar que esta es una sobre estimación con rasgo positivo:

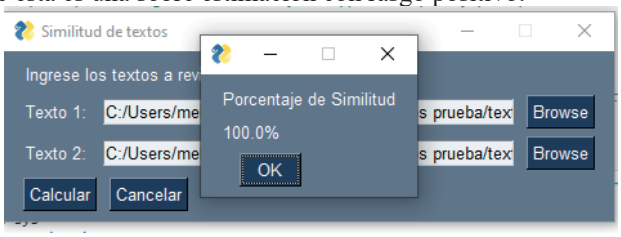


Figura 5. Pantalla de resultado Eliminación.

Frase Párrafo

En el quinto experimento se contemplaba un valor de similitud esperado del 70%, el valor obtenido por la aplicación detecto un 46.76% como se muestra en la figura 6:

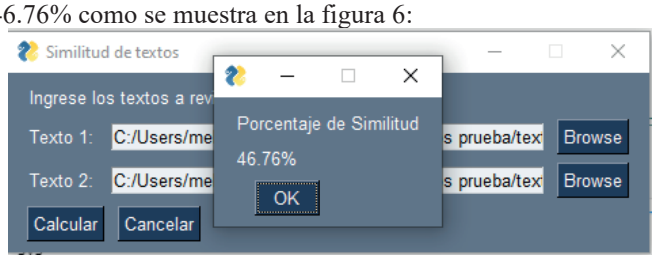


Figura 6. Pantalla de resultado Párrafo.

Frase Párrafo copia textual

El sexto experimento contempla un valor esperado de similitud detectada del 100% y la aplicación detecto un nivel de similitud del 100% de manera acorde, tal como se muestra en la figura 7:

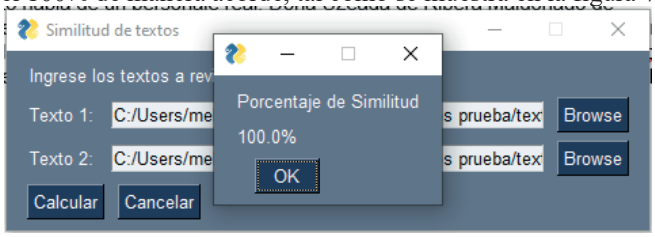


Figura 7. Pantalla de resultado Párrafo copia textual.

Frase Archivos del mismo tema, más de 10 hojas

El séptimo experimento contempla un valor esperado de similitud del 50% dados los factores en que se platea. La aplicación detectó una similitud del 63.76% mostrado en la figura número 7.

ISSN en trámite

5. DISCUSIÓN

Los resultados muestran valores alentadores al tener niveles bajos de error en la mayoría de experimentos, teniendo en general un error promedio del 12.15% lo que es aceptable para la primera versión de la aplicación, particularmente por el amplio espectro de pruebas a la que fue sometida.

Para el experimento de la “Frase Sinonimia” el resultado fue muy cercano, contando solo con un error del 3.45%, valor excelente para la primera evaluación de la aplicación en un modelo básico de similitudes entre textos con substituciones léxicas de palabras.

El experimento "Frase Antonimia" tuvo un 10% de error, lo que es un buen valor para este tipo de frases dado que el antónimo puede dar un texto que refuta en su totalidad al original a pesar de una gran cantidad de similitud de palabras.

Posteriormente el experimento "Frase Palabra-definición" tuvo un 30% de error. Después de un detallado análisis se determinó que este tipo de textos son particularmente difíciles de evaluar debido al inherente cambio de sintaxis que se da de una frase a otra.

En el experimento “Frase Eliminación”, a pesar de tener un 10% de error, este cae en el área de errores preferibles por sobre estimación de similitud, especialmente al tratarse de una frase corta con la eliminación de una pieza de la misma.

En el experimento “Frase Párrafo", el resultado tuvo un error del 23.24%. A pesar de no ser un resultado catastrófico, es el primer indicio de área de oportunidad para posteriores mejoras de la aplicación, teniendo este error como contraste claro para futuras referencias.

Para el experimento “Frase Párrafo copia textual” el resultado fue el que se esperaba, al tratarse de una copia exacta, este experimento sirvió para dar confianza en los algoritmos usados, ya que de encontrarse la mínima discrepancia sería signo de una mala implementación.

Para el experimento “Archivos del mismo tema, más de 10 hojas”. Se dio un resultado bueno (13% de error) al tratarse de más palabras y sobre el mismo tema. En un primer análisis podría haberse tomado como un índice alto de similitud, pero el porcentaje dado por la aplicación muestra que los textos están relacionados, pero no involucra una copia o similitud que pudiese significar plagio.

Para el experimento “Archivos cortos del mismo tema”, al igual que el de textos grandes, se comprobó que no tuvieran algún tipo de copia semántica, y el nivel de detección (con un error del 6.83%) es completamente aceptable, ya que comparten el mismo tema y a pesar de que el número de palabras es menor (lo que podría haber detonado algún tipo de bias no deseado).

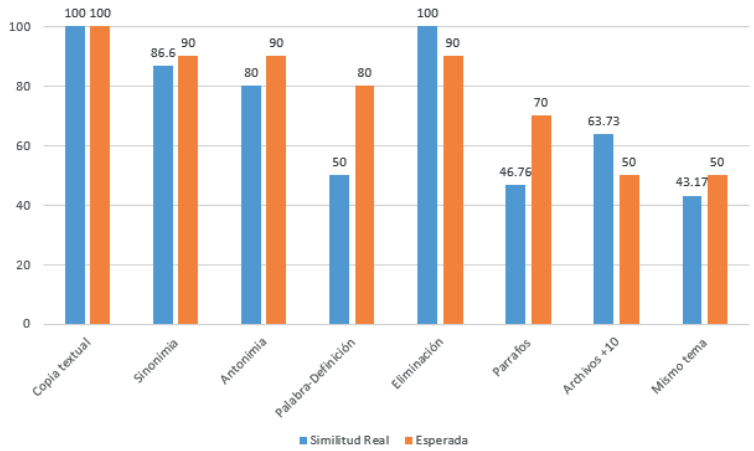


Fig.8. Grafica de resultados.

6. CONCLUSIÓN

Como conclusión sobre los resultados que se presentaron, se determinó que la mayoría de los valores obtenidos a través de la experimentación fueron acordes a los valores que se esperaban, se logra demostrar la detección de similitud tanto en textos cortos, además de las frases seleccionadas para su escrutinio durante la fase de la experimentación, y finalmente se lograron los resultados esperados en los textos más extensos.

Otro punto de gran valor fue el tiempo que tarda la herramienta al mostrar el resultado, el tiempo de análisis es razonable inclusive en archivos de gran peso. Esto se logró observar en la etapa temprana del desarrollo propio de la herramienta, en la cual se utilizó un modelo de bolsa de palabras con la librería Genism en la que, para poder someter a una revisión de un solo párrafo, la exploración tardaba alrededor de 20 minutos para poder realizar el análisis requerido. En este punto se determinó que la calidad del Hardware del equipo de cómputo utilizado tenía un rol de mucho peso, ya que los tiempos solo se lograron acortar en equipos con mayor capacidad de cómputo. Dado los motivos expuestos se optó por otro método que lograra realizar un análisis de similitud entre textos de gran tamaño de manera rápida, sin afectar el objetivo de obtener un grado de similitud confiable. El objetivo se logró al integrar un preprocesamiento del texto a analizar, luego vectorizar los textos, para posteriormente poder lograr medir la distancia del coseno entre ellos.

REFERENCIAS

Barrón Cedeño, A., Vila, M., & Rosso, P. (2010). Detección automática de plagio: de la copia exacta a la paráfrasis.

Díaz Arce, D. (2017). EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE TRES HERRAMIENTAS ANTIPLAGIO GRATUITAS EN LA DETECCIÓN DE DIFERENTES FORMAS DE COPY-PASTE PROCEDENTES DE INTERNET. EDUTEC. Revista Electrónica de Tecnología Educativa. Obtenido de http://www.edutec.es/revista

ISSN en trámite

Fahmy, A., & Gomaa, W. (2013). A Survey of Text Similarity Approaches. International Journal of Computer Applications.

Gelbukh, A. (2010). Procesamiento de Lenguaje Natural y sus aplicaciones. Komputer Sapiens, 6-11.

Huamaní, C., Dulanto-Pizzorni, A., & Rojas-Revoredo, V. (2008). 'Copiar Y Pegar' En Investigaciones En El Pregrado: Haciendo Mal Uso Del Internet.

ISSN en trámite

Los colores del big data en el estudio del comportamiento de fenómenos climáticos

Fabiola Ocampo Botello*, Roberto De Luna Caballero*, Álvaro Alvarado Hernández**

***Instituto Politécnico Nacional-Escuela Superior de Cómputo. Av. Juan de Dios Bátiz s/n esq. Av. Miguel Othón de Mendizábal. Colonia Lindavista. Alcaldía: Gustavo A. Madero. C. P. 07738. Ciudad de México. (focampob@ipn.mx)**
****Instituto Politécnico Nacional-Secretaría Académica. Av. Luis Enrique Erro S/N, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Zacatenco, Alcaldía Gustavo A. Madero, C.P. 07738, Ciudad de México. (aalvaradoh@ipn.mx)**

Abstract: El estudio de los fenómenos del cambio climático se ha convertido en un problema muy relevante para la humanidad, enfrentando desafíos para analizar un sistema de observaciones en constante cambio, por lo que el uso de tecnologías de la información resulta de gran apoyo en la comprensión del ingente volumen de datos complejos, de diversa índole y variable en el tiempo que se genera, y es aquí donde las características tecnológicas y de procesamiento de datos que caracteriza al big data resultan de mucha utilidad. El Big Data busca formas de analizar, extraer sistemáticamente o manejar datos de conjuntos de datos que son demasiado grandes o complejos para ser procesados con software de aplicación de procesamiento de datos tradicional. En este trabajo se presenta una descripción general de la importancia de la consideración del big data en el estudio de los cambios climáticos, los retos relacionados a los tipos de variables que considera y el código de colores de las diversas áreas de investigación que incorpora. Se trata de un estudio descriptivo.

Keywords: big data, cambio climático, minería de datos, datos, variables

1. INTRODUCCIÓN

Las fuentes de la que provienen los datos que son utilizados para la comprensión del comportamiento de diversos factores, que de una u otra forma se relacionan con el cambio climático, resultan ser muy heterogéneas, de gran tamaño, de tipo muy variado y generados a gran velocidad, por lo que requieren todo un conjunto de componentes, arquitectura, para almacenar, procesar, visualizar y entregar resultados con la intención de orientar las aplicaciones y la comprensión misma de los fenómenos climatológicos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 El Big data

Moreno (2017) establece que los primeros en utilizar el término Big data fueron los investigadores Cox y Ellsworth de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA por sus siglas en inglés), con la finalidad de señalar el problema al que se estaban enfrentando para visualizar y procesar grandes cantidades de datos y las limitantes técnicas de las computadoras que tenían en esos tiempos.

El mismo autor define el Big data como: “el gran cúmulo de datos compuesto por diferentes tipos, estructuras y relaciones de datos, que a su vez tienen veloces tasas de generación y dispersión, y el procesarlos con tecnologías convencionales para su posterior análisis es parte del problema (Big Problem)” (Moreno, 2017:8).

Según Joyanes (2019:8) Josep Curto establece que El Big Data es el conjunto de estrategias, tecnologías y sistemas para el almacenamiento, procesamiento, análisis y visualización de conjuntos de datos complejos, que frecuentemente, pero no siempre, viene definida por volumen, velocidad y variedad.

El Big Data prioriza la búsqueda de formas de analizar, extraer sistemáticamente o manipular datos de conjuntos de datos que son demasiado grandes o complejos para manejar con software de aplicación de procesamiento de datos tradicional, para lo cual es necesario la utilización de múltiples nodos para realizar un manejo eficiente. En otras palabras, Big Data se puede definir por las características clave de 5V, es decir, volumen, velocidad, variedad, veracidad y valor (Sebestyén, Czvetkó and Abonyi, 2021).

El término Big Data se refiere al conjunto de datos complejos y de gran volumen que las herramientas tradicionales, como las

ISSN en trámite

bases de datos relacionales, son incapaces de procesar en un rango de tiempo o costos aceptables. El concepto de Big Data se utiliza para referirse a los conjuntos de datos voluminosos que exceden a la capacidad de manipulación de las herramientas tradicionales. Se alimenta de grandes volúmenes de datos que tienen diferente formato, no estructurados y semiestructurados (Joyanes, 2019:18).

Este gran volumen de datos que forman el historial de datos de diversos fenómenos, requiere ser entendidos, procesados, limpiados, tratados, manipulados y analizados mediante técnicas de minería de datos para identificar relaciones entre variables, modelos de generalización y patrones de comportamiento para tomar decisiones mejor informadas. Es así, como el estudio del big data se ha extendió en variadas áreas de estudio, lo cual poco a poco lo convierte en su consideración en estudios interdisciplinarios de diversa índole para entender su comportamiento,

2.1 La importancia de los datos y el análisis en el estudio de los cambios climáticos

Como se ha mencionado, resulta relevante el estudio de la diversidad de los tipos de datos que se almacenan en grandes bancos de datos generados por sistemas complejos y dinámicos para comprender el comportamiento de los fenómenos climáticos. Los desafíos que enfrentan los datos en esta área de estudio son los siguientes (Faghmous and Kumar, 2014):

- Datos en constante cambio. La comunidad de la ciencia de datos enfrenta el desafío de un sistema de observación en constante cambio, los cuales son recabados y analizados mediante mecanismos complejos que se utilizan para monitorear y observar los datos que producen los satélites y otras herramientas de teledetección.
- La empatía de los datos. Los datos almacenados que se consideran para el análisis provienen de fuentes diversas, por lo que es importante conocer su historia para comprender los resultados de los análisis que se hagan de los mismos, tal razón se sustenta en dos aspectos: 1) entender cómo se generaron, el propósito y los procesos que guían su investigación y 2) comprender la posibilidad de sesgos en las muestras, da la oportunidad de corregir y/o ajustar los resultados y las recomendaciones que se hagan.
- Registro de observación breve. La disponibilidad de los datos, es otro problema que se enfrenta en esta área de estudio, en algunos casos aún no existen suficientes datos históricos y en otros casos se pueden tener imágenes de alta resolución espacial, pero de corta duración temporal, por lo tanto, son pocas las preguntas socio-temporales que se puedan responder.
- Heterogeneidad. El sistema terrestre incorpora múltiples variables relacionadas con el comportamiento climático, las cuales es necesario controlar con tecnologías de diversa índole y aunque se generen en fuentes diversas, forman parte del mismo sistema y el desafío, en este aspecto, se centra en fusionar datos que provienen de fuentes heterogéneas y son complementarias y posiblemente redundante.
- Representación de datos. Debido a la naturaleza espacio-temporales que tienen los datos climáticos, la representación atributo-valor como tradicionalmente se representan los datos, resulta una limitante importante; por mencionar, el comportamiento de un huracán no es un fenómeno que aparece y desaparece en un momento posterior. En esta área de estudio, una representación que ha ganado popularidad es la noción de “red climática”, en la cual los nodos representan ubicaciones geográficas en la cuadrícula y los pesos de los bordes miden el grado de similitud entre los comportamientos de las series de tiempo que caracterizan a cada nodo.
- Desafío de los métodos. En el área de las ciencias del clima, un aspecto que resulta de gran relevancia es la comprensión de los fenómenos con una visión sistémica y no sólo de forma individual y en la medida de las posibilidades la predicción. Lo anterior se debe en cierta medida en la dificultad de la representación de los datos espacio-temporales que integran los fenómenos y las condiciones contextuales en que suceden.

En la actualidad muchos países están abriendo sus registros de datos históricos para que cualquier institución o empresa los pueda descargar, trabajar con ellos y descubrir nuevo conocimiento. En 1992 como resultado de la Segunda Conferencia Mundial sobre el Clima, se crea el Sistema Mundial de Observación del Clima (Global Climate Observation System, GCOS), en colaboración con (Subirà, 2020):

- la Organización Meteorológica Mundial (World Meteorological Organization, WMO)
- la Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO (Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC) of United Nations Educational Scientific and Cultural Organization, UNESCO)
- el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (United Nations Environment Programme, UN Environment), y
- el Consejo Internacional para la Ciencia (International Council for Science, ISC)

Lo anterior tiene la misión de dar acceso a la observación e información necesaria para abordar los problemas relacionados con el clima, información que las personas puedan consultar y procesar para aportar información que resulte de utilidad para tomar decisiones mejor informadas.

ISSN en trámite

2.2 El Big data y el estudio del cambio climático

Folorunsho and Adesesan (2012) establecen que el término de cambio climático, en ocasiones se usa exclusivamente para referirse al cambio causado por la actividad humana en oposición al que es causado por los procesos naturales de la Tierra. En las revistas científicas, el calentamiento global se refiere al aumento de la temperatura de la superficie y el cambio climático incluye el calentamiento global y todo lo demás que afectará el aumento de las cantidades de gases de efecto invernadero.

En las últimas décadas, el cambio climático ha sido un tema emergente y un foco de investigación de los estudiosos del big data. Las investigaciones recientes de este tema de estudio se han enfocado en los aspectos de eficiencia energética, agricultura inteligente, planificación urbana inteligente, pronóstico del tiempo, gestión de desastres naturales, etc (Hassani, Huang and Silva, 2019).

Debido a la diversidad de problemas que pueden ser abordados con el uso del Big Data, una investigación publicada en este año (Sebestyén, Czvetkó and Abonyi, 2021) clasifica los estudios realizados sobre el cambio climático mediante el big data, mediante grupos de colores, que fueron el resultado de analizar 442 artículos investigados que incluyen las palabras claves: Big data y cambio climático en el periodo 2012 a 2020. Las características de cada grupo se describen a continuación:

- El grupo "Rojo" son los estudios que se relacionan con las conexiones entre las tecnologías y los métodos de Big Data para los procedimientos de optimización que mide el impacto del cambio climático y la realización de predicciones. Consideran tecnologías de inteligencia artificial, algoritmos de aprendizaje como aprendizaje automático, análisis de datos, redes neuronales y computación en clúster. Los estudios que se han realizado en este grupo se relacionan con la predicción de epidemias y enfermedades, se ha utilizado el aprendizaje automático mediante el entrenamiento para pronósticos de clima.

- El grupo “naranja” son trabajos que describen problemas y adaptaciones climáticas relacionados con la agricultura. Las tecnologías del IoT, los sistemas de información y las redes de sensores que se aplican en el campo con la finalidad de recopilar información sobre el suelo, los fertilizantes, la humedad, la luz solar, la temperatura y la información geográfica de las tierras agrícolas para su seguimiento y poder vincularla a otras bases de datos para su análisis. El uso de sensores permite comprender e impulsar el conocimiento del concepto de agricultura climáticamente inteligente.

- El grupo "púrpura" representa a los estudios relacionados a los desastres naturales causados por el cambio climático, por ejemplo, inundaciones o deterioro de la calidad del aire, y la gestión de riesgos; considera procesos de toma de decisiones respaldados por técnicas de minería de datos y análisis estadístico y espacial.

- Los grupos “celestes”, comprende los estudios realizados para representar modelos climáticos que definan las interacciones de los impulsores del cambio climático. Incluye temas como ecología, biodiversidad, vulnerabilidad y el tema de los recursos hídricos.

- El grupo “verde” contempla investigaciones relacionadas con el desarrollo sostenible, que se ocupan de las emisiones de gases, los gases de efecto invernadero, la eficiencia energética y las políticas ambientales.

- El grupo “azul”, según los autores, son investigaciones que parecen revelar metodologías consideradas en climatología, urbanización y manejo adaptativo, señalando que la teledetección y las imágenes satelitales permiten recopilar una gran cantidad de datos que respaldan la cartografía y se utilizan para realizar más predicciones.

- El grupo "amarillo" consiste en investigaciones sobre el análisis de datos relacionados con el cambio climático global, para lo cual incluye métodos de visualización, análisis de regresión y análisis de series de tiempo.

Las investigaciones sobre el cambio climático considerando las tecnologías para el procesamiento y análisis de datos del big data se han diversificado en los colores que reflejan la especialidad de los grupos que integra variadas disciplinas para su estudio, comprensión y generación de información con la intención de prevenir riesgos, formular planes y políticas basadas en la evidencia científica que apoye la toma de decisiones.

3. CONCLUSIONS

Independientemente del color, es importante tener en mente la necesidad de considerar estos referentes en la formación de profesionales que sean capaces de aplicar tecnologías contemporáneas como el análisis de Big Data y los modelos basados en Internet de las cosas para obtener una base de conocimientos en cualquier campo mediante la recopilación y análisis de grandes conjuntos de datos heterogéneos complejos, pero con una visión de cuidado del medio ambiente.

Resulta un tema de interés y de actualidad el estudio del cambio climático, porque requiere un enfoque interdisciplinario, que entrelace diversas disciplinas, por lo que el concepto de Sistema de Sistemas (computación climática) (Sebestyén, Czvetkó and Abonyi, 2021) es la respuesta urgente, para analizar las interdependencias entre varios sistemas, por ejemplo, sistemas de información, humanos, ambientales; con sentido de responsabilidad y visión sustentable.

El panorama general presentado refleja la necesidad de considerar los elementos principales, integrados y relacionados

ISSN en trámite

con el problema de una comunidad que impacta a nivel mundial como el cambio climático, así como a los actores involucrados, los objetivos, antecedentes y supuestos relacionados con ese problema.

El estudio del cambio climático es un problema complejo, que no alcanzamos a dimensionar de forma integral, que requiere la integración y trabajo en conjunto de diversos investigadores, en la cual, el uso del big data, la minería de datos, las técnicas de inteligencia artificial, el internet de las cosas, y muchos otros elementos más permitirá realizar aportaciones para intercambiar información para tomar decisiones mejor informadas para el bien común.

REFERENCIAS

Faghmous, James H. and Kumar, Vipin. (2014). A Big data guide to understanding climate change: The Case for Theory-Guided Data Science. Mary Ann Liebert, INC. Vol. 2 No. 3. DOI: 10.1089/big.2014.0026

Folorunsho Olaiya and Adesesan Barnabas Adeyemo. (2012). Application of Data Mining Techniques in Weather Prediction and Climate Change Studies. I. J. Information Engineering and Electronic Business, 2012, 1, 51-59. DOI: 10.5815/ijieeb.2012.01.07.

Hassani, Hossein, Huang, Xu 2 and Silva, Emmanuel Subirà. (2019). Big Data and Climate Change. Big Data Cogn. Comput. 2019, 3, 12; doi:10.3390/bdcc3010012

Joyanes Aguilar, Luis. (2019). Inteligencia de negocios y analítica de datos. Una visión global de Business inteligence & Analytics. Alfaomega.

Moreno Salinas, José Gerardo. (2017). Científico de datos: codificando el valor oculto e intangible de los datos. Revista Digital Universitaria. Vol. 18, Núm. 7, septiembre-octubre 2017.

Ratner, Bruce. (2011). Machine-Learning Data Mining Techniques for Better Predictive Modeling and Analysis of Big Data. CRC Press Taylor & Francis Group

Sebestyén V, Czvetkó T and Abonyi J (2021) The Applicability of Big Data in Climate Change Research: The Importance of System of Systems Thinking. Front. Environ. Sci. 9:619092.doi:10.3389/fenvs.2021.619092

Subirà, Marc. (2020). Big Data, tecnología imprescindible para el cambio climático. Universidad Politécnica de Catalunya.

ISSN en trámite

Uso de Power BI en el estudio de fallecidos a causa de la COVID-19 en México

M.F. Vázquez-González*. B. Calixto-Calderón*. J.R. Bermeo Escalona*. S. Rivera*. L.A. Ceja*. R. Martínez-Peláez*

**Universidad De La Salle Bajío, León, 37150*
México (Tel: 477-710-8567; e-mail: {mvg614312, bcc614124}@udelasalle.edu.mx;

{jbermeo, sirivera, laceja, rmartinezp}@delasalle.edu.mx)

Resumen: Desde el comienzo de la pandemia por la COVID-19, se han generado muchos datos de manera nacional e internacional que se encuentran disponibles para su tratamiento y análisis. Debido al gran volumen de estos datos, la técnicas tradicionales de estadística o de visualización de datos no son las más eficientes, haciéndose necesario el uso de herramientas de analítica de datos, como Power BI. Power BI ha sido utilizado para crear visualizaciones de los diferentes impactos que ha generado la pandemia por COVID-19 en América Latina, permitiendo crear políticas públicas. En consecuencia, se presenta el uso de Power BI para analizar el impacto que ha tenido la pandemia en términos de personas fallecidas a causa de la enfermedad, evidenciado la lenta respuesta del gobierno mexicano, y corroborando trabajos previos con respecto a las principales comorbilidades asociadas a un caso grave por la COVID-19.

Palabras claves: COVID-19, datos, fallecidos, negocio inteligente, Power BI

1. INTRODUCTION

A finales de diciembre del 2019, se detectó el virus SARS-CoV-2 (coronavirus del síndrome respiratorio agudo grave tipo 2 que ocasiona la enfermedad por coronavirus 2019 (COVID-19)), en la ciudad de Wuhan, China (Shanmugaraj, et al., 2020), (Wang, et al., 2020). La Organización Mundial de la Salud (OMS) reconoció la situación por el número de contagios a nivel mundial como una pandemia el 11 de marzo de 2020.

La epidemia de coronavirus se extendió desde China a los países del sudoeste asiático, siendo en Tailandia donde se reportó el primer caso positivo por la COVID-19 fuera de China (Kannan, et al., 2020), (NPR, 2020). Posteriormente, se detectaron casos en la región de Lombardía, Italia, teniendo un impacto muy negativo entre la población Italiana. Con la llegada del virus a Italia, se continuó la expansión del virus para otros países europeos, como Alemania, España, Francia, Polonia, Reino Unido y Turquía, entre otros (Boldog, et al., 2020), (Cheng, et al., 2020), (McAleer, 2020).

Fue cuestión de tiempo que el virus llegará al continente Americano, siendo Estados Unidos el primero país en reportar un paciente positivo. En cuanto a América Latina, los casos positivos en Brasil, México, Argentina, Colombia y Bolivia tuvieron su origen en Italia. Los casos en Ecuador, Perú y Panamá tuvieron su origen en España.

Hasta el día 12 de enero de 2021, se tenían más de 91 millones de casos confirmados por COVID-19 en todo el mundo. En cuanto al número de decesos por la enfermedad, se tiene más de 1 millón 95 mil personas que perdieron la vida. Los casos positivos por coronavirus en México son más de 1.54 millones con más de 134 mil decesos.

En la Fig. 1, se evidencia el impacto que ha tenido el virus entre la población mexicana, posicionando, tristemente, a nuestro país entre los países con mayor número de casos. También se puede observar claramente que cinco países de América Latina se encuentran entre los más afectados. En el primer desafortunado puesto se tiene a Brasil con más de 8 millones de casos positivos, seguido por Colombia con más de 1.8 millones, Argentina con más de 1.7 millones, México con más de 1.5 millones, y finalmente Perú con más de 1 millón.

Es importante mencionar que, los primeros cuatro países con mayor número de contagios tienen características similares en términos de territorio y población. La suma de la población total de los primeros cuatro países asciende a 3,353,736,000 personas en un territorio acumulado de 44,358,562 Km2. También es relevante mencionar que, cinco países con mayor número de contagios se encuentran en Europa. De acuerdo con la Organización de la Naciones Unidas (ONU), países como Italia, Alemania, España, Francia y Reino Unido se encuentran con una alta población de 65 años o más con un porcentaje igual o superior al 20%. Este último dato es relevante por el gran número de personas fallecidas con edad igual o mayor a 60 años, en todo el mundo.

El tema socioeconómico o riqueza del país no parece ser determinante, en los primeros meses, cinco países miembros del G7 – Grupo de los Siete países más poderosos del mundo –

ISSN en trámite

se encuentran en la lista que aparece en la Fig. 1. Por lo tanto, la situación no se prevé mejor para países en vías de desarrollo, como es nuestro país (Gosting & Wiley, 2020).

Ubicación	Casos	Personas recuperadas	Muertes
Estados Unidos	22.7 M +223 k	-	376 k +2048
India	10.5 M +12,584	10.1 M +18,385	151 k +167
Brasil	8.13 M +25,822	7.27 M +41,901	204 k +480
Rusia	3.39 M	2.77 M	61,389
Reino Unido	3.12 M +46,169	0 +0	81,960 +529
Francia	2.79 M	203 k	68,060
Turquía	2.34 M +10,220	2.21 M	22,981 +174
Italia	2.29 M +12,530	1.63 M +16,035	79,203 +448
España	2.05 M	-	51,874
Alemania	1.94 M +11,706	1.59 M +23,264	41,799 +863
Colombia	1.8 M +15,003	1.63 M +11,595	46,451 +337
Argentina	1.73 M +8704	1.52 M +6965	44,654 +159
México	1.54 M +7594	1.16 M +9951	134 k +662

Fig. 1. Impacto mundial de la COVID-19.

En lo particular, en México, la ciudad con mayor número de casos positivos y defunciones durante los primeros meses fue la Ciudad de México. Esto se debe por varias variables entre las que se encuentran una población residente de 9 millones 209 mil 944 personas, ocasionado una densidad de 6,163.3 habitantes por kilómetro cuadrado; es decir, hay momentos donde no se puede cumplir con una sana distancia, ya sea en el transporte público, en las calles o en las oficinas, y se ha incrementado el número de personas de 65 años o más.

También es importante comprender que, la situación socioeconómica de nuestra población es frágil; es decir, muchas personas no pueden quedarse en casa percibiendo un sueldo debido a que son auto-empleadas, y por otra parte, varios puestos laborales son de atención al cliente dando como resultado que varias personas tuvieron que seguir en desplazamiento aún durante el confinamiento.

A partir del gran número de enfermos en China y Asia, se pudieron identificar síntomas y signos vitales relacionados con la enfermedad. De acuerdo con la información publicada por el Centro Chino para el Control y la Prevención de Enfermedades, la tasa de letalidad aumenta entre los pacientes con enfermedades preexistentes. Las condiciones comórbidas analizadas fueron (Wang, et al., 2020), (Wu & McGoogan, 2020) cardiovascular (10,5%), diabetes (7,3%), enfermedad pulmonar obstructiva crónica (6,3%), hipertensión (6,0%) y cáncer (5,6%).

2. TRABAJOS RELACIONADOS

Las herramientas de inteligencia de negocios son cada vez más utilizadas en la industria y en la academia debido a la posibilidad que ofrecen de visualizar los datos para generar estrategias competitivas, agregando un valor deferencial (Ahumada Tello & Perusquia Velasco, 2016), (Rosado Gomez & Rico Bautista, 2010). Derivado de la enorme generación de datos relacionados con la pandemia por la COVID-19, se ha requerido del uso de las tecnologías de información por la flexibilidad que ofrece para trabajar a distancia, la capacidad de realizar cálculos de manera rápida y la posibilidad de analizar, manipular y visualizar datos como nunca antes se había hecho, y esto gracias a la analítica de datos. Power BI es una herramienta que permita realizar análisis de datos para crear visualizaciones interactivas combinado con algoritmos de *machine learning*. Por tal motivo, Power Bi se ha empleado en el análisis y visualización de datos durante la pandemia por la COVID-19.

En (Espinoza-Tinoco, et al., 2021), se utilizó Power BI para conocer el impacto que ha tenido la pandemia en materia economica en el mundo y sudamérica. A través de Power BI, los autores identificaron 38 variables economicas que han sido afectadas por la pandemia en paises de sudamérica, siendo Perú, Chile, Colombia y Paragua los países que más afectaciones han tenido en está materia. Por otra parte, Power BI fue utilizado para analizar los datos de la COVID-19 en Ecuador (Vivas & Vivas, 2021), permitiendo identificar las vairables que explican la evolución de la enfermedad. El resultado fue una representación visual rápida y flexible evidenciando que la enfermedad continuaba en ascenso. Finalmente, Power BI fue utilizado para visualizar el impato de la COVID-19 en América Latina y el Caribe, permitiendo crear politicas públicas y fiscales para minimizar el riesgo huanitario e impacto económico en la región (Mojica Baltodano, 2020).

3. METODOLOGÍA

El tipo de estudio de la presente investigación fue de carácter descriptivo, utilizando la exploración de los datos publicados por la Secretaría de Salud de México para analizar el impacto de la COVID-19 entre la población mexicana. Este estudio nos permitió identificar indicadores claves para conocer el impacto en términos de personas fallecidas a causa de la COVID-19. La recolección de datos fue del 8 al 30 de junio debido al gran número de casos y defunciones que se tuvieron en esas fechas.

Se utilizaron los archivos publicados por la Dirección General de Epidemiología de la Secretaría de Salud de México en el sitio Web https://www.gob.mx/salud/documentos/datos-abiertos-bases-historicas-direccion-general-de-epidemiologia.

ISSN en trámite

El conjunto de datos se generó a partir del estudio epidemiológico de un caso sospechoso de enfermedad respiratoria viral donde los pacientes pudieron responder sí, no o desconocido en cada pregunta. El conjunto de datos proporciona datos demográficos que incluyen edad, sexo, estado, y una o más de las siguientes comorbilidades y afecciones: asma, enfermedad cardiovascular, enfermedad renal crónica (ERC), enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), diabetes, inmunosupresión, hipertensión, obesidad. , embarazo en mujeres, presencia de neumonía, otras comorbilidades y contacto con una persona que tuvo un resultado positivo en la prueba de COVID-19. Además, el conjunto de datos proporciona datos de atención médica, como el tipo de paciente (ambulatorio u hospitalizado), hospitalizado en la unidad de cuidados intensivos (sí, no o desconocido), intubado (sí, no o desconocido), resultados de pruebas de laboratorio de COVID-19 por reacción en cadena de la polimerasa (resultado positivo, negativo o pendiente), fecha_ingreso, fecha_síntomas, y fecha_defunción. A partir de estos datos, se creó la variable falleció (sí o no) en función de la fecha de la defunción.

A partir del conocimiento de los datos, se utilizó el archivo del 8 de junio del 2020 para crear la base de datos. Además, se descargaron los archivos de los días 12, 16, 20, y 30 de junio para actualizar el campo falleció en la base de datos. El proceso de tratamiento de los datos se basó en un ETL (Extracción-Transformación-Carga). El gestor de base de datos utilizado es *MySQL* y el programa de cómputo para analizar los datos es *Power BI*.

4. DESARROLLO

4.1 Extracción y Preparación de los Datos

Una vez descargados los archivos, se realizaron las siguientes acciones en el programa de cómputo Excel.

Se eliminaron los registros de pacientes con prueba negativa para la COVID-19, es decir se seleccionaron todos los pacientes que tuvieran el valor de 1 (Positivo SARS-CoV-2) en la columna de "Resultado". También se eliminaron las siguientes columnas: nacionalidad, habla_lengua_indig, migrante, país_nacionalidad y país_origen. Estas columnas fueron eliminadas dado que para el presente trabajo no son relevantes. A partir de las modificaciones, se creó una nueva columna con el nombre de "Falleció", la cual tiene valor de 1 en todos aquellos pacientes que en la columna de "Fecha_def" tuvieran una fecha válida diferente al default 9999-99-99. Los pacientes con "Fecha_def" igual a 9999-99-99 tienen un valor de 0. Es decir, está columna ayuda a detectar los pacientes fallecidos. Finalmente, se guardó el archivo en formato CSV. A partir de este punto, se precedió a realizar la actualización de los datos con las fechas previamente definidas, utilizando la sentencia presentada en la Fig. 2.

```
UPDATE 8Junio
LEFT JOIN 12Junio on 12Junio.ID_REGISTRO = 8Junio.ID_REGISTRO
SET 8Junio.FECHA_DEF = 12Junio.FECHA_DEF
WHERE 12Junio.FECHA_DEF <> '9999-99-99';

UPDATE 8Junio
LEFT JOIN 12Junio on 12Junio.ID_REGISTRO = 8Junio.ID_REGISTRO
SET 8Junio.FALLECIÓ = 12Junio.FALLECIÓ
WHERE 12Junio.FALLECIÓ = '1';
```

Fig. 2. Función DAX utilizada.

4.2 Transformación y Carga de los Datos

Con la base de datos actualizada, se procedió a preparar los datos a través del editor de *Power Query*. El primer paso fue importar la base de datos a *Power BI*. Posteriormente, se realizaron las transformaciones que se presentan en la Tabla 1.

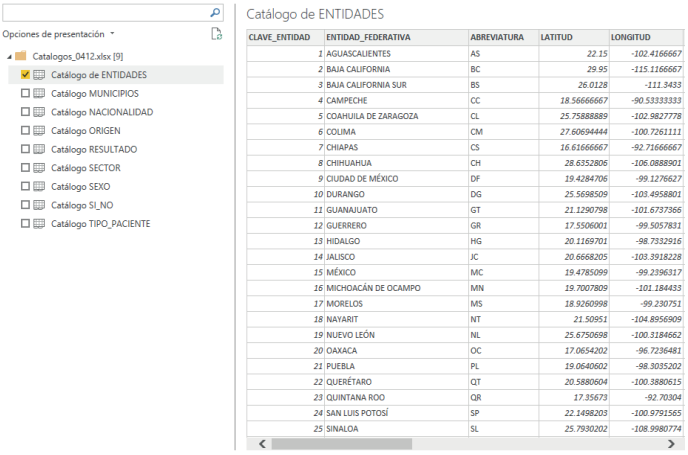
Tabla 1. Transformación de los datos

Columna	Transformación
SEXO	Tipo de dato: Texto Valor 1: Mujer Valor 2: Hombre
TIPO_PACIENTE	Tipo de dato: Texto Valor 1: Ambulatorio Valor 2: Hospitalizado
FALLECIÓ	Tipo de dato: Texto Valor 1: Si Valor 2: No
NEUMONÍA	Tipo de dato: Texto Valor 1: Si Valor 2: No Valor 99: NA
INTUBADO	Tipo de dato: Texto Valor 1: Si Valor 2: No Valor 99: NA Valor 97: NA
DIABETES	Tipo de dato: Texto Valor 1: Si Valor 2: No Valor 98: NA
EPOC	Tipo de dato: Texto Valor 1: Si Valor 2: No Valor 98: NA
ASMA	Tipo de dato: Texto Valor 1: Si Valor 2: No Valor 98: NA
INMUNUSUPR	Tipo de dato: Texto Valor 1: Si Valor 2: No Valor 98: NA
HIPERTENSION	Tipo de dato: Texto Valor 1: Si Valor 2: No Valor 98: NA
OTRA_COM	Tipo de dato: Texto Valor 1: Si Valor 2: No Valor 99: NA Valor 98: NA
CARDIOVASCULAR	Tipo de dato: Texto Valor 1: Si

ISSN en trámite

	Valor 2: No Valor 99: NA Valor 98: NA
OBESIDAD	Tipo de dato: Texto Valor 1: Si Valor 2: No Valor 99: NA Valor 98: NA
RENAL_CRÓNICA	Tipo de dato: Texto Valor 1: Si Valor 2: No Valor 99: NA Valor 98: NA
TABAQUISMO	Tipo de dato: Texto Valor 1: Si Valor 2: No Valor 99: NA Valor 98: NA
OTRO_CASO	Tipo de dato: Texto Valor 1: Si Valor 2: No Valor 99: NA Valor 98: NA

Además, se cargó el catálogo de entidades con las columnas de Latitud y Longitud como se muestra en la Fig. 3. Posteriormente, se configuró la categoría de datos para las columnas de latitud y longitud. Como resultados, se definió el modelo dimensional con Power BI (ver Fig. 4).



CLAVE_ENTIDAD	ENTIDAD_FEDERATIVA	ABREVIATURA	LATITUD	LONGITUD
1	AGUASCALIENTES	AS	22.15	-102.4166667
2	BAJA CALIFORNIA	BC	29.95	-115.1166667
3	BAJA CALIFORNIA SUR	BS	26.0128	-111.3433
4	CAMPECHE	CC	18.56666667	-90.53333333
5	COAHUILA DE ZARAGOZA	CL	25.75888889	-102.9827778
6	COLIMA	CM	27.60694444	-100.7261111
7	CHIAPAS	CS	16.61666667	-92.71666667
8	CHIHUAHUA	CH	28.6352806	-106.0888901
9	CIUDAD DE MÉXICO	DF	19.4284706	-99.1276627
10	DURANGO	DG	25.5698509	-103.4958801
11	GUANAJUATO	GT	21.1290798	-101.6737366
12	GUERRERO	GR	17.5506001	-99.5057831
13	HIDALGO	HG	20.1169701	-98.7332916
14	JALISCO	JC	20.6668205	-103.3918228
15	MÉXICO	MC	19.4785099	-99.2396317
16	MICHOACÁN DE OCAMPO	MN	19.7007809	-101.184433
17	MORELOS	MS	18.9260998	-99.230751
18	NAYARIT	NT	21.50951	-104.8956909
19	NUEVO LEÓN	NL	25.6750698	-100.3184662
20	OAXACA	OC	17.0654202	-96.7236481
21	PUEBLA	PL	19.0640602	-98.3035202
22	QUERÉTARO	QT	20.5880604	-100.3880615
23	QUINTANA ROO	QR	17.35673	-92.70304
24	SAN LUIS POTOSÍ	SP	22.1498203	-100.9791565
25	SINALOA	SL	25.7930202	-108.9980774

Fig. 3. Carga del catálogo de Entidades Federativas.

Con los datos cargados y el modelo dimensional preparado, se procedió a crear las métricas, utilizando el porcentaje de fallecidos para configurar el semáforo en el mapa geográfico. La creación de la métrica se realizó utilizando DAX, como se muestra en la Fig. 4.

Se creó la visualización de influenciadores clave con la siguiente configuración: a) Analizar: Bandera de Falleció y b) Explicar por: Todas las Comorbilidades y Edad. También se creó un reporte con el detalle de número y porcentaje total de enfermos y fallecidos por entidad federativa. Además, se creó un mapa geográfico con los estados de la República Mexicana. En este mapa se puede observar el semáforo de cada estado con respecto al porcentaje de fallecidos. Este semáforo se configuró con respecto al porcentaje total de fallecidos equivalente al 15.49%.

Al finalizar el primer *dashboard* y analizar los datos con el algoritmo de *machine learning* incorporado en *Power BI*, se detectó que las variables de Intubado y Neumonía influían considerablemente en la variable creada "FALLECIÓ". Esto debido a que ambas condiciones son consecuencia de la gravedad de la COVID-19; por lo tanto, ambas variables fueron removidas para detectar las comorbilidades que inciden mayormente en complicaciones en los pacientes.

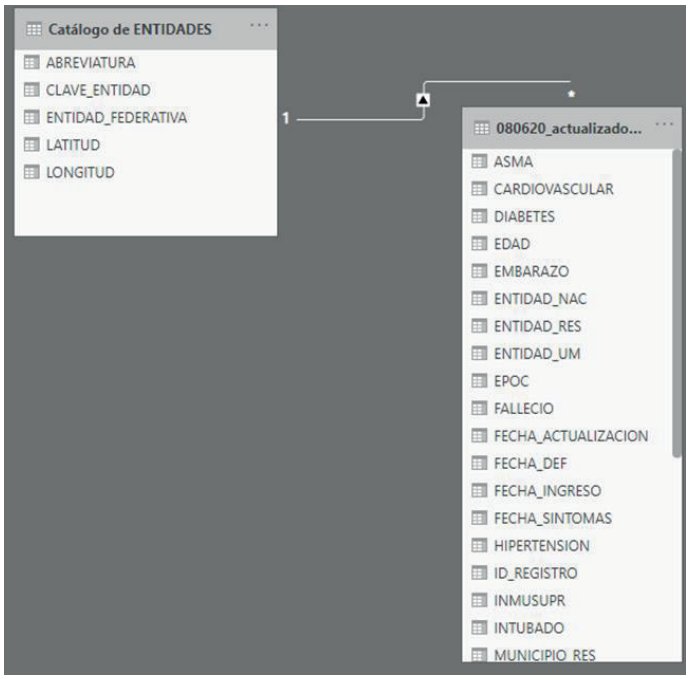


Fig. 4. Modelo dimensional con Power BI.

```
%FALLECIÓ =
CALCULATE(SUM('080620_actualizado_positivos'[RESULTADO]),'080620_actualiz
ado_positivos'[FALLECIÓ]= "SI")/
SUM('080620_actualizado_positivos'[RESULTADO])
```

Fig. 5. Función DAX utilizada.

5. RESULTADOS

El resultado del *dashboard* realizado con los datos del 8 de junio, se muestra en las Figuras 6, 7 y 8. En la Fig. 6, se presentan el número total de pacientes fallecidos y la distribución de decesos entre los meses de febrero a junio. También se presenta la distribución de personas fallecidas por sexo. En la Fig. 7, se presenta claramente que el mayor influenciador para que un paciente pierda la vida a causa de la COVID-19 es la edad, seguido de las comorbilidades enfermedad respiratoria crónica (EPOC) y enfermedad renal crónica. En la Fig. 8, se muestra el mapa de fallecidos por entidad federativa.

ISSN en trámite

A partir del *dashboard*, se puede conocer que,

- La edad es el primer influenciador Clave. Si la edad aumenta, la probabilidad de fallecer se incrementa.
- Al eliminar INTUBADO y NEUMONÍA del algoritmo, se pudo detectar que RENAL_CRÓNICA se enlista como la segunda comorbilidad mortal para los pacientes con COVID-19.
- Los pacientes con EPOC tienen una alta probabilidad de fallecer, al ser el primer influenciador.
- Las comorbilidades que siguen después de EPOC y RENAL_CRÓNICA: se mencionan a continuación, dado el orden de aparición en la visualización: DIABETES, HIPERTENSIÓN, INMUSUPR y CARDIOVASCULAR.

Con estas primeras premisas, se concluyó que el gobierno mexicano no había detectado en los primeros seis meses de iniciada la pandemia, que la comorbilidad de Renal Crónica estaba dentro de las comorbilidades graves para los pacientes de COVID-19, dado que en los medios de comunicación únicamente se hacía énfasis en padecimientos como: diabetes, obesidad, hipertensión, tabaquismo, EPOC, o algún otro padecimiento cardiovascular o inmunosupresión. Incluso en la calculadora publicada en: http://www.imss.gob.mx/covid-19/calculadora-complicaciones únicamente se hacía referencia a estas comorbilidades. Se identificó que, fue hasta mediados de septiembre de 2020, cuando Secretaría de Salud Pública de México incluyó en la calculadora de complicaciones la comorbilidad de Renal Crónica.

También se pudo analizar la cantidad de enfermos por Estado, lo que arrojó las siguientes premisas:

- El porcentaje de fallecidos a nivel República Mexicana era del 15.49% equivalente a 22,724 muertes.
- El porcentaje de enfermos sin fallecer era del 84.51% lo que equivalía a 123,957 pacientes.
- El tercer lugar de los estados con mayor número de enfermos era la Ciudad de México, el Estado de México y Baja California.
- El bottom 3 de los estados con el menor número de enfermos era Colima, Zacatecas y Durango.

Con base en la visualización de influenciadores Clave (Fig. 7), la probabilidad de que fallecer sea Sí, se incrementaba cuando la Entidad Federativa era Morelos, dado que es el primer influenciador Clave, seguido por las siguientes entidades federativas, mismas que se refieren en el orden de aparición en la visualización: Hidalgo, Baja California, Quintana Roo, Estado de México, Puebla, Sinaloa, Chihuahua, Campeche, Guerrero y Veracruz.

Sin embargo, con base en esta última premisa, se planteó la pregunta: ¿cómo es posible que estos estados tengan la mayor probabilidad de pacientes que puedan fallecer, si tales entidades federativas no registran una gran cantidad de fallecidos? Para responder tal cuestionamiento, recuérdese que la visualización de influenciadores Clave funciona con base al porcentaje promedio excluyendo el elemento a analizar, lo que significa que el porcentaje de fallecidos en estos estados, enlistados como influenciadores Clave es mayor que el porcentaje promedio de la muestra de datos.

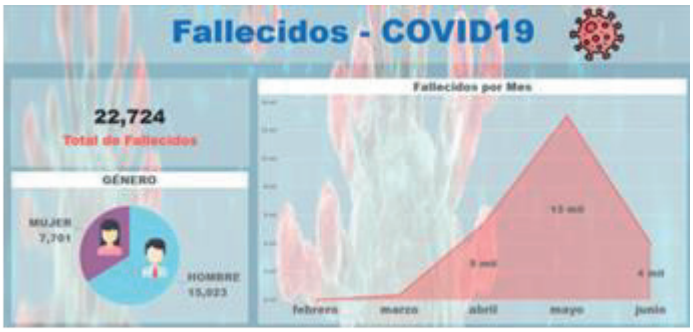


Fig. 6. Dashboard con datos del 8 de junio de 2020.

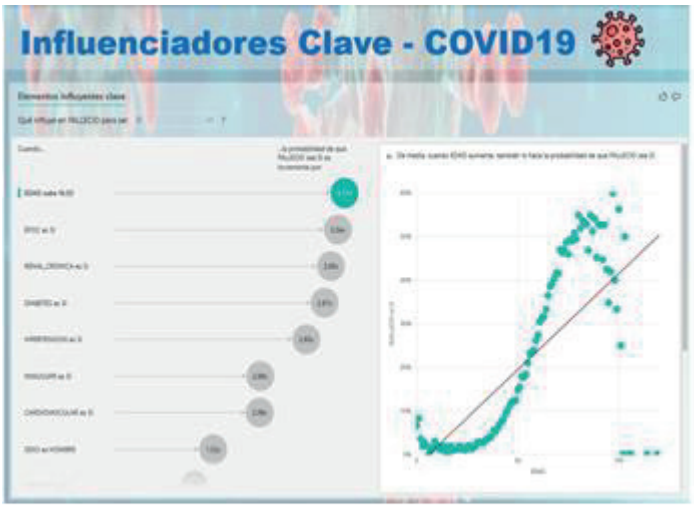


Fig. 7. Influenciadores clave de fallecimiento por COVID-19.

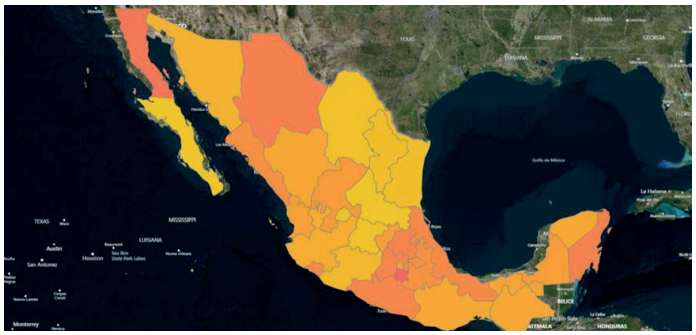


Fig. 8. Mapa de fallecidos al 8 de Junio por Entidad Federativa.

ISSN en trámite

Tomando al Estado Morelos como el primer influenciador, se tiene que, Morelos es el influenciador número uno con 28.43% de Fallecidos sean SÍ lo que está por encima de la línea promedio que es del 15.30%, por lo cual, la probabilidad de fallecer sea SÍ se incrementa 1.77 veces para el Estado de Morelos como se visualiza en la Fig. 9.

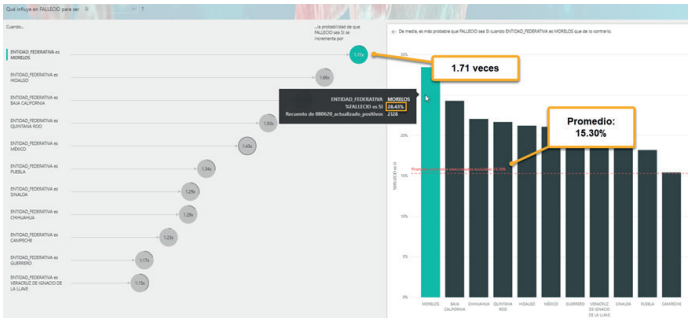


Fig. 9. Influenciador clave por entidades federativas.

6. CONCLUSIONS

La pandemia ha afectado a todos los países. Actualmente todas las naciones enfrentan una crisis sanitaria, económica y social y esto ha creado interés y necesidad por saber y estar informado acerca del COVID-19 para buscar respuestas a los múltiples desafíos. En la actualidad, se cuenta con un sinfín de herramientas tecnológicas y fuentes de información que facilitan el acceso a datos sobre el comportamiento de la pandemia, lo cual ha generado un fenómeno conocido como "Infodemia", término que es definido por la Organización de Naciones Unidas como "una epidemia de desinformación vía datos falsos, errados o maliciosos". Esto es debido al gran volumen de información proporcionada y distribuida en la Web. Por tanto, se considera que es responsabilidad de los interesados en estos temas, procesar y analizar la información que aparece en los diversos medios de comunicación, llevando a cabo comparaciones y proyecciones con la finalidad de dimensionar la magnitud de la pandemia, proyectando posibles escenarios para anticiparse a ellos. Sin duda, es determinante descubrir patrones y entender el comportamiento de la pandemia, permitiendo salvar vidas y evitando la "Infodemia" con el posible impacto de crear políticas públicas eficaces y eficientes que cuenten con sustento de fuentes de información confiables.

REFERENCES

Ahumada Tello, E., y Perusquia Velasco, J. (2016). Inteligencia de negocios: estrategia para el desarrollo de competitividad en empresas de base tecnológica. *Contaduría y Administración*, 61(1), pp. 127-158.

Boldog, P., *et al.* (2020). Risk assessment of novel coronavirus COVID-19 outbreaks outside China. *Journal of Clinical Medicine*, 9(2), p. 571.

Cheng, W., *et al.* (2020). Preparedness and proactive infection control mesures against the emerging Wuhan Coronavirus pneumonia in China. *J Hosp Infect*, 104(3), pp. 254-255.

Espinoza-Tinoco, L. y otros. (2021). Un dashboard con Power BI de la economía sudamericana en tiempos de COVID-19. FIPCAEC, 6(2), pp. 652-673.

Gosting, L., and Wiley, L. (2020). Governmental public health powers during the COVID-19 pandemic - stay-at-home orders, business closures, and travel restrictions. *Journal of the American Medical Association*, 323(21), pp. 2137-2138.

Kannan, S., Syed, A., Sheeza, P., and Hemalatha, K. (2020). COVID-19 (Novel Coronavirus 2019) - recent trends. *European review for medical and pharmacological sciences*, Volumen 24, pp. 2006-2011.

McAleer, M. (2020). Prevention is better than the cure: Risk management of COVID-19. *Journal of Risk and Financial Management*, 13(3), p. 46.

Mojica Baltodano, M.A. (2020). Tableros de impacto de los datos de Coronavirus Covid-19 en América Latina y el mundo utilizando Power BI como herramienta de visualización. REICE, 8(15), pp. 88-103.

NPR. (2020). Chinese authorities begin quarantine of Wuhan city as coronavirus cases multiply. Available at: https://www.npr.org/2020/01/23/798789671/chinese-authorities-begin-quarantine-of-wuhan-city-as-coronavirus-cases-multiply [Último acceso: 8 Mayo 2020].

Rosado Gómez, A. & Rico Bautista, D., 2010. Inteligencia de negocios: estado del arte. Scientia et Technica, XVI(44), pp. 321-326.

Shanmugaraj, B., Siriwattananon, K., Wangkanont, K., and Phoolcharo, W. (2020). Perspective on monoclonal antibody therapy as potential therapeutic intervention for Coronavirus disease-19 (COVID-19). *Asian Pacific Journal of Allergy and Immunology*, 38(1), pp. 10-18.

Vivas, K. & Vivas, D., 2021. Estadísticas y Análisis del Covid-19 en Ecuador Utilizando Microsoft Power BI. Revista INGENIO, 4(1), pp. 27-39.

Wang, B., Li, R., Lu, Z., and Huang, Y. (2020). Does comorbidity increase the risk of patients with COVID-19: evidence from meta-analysis. *Aging (Albany NY)*, 12(7), pp. 6049-6057.

Wang, C., Horby, P., Hayden, F., and Gao, G. (2020). A novel coronavirus outbreak of global health concern. *Lancet*, 395(10223), pp. 470-473.

Wu, Z., and McGoogan, M. (2020). Characteristics of and Important Lessons From the Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) Outbreak in China: Summary of a Report of 72 314 Cases From the Chinese Center for (Anon., 2020) Disease Control and Prevention. *Journal of the American Medical Association*, 323(13), pp. 1239-1242.

ISSN en trámite

Módulo de Reconocimiento de Objetos para Robot Móvil con Sistema SLAM.

Katia R. Benítez C.*, José Ruiz A.**

Tecnológico Nacional de México / CENIDET
Cuernavaca, Morelos, México (e-mail:
{ katia.benitez19ca & josera** }@cenidet.edu.mx)*
Departamento de Ciencias Computacionales

Resumen: Se reporta un módulo de reconocimiento y localización de objetos y lugares (las "metas") para un sistema SLAM. El módulo tiene la arquitectura de un módulo de asociación, con la diferencia de que su base de datos va previamente cargada con la descripción de las metas, y es invariante en el tiempo. A la vez que el sistema SLAM hace su exploración, mapeo y localización, el módulo de reconocimiento va analizando la escena, describiéndola mediante bolsas de palabras. Si la bolsa de palabras se encuentra en su base de metas, el módulo reporta su hallazgo mediante la anotación del identificador del objeto o lugar encontrado sobre el mapa del sistema SLAM.

Keywords: Detección de objetos, SLAM, Bag of Words.

1. INTRODUCCIÓN

Los humanos tenemos la capacidad de reconocer múltiples objetos en una imagen o escenario, aún si el objeto tiene diferencias de rotación, tamaño, escala o posición. Aunque podemos realizar esta tarea sin esfuerzo, en la visión artificial esta tarea es un desafío, debido a que se necesita superar o minimizar varios problemas como la iluminación, la escala, la textura o características(Siegwart & Nourbakhsh, 2004).

La navegación autónoma ha tomado gran importancia a través de los años, por su gran utilidad en áreas como la agricultura (Pou et al., 2010), exploración espacial (Vepa, 2019), atención al cliente (Trulls et al., 2011) y exploración en zonas de riesgo (Calisi et al., 2005). En los primeros trabajos que se realizaron, al robot se le proporcionaba un mapa prefabricado. Bajo este enfoque, no fue posible crear un robot autónomo para realizar tareas útiles, como ayudar a los humanos en entornos hostiles como, la construcción, la minería, la gestión de residuos tóxicos o simplemente tareas de servicio cotidianos como barrer, desplazar objetos, etc. Para cumplir con estas tareas, el robot debería poder crear el mapa por sí mismo, debido a que en la navegación autónoma se requiere generar mapas 3D y localizarse dentro del mismo para crear trayectorias en un entorno desconocido. Para esto se desarrolló la Localización y Mapeo Simultáneo (SLAM)(Bailey & Durrant-Whyte, 2006; Durrant-Whyte & Bailey, 2006), el cual crea un mapa en un ambiente desconocido y se localiza dentro de ese mapa en tiempo real.

El reconocimiento también se ha utilizado en sistemas SLAM, enfocado principalmente al cierre de ciclos, esto para detectar si el robot móvil ha regresado a un área previamente visitada y corregir el error acumulado durante la trayectoria(Liu et al., 2018; Mahon et al., 2008; Se et al., 2005). Uno de los métodos más utilizados en la cerradura de ciclos es la bolsa de palabras visuales (Bag of Visual Words o BoVW) (Csurka et al., 2004). Esta técnica usa una discretización del espacio de descripción empleado por algún método de detección de puntos destacados que aparezcan en una imagen de la escena. Esta discretización de celdas irregulares que llamamos palabras visuales hace que el espacio de descripción tenga dimensiones manejables, y no ocupe espacio para descripciones que no aparecen en la escena, esto permite gestionar grandes conjuntos de imágenes. Para describir las características se puede emplear casi cualquier descriptor, por ejemplo, ORB (Rublee et al., 2011), SIFT (Lowe, 1999, 2004) o SURF (Bay et al., 2006).

Un método de BoVW fue presentado por Galvez-Lopez y Tardós llamado DBoW2 (Gálvez-López & Tardós, 2012) donde se utilizó por primera vez las bolsas de palabras binarias obtenidas de los descriptores BRIEF (Calonder et al., 2010) y el detector de características FAST (Hast et al., 2015), reduciendo el tiempo de las extracciones de características.

Dentro de los sistemas SLAM se desarrollaron sistemas de reconocimiento como “SLAM with Object Discovery, Modeling and Mapping” (Choudhary et al., 2014) que utiliza los objetos descubiertos como puntos de referencia para ayudar a localizar el robot y para detectar cierres de bucles en mapas más grandes.

Otros trabajos también realizaron detección de objetos y los coloca en el mapa generado por el sistema SLAM.

Pillai y Leonard presentaron un sistema SLAM-AWARE basado en ORB-SLAM (Mur-Artal et al., 2015), enfocado al reconocimiento de objetos utilizando BoVW para la clasificación (Pillai & Leonard, 2015). Otro trabajo realizo detección de objetos para robots de servicios (Jensfelt et al.,

ISSN en trámite

2007) utilizando histogramas de color de coocurrencia para resolver problemas con fondo complejo, iluminación variable y oclusión de objetos. Sin embargo, estos procesos pueden generar alto costo computacional lo que afecta al tiempo de procesamiento de la información. En tareas de búsqueda y rescate o atención al cliente, la respuesta debe ser en tiempo real, provocando que el hardware necesario tenga precios elevados y fuera del alcance del uso común.

Este trabajo reporta un sistema de reconocimiento de objetos y lugares utilizando BoVW y ORB sobrepuesto a un sistema ORB-SLAM2 (Mur-Artal & Tardós, 2017) que funciona en tiempo real y reporta sus hallazgos directamente sobre el mapa generado sin afectar el rendimiento del sistema. El sistema emplea una pequeña base de datos (las "metas") con las descripciones de los objetos y lugares que se están buscando. El reconocimiento es realizado encontrando asociaciones entre la base de metas y la escena actual que esté por encima de algún umbral de significancia.

El resto del artículo está organizado de la siguiente manera. Sección 2 describe el módulo propuesto. Sección 3 presenta la experimentación y resultados. Sección 4 presenta conclusiones y trabajo a futuro.

1.1 ORB-SLAM2

Es un sistema SLAM para cámaras monoculares, estéreo y RGB-D realizado por R. Mur-Artal y J. D. Tardós(Mur-Artal & Tardós, 2017), basado en su trabajo anterior ORB-SLAM. El sistema cuenta con 3 procesos paralelos:

1. *El seguimiento* que ayuda a localizar la cámara con cada *frame* al encontrar coincidencia de características con el mapa y minimizar el error de reproyección aplicando *bundle adjustment (BA),*
2. *el mapeo local* que gestiona el mapa y lo optimiza realizando BA locales, y
3. *la cerradura de ciclos* para detectar bucles grandes y corregir el error acumulado realizando una optimización de la pose.

El módulo de cerradura de ciclos o *asociación* usa una base de datos (BD) de descripciones de las escenas que va explorando. Las descripciones se codifican como bolsas de palabras visuales o BoVW. La función de la BD es tener una memoria compacta de todo lo visitado por el robot. Esta BD va creciendo según avanza la exploración, por lo cual el ciclo de ejecución va creciendo con el tiempo.

Debido a que este sistema SLAM genera un mapa y muestra la localización durante la trayectoria, es ideal para el módulo de reconocimiento propuesto el cual permite reportar la ubicación de los hallazgos sobre el mapa en tiempo real.

2. MÓDULO DE RECONOCIMIENTO PROPUESTO

El módulo de reconocimiento usa una base de datos de descripciones de los objetos y lugares que se desean reconocer. Cada objeto y lugar se registra varias veces, desde varios puntos de vista, para facilitar que sea reconocido. A diferencia de la BD de asociación, la base de datos de reconocimiento no crece, por lo cual el módulo de reconocimiento se tarda siempre lo mismo en ejecutar.

La funcionalidad de este módulo consiste en reconocer objetos previamente definidos y localizarlos en el mapa generado en este caso por ORB-SLAM2. El módulo se realizó utilizando el descriptor ORB para la extracción y descripción de características, debido a que es invariante a rotación y escala; además es rápido para la extracción y de bajo costo computacional por lo que permite el funcionamiento en tiempo real. El método de BoVW que se utilizó fue DBoW2 para el reconocimiento.

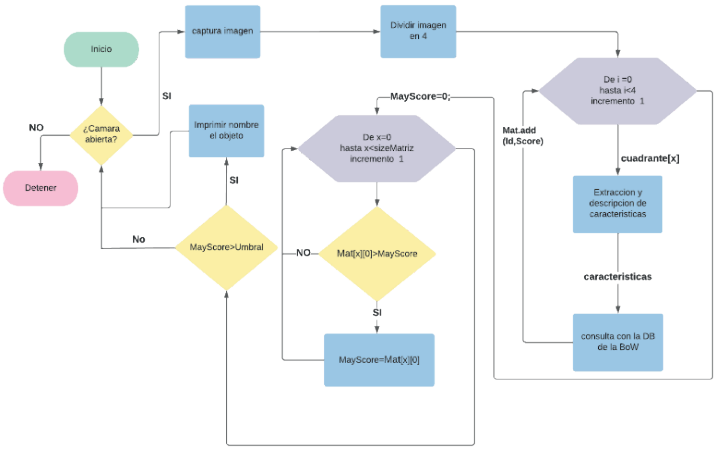


Fig. 1. Diagrama de flujo de la búsqueda de objetos

El proceso del módulo de reconocimiento (Fig. 1) se describe a continuación.

- Lo primero consiste en cargar la base de datos, previamente creada con ayuda del ejemplo que se encuentra en el repositorio de la librería DBoW2(Galvez-Lopez & Tardos, 2012), para identificar los objetos. Al momento de crear la base de datos se crea un archivo de texto que contiene el etiquetado de los objetos y lugares.
- El siguiente paso es la obtención de la imagen de entrada y su segmentación en cuatro cuadrantes, debido a que al utilizar ORB para la extracción y descripción de características es necesario que los puntos destacados se encuentran distribuidos a través de toda la escena. De otra forma, las características pueden

ISSN en trámite

quedar agrupadas en un mismo objeto en un escenario con diversos objetos.

- Después, se extraen y describen las características con ORB para posteriormente buscar la correlación de cada cuadrante en la base de datos de la BoVW.
- Finalmente, si se encuentran objetos o lugares repetidos en los cuadrantes sus puntajes (scores) son sumados y se extrae el objeto o lugar con mayor valor detectado a partir de los puntajes obtenidos y esta es comparada con un umbral como se muestra en la ecuación (1), el cual es establecido para minimizar los falsos positivos.

$$obj = \begin{cases} 1, si\ max(v) \geq umbral \\ 0, \qquad en\ otro\ caso \end{cases} \qquad (1)$$

Dónde $max(\bar{v})$ es la clase predominante que se compara con el valor del umbral que se estableció en 0.1.

- Finalmente, cuando la clase predominante es mayor al umbral, el nombre de la clase es impreso en el mapa generado por el sistema ORB-SLAM2, en la localización actual que se encuentra el robot.

El principal objetivo en la experimentación es evaluar la precisión y rendimiento del sistema de reconocimiento de objetos y lugares. Para realizar los experimentos se utilizó el dataset TUM(Sturm et al., 2012). Los experimentos se realizaron con la secuencia *Freiburg3* utilizando una PC con AMD Ryzen 5 3600x y una RAM de 32Gb. Para la detección se utilizaron 6 objetos con 9 imágenes de diferentes vistas cada uno, que fueron extraídos de este dataset, Fig. 2.



Fig. 2. Objetos para crear la base de datos.

La secuencia Freiburg3 muestra una escena de oficina con dos escritorios separados por una mampara, grabados desde una cámara portada manualmente por una persona que camina alrededor del conjunto, Fig. 3.



Fig. 3. Escena de la secuencia Freiburg3.

Para la interpretación de los resultados del reconocimiento y mapeo de objetos debe tomarse en que en cada imagen de esta secuencia pueden apreciarse varios de los objetos a la vez, y un mismo objeto puede detectarse desde dos puntos del recorrido, Fig. 4.

3. EXPERIMENTACIONES

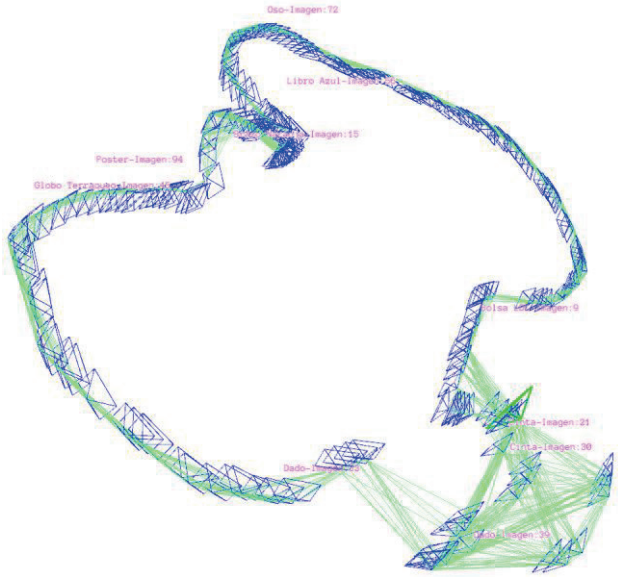


Fig. 4. Muestra de la detección de objetos durante el recorrido.

Para esta experimentación se usaron 10 repeticiones de la secuencia *freiburg3* para calcular la precisión del reconocimiento, ya que en cada repetición los resultados pueden variar, Fig. 5. Usamos la ecuación (2) para la precisión.

$$precisión = \frac{TP}{TP+FP} \qquad (2)$$

ISSN en trámite

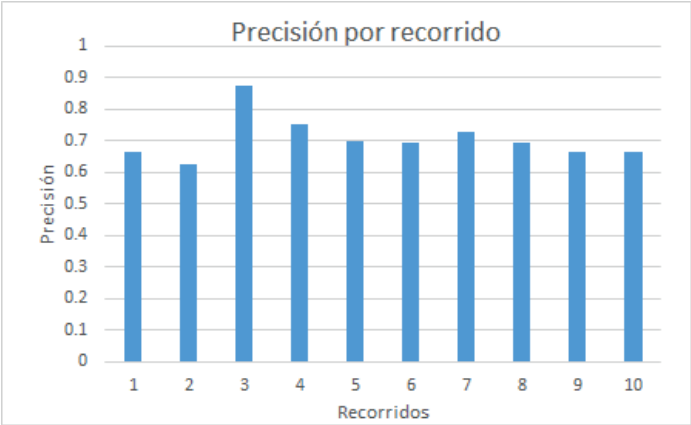


Fig. 5. Gráfica de precisión de cada recorrido.

El umbral (0.95 o 95% en este experimento) determina la precisión y el número de falsos positivos. En este caso, se prioriza reducir los falsos positivos, a costa de reducir también los verdaderos positivos, es decir la precisión.

La Fig. 6, muestra el resultado de un experimento en escenarios exteriores con la base de datos KITTI. Aquí se aprecia la utilidad de localizar las etiquetas de los objetos encontrados directamente sobre el mapa producido por el SLAM. En este caso, la base de datos de objetos a reconocer tiene 60 objetos y lugares distintos, divididos en 10 clases. La etiqueta corresponde a la clase. El recorrido corresponde a la secuencia 02 de KITTI.

Respecto a la eficiencia del módulo de rendimiento, podemos citar su tiempo de ejecución, mostrado en la Tabla I. Se toma como referencia el tiempo de ejecución del sistema ORB-SLAM2. Debe considerarse que: la secuencia Freiburg3 corresponde a un recorrido muy corto, y el tiempo citado "Sin el módulo" va a crecer al progresar la exploración. La diferencia de 0.0004517 segundos que se tiene "Con el módulo" no va a crecer, pues la base de imágenes es invariante.

TABLA I. Media del tiempo en milisegundos por cuadro de ORB-SLAM2

ORB-SLAM2	Tiempo (ms)
Sin el módulo	≈22.4749 ms
Con el módulo	≈22.9266 ms

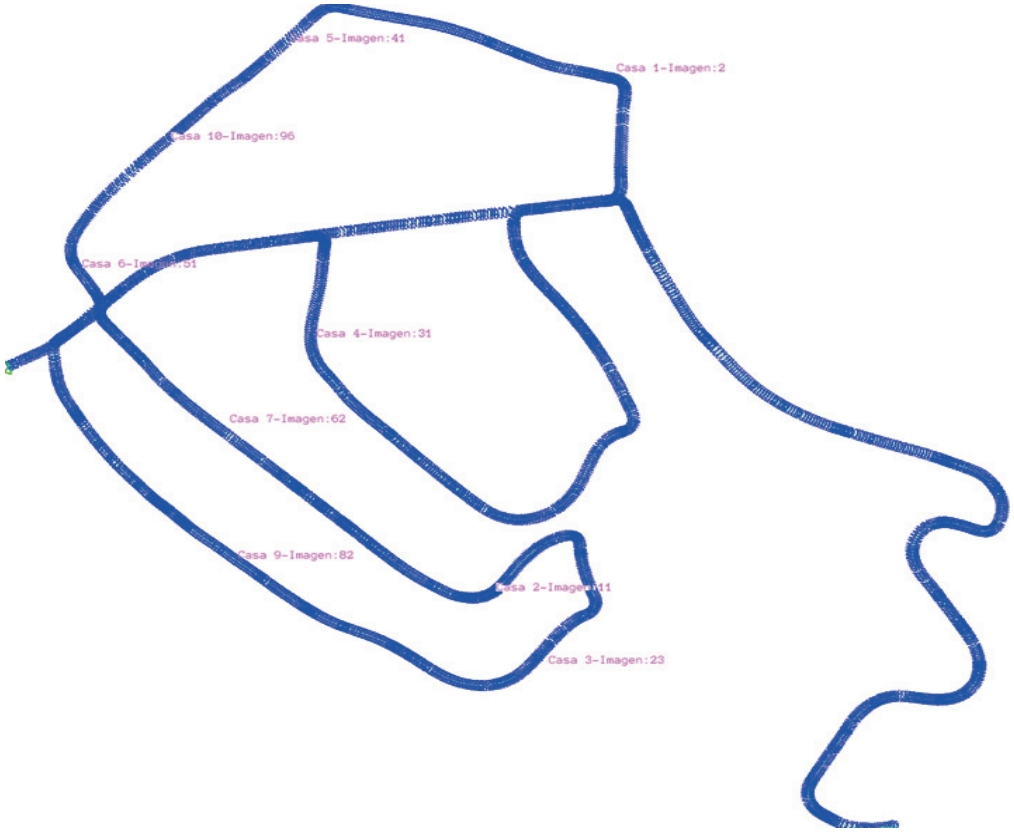


Fig. 6. Muestra de la detección de objetos durante el recorrido de KITTI.

ISSN en trámite

4. CONCLUSIONES

Se reporta un módulo de reconocimiento y localización de objetos y lugares para un sistema SLAM. A la vez que el sistema SLAM hace su exploración, mapeo y localización, el módulo de reconocimiento va analizando la escena, detectando y describiendo puntos destacados. Sus descripciones se convierten a palabras visuales y se buscan en una base de datos de metas. El módulo tiene la arquitectura de un módulo de asociación, con la diferencia de que su base de datos va precargada de metas, y es invariante en el tiempo. El módulo reporta sus hallazgos mediante la anotación del identificador del objeto o lugar encontrado sobre el mapa del sistema SLAM.

Es necesario aclarar que los resultados aquí presentados son preliminares de un proyecto de tesis, y el módulo de reconocimiento de objetos y lugares fue implementado en ORB-SLAM2 (Mur-Artal & Tardós, 2017).

5. TRABAJO FUTURO

Se planean experimentos con algunas combinaciones de parámetros para ver su impacto sobre el rendimiento del módulo de reconocimiento:

i. Probar números distintos de hojas del árbol, es decir el número de palabras distintas. El reducir el número de palabras puede aumentar la flexibilidad con la que se reconoce un punto destacado, el cuál puede cambiar ligeramente de descripción con el movimiento normal de la cámara. Si la palabra es demasiado flexible, va a admitir las descripciones de puntos destacados de otros objetos, propiciando falsos positivos.

ii. Probar con cantidades grandes de metas, para ver cómo escala el sistema, tanto en tiempos como en precisión.

iii. Usar un pre-procesamiento de imagen para mejorar la detección de puntos destacados. Este pre-procesamiento se deberá usar en todas las etapas del proceso, desde la creación del diccionario, la toma de imágenes de objetos a reconocer, y las imágenes del ORB-SLAM2 procesadas por el módulo de reconocimiento.

6. AGRADECIMIENTOS

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

7. REFERENCIAS

Bailey, T., & Durrant-Whyte, H. (2006). Simultaneous localization and mapping (SLAM): Part II. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, *13*(3), 108–117. https://doi.org/10.1109/MRA.2006.1678144

Bay, H., Tuytelaars, T., & Gool, L. Van. (2006). SURF: Speeded Up Robust Features. *Computer Vision–ECCV 2006*, 404–417. http://link.springer.com/chapter/10.1007/11744023_32

Calisi, D., Farinelli, A., Locchi, L., & Nardi, D. (2005). Autonomous navigation and exploration in a rescue environment. *Proceedings of the 2005 IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics*, *2005*. https://doi.org/10.1109/SSRR.2005.1501268

Calonder, M., Lepetit, V., Strecha, C., & Fua, P. (2010). BRIEF: Binary robust independent elementary features. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, *6314 LNCS*(PART 4). https://doi.org/10.1007/978-3-642-15561-1_56

Choudhary, S., Trevor, A. J. B., Christensen, H. I., & Dellaert, F. (2014). SLAM with object discovery, modeling and mapping. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*. https://doi.org/10.1109/IROS.2014.6942683

Csurka, G., Dance, C., Fan, L., Willamowski, J., & Bray, C. (2004). Visual categorization with bags of keypoints (Cited by: 1590). *Earth*, *1*(May).

Durrant-Whyte, H., & Bailey, T. (2006). Simultaneous localization and mapping: Part I. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, *13*(2), 99–108. https://doi.org/10.1109/MRA.2006.1638022

Galvez-Lopez, D., & Tardos, J. D. (2012). *DBoW2*. Github. https://github.com/dorian3d/DBoW2

Gálvez-López, D., & Tardós, J. D. (2012). Bags of binary words for fast place recognition in image sequences. *IEEE Transactions on Robotics*, *28*(5), 1188–1197. https://doi.org/10.1109/TRO.2012.2197158

Hast, A., Sablina, V. A., Kylberg, G., & Sintorn, I. M. (2015). A simple and efficient feature descriptor for fast matching. *23rd International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision, WSCG 2015 - Full Papers Proceedings*.

Jensfelt, P., Ekvall, S., Kragic, D., & Aarno, D. (2007). Integrating SLAM and object detection for service robot tasks. *Cambridge University Press*. http://kiosk.nada.kth.se/~patric/publications/workshop2005.pdf

Liu, Y., Yang, D., Li, J., Gu, Y., Pi, J., & Zhang, X. (2018). Stereo Visual-Inertial SLAM with Points and Lines. *IEEE Access*, *6*, 69381–69392. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2880689

ISSN en trámite

Lowe, D. G. (1999). *Object Recognition from Local Scale-Invariant Features*. 8.

Lowe, D. G. (2004). Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*, *60*(2). https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94

Mahon, I., Williams, S. B., Pizarro, O., & Johnson-Roberson, M. (2008). Efficient view-based SLAM using visual loop closures. *IEEE Transactions on Robotics*, *24*(5), 1002–1014. https://doi.org/10.1109/TRO.2008.2004888

Mur-Artal, R., Montiel, J. M. M., & Tardós, J. D. (2015). ORB-SLAM: A Versatile and Accurate Monocular SLAM System. *IEEE Transactions on Robotics*, *31*(5), 1147–1163. https://doi.org/10.1109/TRO.2015.2463671

Mur-Artal, R., & Tardós, J. D. (2017). ORB-SLAM2: An Open-Source SLAM System for Monocular, Stereo, and RGB-D Cameras. *IEEE Transactions on Robotics*, *33*(5), 1255–1262. https://doi.org/10.1109/TRO.2017.2705103

Pillai, S., & Leonard, J. J. (2015). Monocular SLAM supported object recognition. *Robotics: Science and Systems*, *11*. https://doi.org/10.15607/RSS.2015.XI.034

Pou, C., Thielen, A., Delgado, R., Dalmau, D., Clotet, B., Ruiz, L., Paredes, R., San, H. U., & Diagnostics, R. (2010). a Review of Autonomous Navigation Systems in Agricultural Environments. *Journal of Virology*, *6374*(March).

Rublee, E., Rabaud, V., Konolige, K., & Bradski, G. (2011). ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, 2564–2571. https://doi.org/10.1109/ICCV.2011.6126544

Se, S., Lowe, D. G., & Little, J. J. (2005). Vision-based global localization and mapping for mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics*, *21*(3), 364–375. https://doi.org/10.1109/TRO.2004.839228

Siegwart, R., & Nourbakhsh, I. R. (2004). Introduction to Autonomous Mobile Robots. En *Massachusetts Institute of Technology* (Vol. 1, Número 1).

Sturm, J., Engelhard, N., Endres, F., Burgard, W., & Cremers, D. (2012). A benchmark for the evaluation of RGB-D SLAM systems. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*. https://doi.org/10.1109/IROS.2012.6385773

Trulls, E., Corominas Murtra, A., Pérez-Ibarz, J., Ferrer, G., Vasquez, D., Mirats-Tur, J. M., & Sanfeliu, A. (2011). Autonomous navigation for mobile service robots in urban pedestrian environments. *Journal of Field Robotics*, *28*(3). https://doi.org/10.1002/rob.20386

Vepa, R. (2019). Introduction to Autonomous Space Vehicles and Robotics. En *Dynamics and Control of Autonomous Space Vehicles and Robotics*. https://doi.org/10.1017/9781108525404.002

ISSN en trámite

Generación de corpus de comentarios de Amazon en español

Armando Miranda Molina*, Noé Alejandro Castro-Sánchez*,
Máximo López Sánchez*, Dante Mújica Vargas*, Javier Ortiz Hernández*

**Tecnológico Nacional de México campus Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos. México. (e-mail: {m20ce041, noe.cs, maximo.ls, dante.mv, javier.oh}@cenidet.tecnm.mx)*

Resumen: El desarrollo de aplicaciones de Procesamiento de Lenguaje Natural (PLN) requiere el uso de corpus lingüísticos, lo que comprende manejar grandes cantidades de texto. Un corpus lingüístico es considerado un recurso léxico muy valioso porque captura la manera en que se utiliza el lenguaje en un momento dado por una población específica. En este trabajo de investigación se presenta un método para generar un corpus de propósito específico para el idioma español basado en comentarios de Amazon, donde se capturan las opiniones de productos de discos en estado sólido, almacenamiento NVMe, memorias micro SD, relojes inteligentes, auriculares inteligentes, basculas corporales, mochilas, sillas, escritorios, mesas, maquillajes, correctores, labiales y rímel, divididos en las categorías de electrónicos, accesorios de viaje, muebles de hogar, belleza y cuidado personal, incluyendo las reseñas que se encuentran en otros idiomas. Los comentarios se clasifican según el número de estrellas que los usuarios le asignan. Actualmente, el corpus se conforma por 208,619 comentarios en total.

Palabras clave: Procesamiento de Lenguaje Natural, corpus, léxico, Amazon.

1. INTRODUCCIÓN

Una de las principales tareas del Procesamiento de Lenguaje Natural (PLN), es el análisis de sentimientos donde se desglosan tanto la minería de emoción como la minería de opinión. Esta última se encarga de identificar y extraer opiniones dentro del texto. Algunas de las tareas que envuelven el análisis de opinión son: categorización de entidades, categorización de aspectos, extracción del tiempo en que se describe la opinión, clasificación de la polaridad de la opinión y detección de la subjetividad. Actualmente los trabajos y nuevos retos en estas áreas son la detección y clasificación de emociones, la clasificación de punto de vista, el resumen de la opinión, la detección de ironía, la detección y seguimiento de lenguaje violento, entre otros. Dado que el objetivo del análisis de sentimientos es conocer la opinión de las personas, una etapa fundamental es la generación de un corpus de comentarios, en el cual anteriormente se utilizaban métodos en forma de encuesta para obtenerlos, al día de hoy gran parte de la población mundial deja un comentario en las diferentes plataformas de ventas en linea y redes sociales, las cuales se usan para extraer las diferentes opiniones.

1.1 ¿Qué es un corpus?

De acuerdo a Gelbukh A., y Sidorov G. (2006) son colecciones muy grandes de texto, normalmente con alguna información lingüística adicional como las marcas morfológicas, sintácticas, las marcas de sentidos de palabras, referenciales, etc. Además, los corpus son fuente de información de todos los fenómenos del lenguaje (no solo de los léxicos).

1.2 ¿Por qué son importantes los corpus?

Los corpus son recursos léxicos muy valiosos porque capturan la manera en que se utiliza el lenguaje, de cómo los hablantes emplean el idioma. Así mismo, Sierra G. (2015) menciona que los corpus pueden tener propósitos específicos:

- De estudio. Se utilizan para identificar y describir algún aspecto del lenguaje (por ejemplo, los fragmentos de una obra literaria que contienen una palabra o una construcción sintáctica determinada).
- De entrenamiento. Se etiqueta manualmente para que un sistema computacional "aprenda" determinada tarea (como sería la extracción de información o resumen automático, por ejemplo).
- De prueba. Se compara con un corpus procesado automáticamente para evaluar la efectividad de los diferentes algoritmos y procesos de los sistemas computacionales.
- Monolingües. Utiliza un solo idioma, por ejemplo, español o inglés, sin importar si sus elementos son originales del idioma o si son traducciones.
- Multilingües. Pueden ser de textos en distintos idiomas o paralelos. Los primeros se conforman por colecciones de textos en varios idiomas, recopilados con criterios de selección muy diversos, desde la simple disponibilidad de los textos hasta la selección según géneros y tipos similares. Por su parte, los corpus paralelos contienen la misma colección de textos en más de una lengua, es decir, las versiones originales acompañadas por sus traducciones.

ISSN en trámite

El artículo se estructura de la siguiente forma: la Sección 2, muestra trabajos relacionados; la Sección 3, describe la motivación de este artículo; la Sección 4, describe el método para llevar a cabo la generación del corpus; la Sección 5, describe la información sobre la organización del corpus; y la Sección 6, presenta las conclusiones de la investigación y trabajos futuros.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

Los corpus lingüísticos juegan un papel importante en el área de investigaciones de Procesamiento de Lenguaje Natural. Como se mencionó anteriormente, existen corpus de propósito específico para determinadas tareas, por ejemplo, el análisis de sentimientos. A continuación, se presentan trabajos relacionados en el estado del arte donde se utilizan los corpus cuyo propósito, es recoger la opinión de usuario y además, se menciona sí, estos fueron extraídos de algún repositorio web o fueron creados para un objetivo en particular.

Saranya K., Roslin L., y Priyan. H. (2019) describen que hoy en día la valoración de los usuarios es uno de los principales factores que influye en la decisión del cliente a la hora de seleccionar el producto. Por lo cual, proponen un sistema que utiliza una aplicación web para clasificar la polaridad positiva o negativa de los comentarios. Para llevar a cabo el propósito de este artículo, generan un corpus donde se recopilan recetas de comida.

Fang X., y Zhan J. (2015) mencionan que, el análisis de sentimientos ha ganado mucha atención en los últimos años y como objetivo es abordar el problema de la categorización de la polaridad de los sentimientos, por lo cual, proponen un proceso para llevar a cabo la categorización de la polaridad (en una escala de 1 a 5 estrellas) del sentimiento, donde se emplean algoritmos para detectar la negación de adjetivos y verbos. Esta implementación utiliza un corpus de comentarios basados en Amazon, el cual se extrae por medio de un repositorio web. Cuenta con cinco millones de reseñas de productos que pertenecen a cuatro categorías principales: belleza, libros, electrónicos y hogar, donde cada opinión incluye la siguiente información: identificador de la revisión, identificador del producto, calificación, fecha de la revisión, cuantas personas resultó útil la revisión y la opinión del producto.

Jagdale, R. S., Shirsat, V. S., y Deshmukh, S. N. (2019) mencionan que el análisis de sentimientos y la minería de opinión es un campo muy popular para analizar y obtener información a partir de datos de texto de varias fuentes como Facebook, Twitter y Amazon. Además, desempeña un papel vital para permitir que las empresas trabajen activamente en la mejora de la estrategia comercial y obtenga una visión profunda de los comentarios del comprador sobre su producto. Este trabajo de investigación propone aplicar algoritmos de aprendizaje automático para clasificar las revisiones como positivas o negativas. Generan un corpus de comentarios de Amazon el cual contiene opiniones de cámaras, laptops, teléfonos móviles, tabletas, televisores inteligentes y cámaras de seguridad para llevar a cabo esta tarea.

Bose, R., Dey, R. K., Roy, S., & Sarddar, D. (2020) este trabajo propone realizar un seguimiento de 568,454 reseñas de alimentos de 74,258 productos y 256,059 usuarios de Amazon, durante un periodo de diez años. El objetivo es analizar los seis productos y usuarios más populares en función de la revisión del texto utilizando un léxico de emociones. El corpus se obtuvo por medio de un recurso web llamado Kaggle, el cual cuenta con diferentes conjuntos de datos para diferentes propósitos.

Baca Y. (2014) describe un método para identificar la polaridad de textos en español y el impacto de la ironía en la minería de opinión. Para llevar a cabo esta investigación fue necesario generar un corpus de comentarios por medio de una App en Facebook, mediante el cual se extrajeron automáticamente comentarios de Facebook y se generaron dos corpus. El primero fue utilizado para complementar la creación del léxico afectivo en español y el segundo para el entrenamiento y evaluación de detección de polaridad.

Leal A. (2017) propone un algoritmo para determinar el tipo o clase de comentarios acerca de productos y servicios obtenidos vía web a través de un análisis morfosintáctico y semántico, donde las clases predeterminadas de comentarios son dudas, sugerencias, quejas y felicitaciones. De acuerdo a esto, se desarrolla un corpus de comentarios basado en varias páginas web entre ellas: Mercado Libre, Amazon, Booking, Trip Advisor, etc. Donde los comentarios extraídos fueron etiquetados de manera manual con la intervención de tres personas.

Kausar, S., Huahu, X., Ahmad, W., Shabir, M. Y., y Ahmad, W. (2019) mencionan que uno de los principales problemas en el análisis de sentimiento es la categorización de polaridad de sentimiento que determina si una revisión es positiva, negativa o neutral. Por lo tanto, se propone una técnica de categorización de polaridad de sentimiento para un gran conjunto de datos de reseñas, las cuales se genera un corpus de comentarios con dos tipos de artículos: el primero son productos de oficina los cuales incluyen Microsoft Word, Microsoft PowerPoint, Microsoft Excel y Microsoft Database y el segundo producto son los DVD musicales.

Keung, P., Lu, Y., Szarvas, G., & Smith, N. A. (2020) mencionan que la clasificación de texto es una de las tareas fundamentales en el Procesamiento de Lenguaje Natural y la investigación en esta área se ha visto acelerada por la abundancia de corpus en diferentes dominios. Sin embargo, los conjuntos de datos de clasificación de textos multilingües tienen algunas deficiencias notables. Es por ello que proponen un corpus multilingüe basado en comentarios de Amazon en idiomas como inglés, japones, alemán, francés, español y chino, que van desde el 1 de noviembre de 2015, hasta el 1 de noviembre de 2019. Cada grupo de comentarios que pertenecen a algún idioma, está divido en un conjunto de entrenamiento

ISSN en trámite

con 200,000 reseñas y un conjunto de pruebas con 5,000 reseñas, donde cada clase de comentario, es decir, que van desde 1 estrella hasta cinco estrellas, se encuentran balanceados con el 20%.

3. MOTIVACIÓN

Amazon es una de las principales empresas de ventas en línea y está presente alrededor del mundo en países como: México, España, Estados Unidos, Italia, Francia, Canadá, China, Japón, etc. Cuenta con una variedad muy amplia de artículos que van acompañados de reseñas y una valoración numérica que los clientes asignaron a los productos que adquirieron. Por tal motivo en muchas investigaciones en el estado del arte, suelen encontrarse grandes cantidades de corpus de comentarios en esta plataforma. Sin embargo, no existe un corpus lingüístico de propósito específico para el idioma español basado en comentarios, donde se capturen todas las opiniones de un determinado producto o artículo, incluyendo las reseñas que estén en otros idiomas y posteriormente traducidas. Además, por la naturaleza de los comentarios en Amazon no se encuentran balanceados, ya que estos están clasificados según el número de estrellas (en una escala del 1 al 5) que cada usuario da. Por lo tanto, surgen las siguientes preguntas: ¿por qué los comentarios de 2 estrellas son las calificaciones que menos ceden a un producto?, ¿los comentarios de 3 estrellas deben ser considerados como opiniones neutrales?

Por tal motivo se está creando un corpus de comentarios de Amazon y cuenta con los siguientes campos que se muestran en la tabla 1:

Tabla 1. Campos que componen un comentario

usuario	Nombre de la persona que emite la reseña
pais	Lugar donde se genera la reseña
idioma	Idioma o conjunto de idiomas que pueden hablarse en un país
fecha	Fecha en que se genera el comentario
titulo	Título de la opinión
estrellas	Calificación que dan al comentario
comentario	Reseña de algún producto en particular
beneficiados	A cuantas personas resultó útil el comentario
articulo	Nombre del producto
departamento	Nombre del departamento que pertenece el artículo
lenguaje	Garantiza que las reseñas se asocien con el idioma.

4. MÉTODO PARA LA GENERACIÓN DEL CORPUS DE COMENTARIOS BASADO EN AMAZON

Ali Salmony, M. Y., & Rasool Faridi, A. (2021) mencionan que la mayoría de los sitios como Facebook, Twitter y Amazon ofrecen una API que facilita el acceso a información, como publicaciones o comentarios disponibles para los investigadores con algunas restricciones. Esta API requiere tener una cuenta o convertirse en asociado de estos sitios web. Jagdale, R. S., Shirsat, V. S., y Deshmukh, S. N. (2019) indican que los sitios de comercio electrónico tienen sus limitaciones para proporcionar datos públicamente. Por tal motivo para llevar a cabo la generación del corpus se utiliza una herramienta conocida como "Web Scraping", de acuerdo a Mitchell R. (2018) su función es recopilar y procesar grandes cantidades de datos rápidamente de sitios web. Además, con esta técnica es posible seleccionar y extraer cualquier elemento visible dentro de una página web sin restricción alguna. A continuación, se muestra un diagrama de flujo para observar el proceso de la generación del corpus: figura 1.

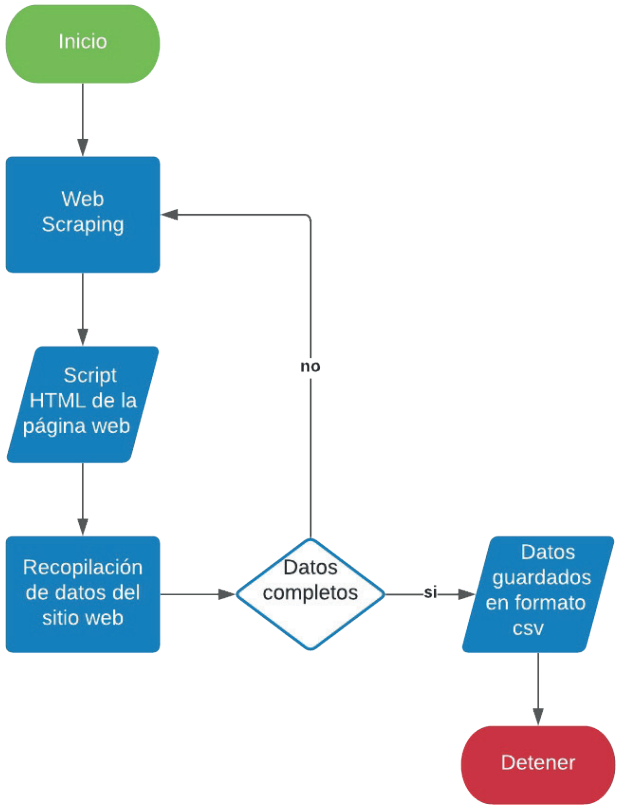


Fig. 1. Diagrama de flujo para realizar la generación de comentarios

Este proceso cuenta con cinco pasos para la generación del corpus (cabe mencionar que, como lenguaje de programación se utiliza Python), los cuales serán explicados a continuación:

1) El primer paso hace uso de la librería llamada Selenium, la cual se encarga de hacer la petición al servidor de Amazon.
2) El segundo paso se encarga de mostrar los datos de la página web, en este caso son los archivos HTML los cuales contienen la información que devuelve el servidor.

ISSN en trámite

3) El tercer paso es el proceso de extracción de información.

4) El cuarto paso determina lo siguiente: sí la información del producto se ha completado continua al siguiente paso, de lo contrario regresa al paso número dos.

5) El quinto paso se encarga de construir el corpus para un determinado producto, en formato CSV.

Como se puede observar, este proceso se realiza cada vez que se desee extraer un nuevo producto y posteriormente se hace la unión de estos corpus para generar uno. Sin embargo, se ha detectado la siguiente información por parte de la página de Amazon:

- Errores al realizar la traducción de comentarios. Amazon da la opción de traducir un comentario cuando se encuentra en otro idioma diferente al español. En la figura 2, se puede observar un ejemplo.



Fig. 2. Error al traducir comentarios

- Comentarios revisados en México, pero reseñados en otros idiomas. Cuando se detectan estas opiniones, no se da la opción de realizar traducciones debido a que la página apunta hacia el dominio de Amazon México. La figura 3, muestra un ejemplo.

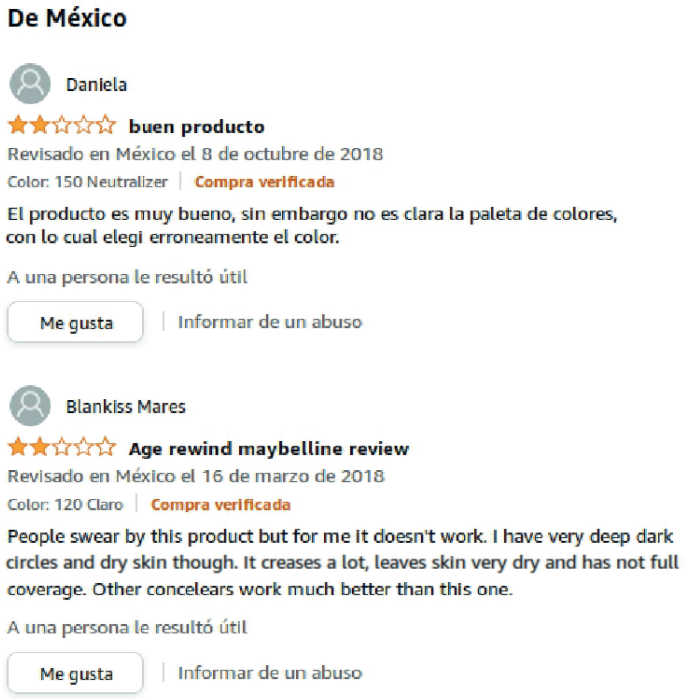


Fig. 3. Comentarios de México en otros idiomas

La solución para este tipo de comentarios es aplicar algoritmos de detección de idiomas para garantizar que las reseñas se asocien con el lenguaje (en este caso el idioma español). Se utiliza la librería "fastText" que se implementa en Joulin, A., Grave, E., Bojanowski, P., Douze, M., Jégou, H., y Mikolov, T. (2016). Sin embargo, esta librería no detecta correctamente el lenguaje en español para opiniones con muy pocas palabras como se muestra en la figura 4:

titulo	comentario	lenguaje
Cinco estrellas	Me encantó	Catalan
Cinco estrellas	Excelente calidad	Spanish
Cinco estrellas	Está bien, me he montado yo mismo. Los reposabrazos	Spanish
Me encantó.	Muy cómodo y agradable. También se ve bonita.	Spanish
Awsome	Demasiado bueno	Spanish
Bueno para trabajar de	Buena silla en general	Spanish
Calidad	Silla excelente.	Spanish
Cinco estrellas	Excelente.	Italian
Gran valor	Silla increíble por el precio. Fácil de montar y parece que	Spanish
Buen producto	Súper	Catalan
Producto	Tremendo	Italian

Fig 4. Detección incorrecta del idioma español

La figura 4 hace referencia a tres campos que representan el título, el comentario y el lenguaje de una opinión, las cuales están seleccionadas de color verde y puede observarse la detección incorrecta del idioma español. La forma de resolverlo es detectar manualmente estos comentarios y reasignar la etiqueta "Spanish".

5. RESULTADOS

El corpus de comentarios está en constante evolución, hasta el momento se tiene un tamaño de 184,041 reseñas. A

 ISSN en trámite

continuación, se describe la información acerca de su organización que comprender las tablas 2-6.

Table 2. Distribución de comentarios en el departamento de Electrónicos

Estrellas	Cantidad de comentarios	Porcentaje
5	105,931	74
4	14,814	10
3	6,986	5
2	4,561	3
1	11,407	8
Total: 143,699		

La tabla 2 está formada por los artículos de discos en estado sólido, almacenamiento en NVMe, memorias micro SD, relojes inteligentes, auriculares inteligentes y basculas corporales. Así mismo pertenecen a marcas como Kingstone, ADATA, Crucial, ScanDisk, WesternDigital, Samsung, Lexar, PNY, Gigabyte, Xiaomi, Salandes, Amazfit, Fitbit, Fullmosa, SEASKY, TYC, TECHVIDA, etc.

Table 3. Distribución de comentarios en el departamento de Accesorios de Viaje

Estrellas	Cantidad de comentarios	Porcentaje
5	3,557	65
4	901	17
3	568	10
2	155	3
1	271	5
Total: 5,452		

La tabla 3 está formada por los artículos de mochilas y maletines. Comprenden marcas como Doxungo, Puma, Mossiso, Lenovo

Table 4. Distribución de comentarios en el departamento de Belleza y Cuidado Personal

Estrellas	Cantidad de comentarios	Porcentaje
5	12,435	55
4	3,210	14
3	2,399	10
2	1,745	8
1	2,903	13
Total: 22,692		

La tabla 4 está formada por los artículos de maquillaje, corrector, labial y rímel. Las marcas de estos productos son Maybelline, Salandens, Maange, Nyx, Physician, Elf cosmetics, Loreal, Revlon, Wet n wild, Coty airspun.

Table 5. Distribución de comentarios en el departamento de Muebles de Hogar

Estrellas	Cantidad de comentarios	Porcentaje
5	19,168	52
4	6,200	17
3	3,703	10
2	2,808	8
1	4,897	13
Total: 36,776		

La tabla 5 está formada por los artículos de sillas, escritorios y mesas. Así mismo pertenecen a marcas como Topliving, Furniture, Casa-Easter.

Table 6. Distribución de comentarios en los diferentes departamentos

Estrellas	Cantidad de comentarios	Porcentaje
5	141,091	68
4	25,125	12
3	13,656	7
2	9,269	4
1	19,478	9
Total: 208,619		

En la tabla 6 puede observarse la unión de las tablas 2-4, las cuales representan el corpus general de comentarios.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Como se observó en el estado del arte, existen muchos corpus en grandes cantidades debidamente recopilados cuyo propósito es realizar ciertos análisis lingüísticos, algunos de ellos obtenidos por medio de repositorios web, otros generados a partir de una API. Esta investigación genera un corpus de comentarios de Amazon en español donde se capturan todas las opiniones de un determinado producto incluyendo las que se encuentren en otros idiomas. Además, surgieron las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Por qué los comentarios de 2 estrellas son las calificaciones que menos ceden a un producto?
  - Durante la extracción de los comentarios se pudo observar que los clientes que han adquirido un producto dan la calificación de una estrella cuando la experiencia ha sido muy mala, sin embargo, en muchas de las ocasiones comentarios de tres estrellas suelen tener un mayor peso que comentarios de dos estrellas debido que la relación con el producto no ha sido tan mala y posiblemente porque no deseen castigar al producto cediendo dos estrellas.
- ¿Los comentarios de 3 estrellas deben ser considerados como opiniones neutrales?
  - No pueden ser considerados como opiniones neutrales porque este tipo de comentarios describe la experiencia que los clientes han tenido con el producto.

ISSN en trámite

También se explicó que los comercios electrónicos tienen sus limitaciones para proporcionar datos públicamente. Por lo cual se utiliza el "Web Scraping" para llevar a cabo esta extracción de información.

Se discutió anteriormente que este corpus se encuentra en constante evolución, hasta el momento se conforma por 208,619 comentarios en total. Se anexarán más productos como trabajos futuros, además la detección manual de comentarios en español etiquetados en otros idiomas se pretende automatizar posiblemente con ayuda de algún recurso léxico.

REFERENCIAS

Ali Salmony, M. Y., & Rasool Faridi, A. (2021). Supervised Sentiment Analysis on Amazon Product Reviews: A survey. *2021 2nd International Conference on Intelligent Engineering and Management (ICIEM)*.

Baca Y. (2014). Impacto de la ironía en la minería de opiniones basada en un Léxico Afectivo. *TIMM* (pp. 41-44).

Bose, R., Dey, R. K., Roy, S., & Sarddar, D. (2020). Sentiment Analysis on Online Product Reviews. In *Information and Communication Technology for Sustainable Development* (pp. 559–569). Springer Singapore.

Fang, X., y Zhan, J. (2015). Sentiment analysis using product review data. *Journal of Big Data*, 2(1). https://doi.org/10.1186/s40537-015-0015-2.

Gelbukh A., y Sidorov G. (2006). Procesamiento automático del español con enfoque en recursos léxicos grandes, *Instituto Politécnico Nacional de México*. (pp. 50-5).

Haque, T. U., Saber, N. N., & Shah, F. M. (2018). Sentiment analysis on large scale Amazon product reviews. *2018 IEEE International Conference on Innovative Research and Development (ICIRD)*.

Jagdale, R. S., Shirsat, V. S., y Deshmukh, S. N. (2019). Sentiment analysis on product reviews using machine learning techniques. In *Cognitive Informatics and Soft Computing* (pp. 639–647). Springer Singapore.

Joulin, A., Grave, E., Bojanowski, P., Douze, M., Jégou, H., y Mikolov, T. (2016). FastText.zip: Compressing text classification models. In *arXiv [cs.CL]*. http://arxiv.org/abs/1612.03651.

Kausar, S., Huahu, X., Ahmad, W., Shabir, M. Y., y Ahmad, W. (2019). A sentiment polarity categorization technique for online product reviews. *IEEE Access: Practical Innovations, Open Solutions, 8*, 3594–3605.

Keung, P., Lu, Y., Szarvas, G., & Smith, N. A. (2020). The Multilingual Amazon Reviews Corpus. In *arXiv [cs.CL]*. http://arxiv.org/abs/2010.02573.

Leal A. (2017). Caracterización de Comentarios Emitidos por Consumidores de Productos y Servicios (Tesis de Maestría). *Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico* (pp. 26-31).

Mitchell, R. (2018). Web scraping with python: Collecting more data from the modern web (2nd ed.). *O'Reilly Media*. (pp. ix-x)

Saranya, K. Roslin, L., y Priyan H. (2019) Sentiment based comments rating approach, doi: 10.15680/IJIRCCE.2019. 0702097.

Sierra G. (2015). Introducción a los corpus lingüísticos. *Instituto de Ingeniería,* UNAM. http://www.corpus.unam.mx/cursocorpus/LibroCorpus.pdf. (pp. 6).

ISSN en trámite

Comparación de las herramientas de transcripción de voz a texto

Braulio Pérez Alberto[1], Castro Sánchez Noe Alejandro [2], González Franco Nimrod [3], Mújica Vargas Dante [4]
Tecnológico Nacional de México campus CENIDET, Morelos, México
m21ce004@cenidet.tecnm.mx[1], noe.cs@cenidet.tecnm.mx[2], nimrod.gf@cenidet.tecnm.mx[3], dante.mv@cenidet.tecnm.mx[4]

Resumen: En las tecnologías actuales está presente la interacción humano-computadora, entre esta se encuentra la interacción por voz, siendo esta el medio de comunicación más natural para los seres humanos. Para lograr una comunicación entre la persona y la máquina es necesario desarrollar un proceso de reconocimiento automático de voz. En el mercado existen diversas herramientas de transcripción de voz a texto que pueden aplicarse en múltiples áreas y satisfacer distintas necesidades. Este artículo muestra una comparativa entre diferentes sistemas de transcripción y muestra el porcentaje de similitud entre los textos resultantes y originales.

Palabras Clave: Procesamiento de lenguaje natural, transcripción, transcripción de voz a texto, sistemas de transcripción.

1. Introducción

Los sistemas de transcripción de voz a texto son herramientas que están presentes en muchas tecnologías que utilizamos día con día, desde ver los subtítulos en un video hasta en un asistente virtual, estas herramientas ayudan en múltiples áreas, como en el área empresarial para mejorar la asistencia de los clientes o en el área estudiantil para poder dictar un trabajo.

En el mercado existen distintas empresas que ofrecen una o más herramientas que pueden realizar la tarea de transcripción de voz a texto, pero ¿Qué tan precisos son estos sistemas?, y ¿Cómo reaccionan ante diferentes escenarios? En este artículo se mostrará, el porcentaje de similitud entre los textos resultantes y los textos originales, y deficiencias de diferentes sistemas de transcripción, realizando un experimento para medir el desempeño de estos, ante diferentes situaciones.

El resto del documento se encuentra divido en seis secciones. En la primera sección, se presenta la motivación; en la segunda los objetivos; la tercera sección se presenta el modelo del experimento, escenarios (criterios que deben cumplir los audios de transcripción para cada prueba) y los sistemas de transcripción que se probaran; la cuarta sección muestra los resultados de la experimentación y en la última sección se muestran las referencias bibliográficas.

2. Motivación

Las tecnologías actuales utilizan comunicación a través de la voz para la interacción persona-maquina, ya que para los seres humanos es más natural la comunicación utilizando este medio. Para lograr una comunicación entre la persona y la

ISSN en trámite

máquina es necesario desarrollar un proceso de reconocimiento automático de voz. Esto implica que el ordenador transcriba el habla o discurso de la persona a texto (Moya Córdoba, 2021). Esta transcripción ha generado múltiples funciones como el desarrollo de un sistema que permite dejar constancia y gestionar, de forma ágil y automática, las reuniones en empresas (López Calderón, 2019), transcripción fonética (Kirschning, n.d.), registro de notas medicas en expedientes clínicos (Mario Ezequiel & Olivares Zepahua, 2016) o el registro de bitácoras en el ámbito de la armada (Cienfuegos Ardura et al., 2021).

El área empresarial si se desea mejorar la atención a clientes o marketing, empresas como Google (Google Cloud), Microsoft (Azure y Nuance), IBM (Watson) y Amazon (AWS) por mencionar algunas, ofrecen servicios de transcripción de voz a texto que se pueden ajustar perfectamente a las necesidades de una empresa. Aunque estos servicios son de paga, ofrecen un periodo de prueba, que permite realizar proyectos personales y probar la eficiencia de estos, al terminar el periodo de prueba, se deberá pagar una cantidad para poder seguir haciendo uso de estos. Algunas de las empresas antes mencionadas ofrecen algún servicio que puede realizar la tarea de transcripción de manera gratuita, como Google con Google Doc y Microsoft con Word, aunque su función principal no es hacer una transcripción de voz a texto, si ofrecen herramientas para realizar cumplir esta función.

Garayzábal Heinze et al (2019), muestra el uso de los sistemas de transcripción para el desarrollo y análisis de corpus orales. En la realización de un corpus oral de batallas verbales, se utilizaron dos herramientas gratuitas, para la transcripción de videos, descubriendo que existe una deficiencia de los sistemas de transcripción ante ciertos escenarios como el reconocimiento de nombres o existencia de ruido.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Realizar un experimento que permita medir la eficiencia de algunas herramientas de transcripción de voz a texto.

3.2.Objetivos específicos

- Investigar las diferentes herramientas de transcripción de voz a texto.
- Modelar el experimento.
- Seleccionar los videos para el experimento.
- Transcribir los videos de manera manual para la evaluación.
- Comparar los resultados de los sistemas de transcripción con el texto original.

4. Propuesta de solución

4.1. Sistemas de transcripción de voz a texto

En primer lugar, se investigaron los sistemas de transcripción de voz más populares, el tipo de servicio que ofrecen (paga o gratuito), si ofrece un periodo de prueba y cuánto dura este, además de investigar si las empresas que ofrecen los sistemas de transcripción de voz cuentan con otra herramienta gratuita que pueda realizar esta tarea. Las características de los sistemas de transcripción considerados para este estudio se muestran en la tabla 1.

ISSN en trámite

Empresa	Servicio	Tipo de servicio	Prueba gratuita	Duración	Uso
Amazon	Amazon AWS	Paga	si	12 meses	1 hora cada mes
Google	Google Cloud	Paga	si	90 días	Indefinido
	Google Docs	Gratuito	si	Indefinido	Indefinido
	Youtube subtitulos	Gratuito	si	Indefinido	Indefinido
IBM	Watson	Paga	si	Indefinido	500 min cada mes
Microsoft	Azure	Paga	si	12 meses	5 hora cada mes
	Word	Gratuito	si	Indefinido	Indefinido
	Nuance	Paga	no	-	-

Tabla 1 Sistemas de transcripción de voz a texto

4.2. Modelado del experimento

La realización del experimento consideró el uso de los sistemas de transcripción mostrados anteriormente, exceptuando Naunce, ya que no cuenta con una prueba gratuita para poder realizar este experimento. Se recopilaron cuatro videos de la temática de batallas verbales para transcribir los chistes que se contaban con los sistemas ya mencionados.

Dado que la mayoría de los sistemas de transcripción no tiene la opción para ingresar un archivo de audio y procesarlo, se utilizó un altavoz donde se reproducen los audios y se usó un micrófono para que las herramientas puedan transcribirlos.

El experimento se replicó para cada una de las herramientas en las mismas condiciones, utilizando los mismos audios y micrófono, para evitar dar una ventaja a una herramienta sobre las demás.

El experimento fue entorno al corpus lingüístico de batallas verbales, por lo que se utilizó el audio de videos de batallas verbales. Los audios de cada video se transcribieron de manera manual, para poder evaluar los resultados de cada herramienta.

Para poder evaluar los resultados de cada herramienta, los audios de cada video se transcribieron de manera manual. Posteriormente se utilizó la medida de similitud textual Monge-Elkan (Monge & Elkan, 1996) que es un método general de comparación de cadenas de texto basado en una medida de similitud interna basada en caracteres, se decidió utilizarla ya que es un tipo de medida de similitud híbrida que combina los beneficios de los métodos basados en secuencias y los métodos basados en conjuntos. En la tabla 2 se muestra una tabla comparativa de las medidas de similitud más utilizadas. La medida de similitud textual se utilizó para medir la similitud entre el texto original y los textos resultantes, además de analizarse las principales deficiencias de los sistemas de transcripción.

	Cadena de palabras	Textos largos
Jaccard	Si	No
Jaro	Si	No
Levenshtein	Si	No
Solapamiento	No	Si
Coseno	No	Si
Monge-Elkan	Si	Si

Tabla 2 Tabla comparativa de las medidas de similitud

El diagrama que muestra el funcionamiento del experimento se muestra en la figura 1.

ISSN en trámite

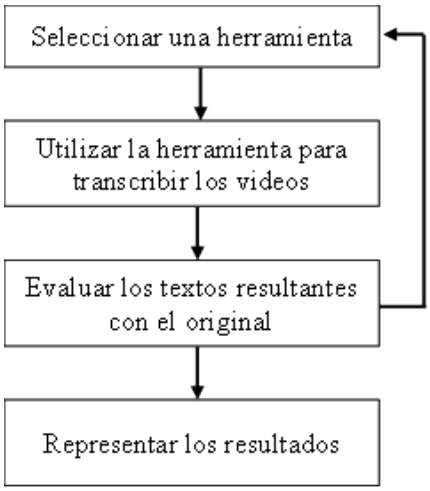


Figura 1 Modelo del experimento

4.3.Selección de videos

Los videos utilizados en este experimento tuvieron que cumplir ciertos criterios, los cuales fueron divididos en dos grupos, el primer grupo fue para una transcripción más fácil y en un entorno controlado; el segundo grupo buscó medir la eficiencia de estos sistemas en un entorno más complicado. Los criterios son:

- Grupo 1
  - Poco ruido ambiental
  - Habla lenta
  - Máximo dos personas hablando, pero en diferentes tiempos
  - Mención de nombres poco complejos (Nombres que no requieren una escritura compleja y únicamente en el idioma español)
- Grupo 2
  - Cantidad aumentada de ruido ambiental
  - Habla rápida
  - Máximo tres personas hablando al mismo tiempo
  - Mención nombres complejos (Nombres que cuentan con una escritura compleja o se encuentran en otro idioma) o poco complejos
  - Balbuceos

5. Resultados

Se analizaron seis fracciones de videos, tres que pertenecen a los criterios del “grupo 1” y tres que pertenecen a los criterios del “grupo 2”, estos videos cuentan con varias características de sus grupos correspondientes, los videos y sus características son:

- Grupo 1
  - Video 1 (V1)
    - Poco ruido ambiental
    - Habla lenta
    - dos personas hablando, pero en diferentes tiempos
    - Mención de nombres poco complejos
  - Video 2 (V2)
    - Poco ruido ambiental
    - Habla lenta
    - Mención de nombres poco complejos
  - Video 3 (V3)
    - Habla lenta
    - Mención de nombres poco complejos
- Grupo 2
  - Video 1 (V1)
    - Habla rápida
    - Mención nombres complejos
    - Balbuceos
  - Video 2 (V2)

ISSN en trámite

- Cantidad aumentada de ruido ambiental
- Habla rápida
- Mención nombres complejos

- Video 3 (V3)
  - Cantidad aumentada de ruido ambiental
  - Máximo tres personas hablando al mismo tiempo
  - Mención nombres complejos y poco complejos.

Al poner a prueba las herramientas de transcripción de voz a texto, Google docs mostro deficiencia en entender los audios, siendo que se puso a prueba en las mismas condiciones que las demás herramientas, por lo que no se pudieron obtener resultados de esta.

Google Cloud, Amazon AWS, Asure y Watson, cuentan con la capacidad de agregar signos de puntuación según sea requerido, estos no son muy precisos, ya que agregan punto, comas y signos de interrogación erróneos. Se tomó la decisión de ignorar los signos de puntuación y únicamente medir la similitud de las palabras, ya que los signos de puntuación pueden incluir un análisis fonológico que queda fuera del objetivo del experimento

En la tabla 3 se muestran los porcentajes de similitud que tuvieron los textos resultantes de los sistemas de transcripción comparados con los textos originales.

		Grupo 1			Grupo 2		
Empresa	Servicio	Video 1	Video 2	Video 3	Video 1	Video 2	Video 3
Amazon	Amazon AWS	0.94	0.96	0.95	0.92	0.87	0.94
Google	Google Cloud	0.89	0.97	1	0.93	0.91	0.94
	Youtube subtitulos	0.95	0.96	0.95	0.95	0.88	0.95
IBM	Watson	0.79	0.91	0.9	0.81	0.73	0.85
Microsoft	Azure	0.97	0.99	0.97	0.95	0.93	0.96
	Word	0.98	0.98	1	0.98	0.95	0.99

Tabla 3 Porcentaje de similitud de los sistemas de transcripción

Los mejores resultados fueron obtenidos Azure y Word ambas herramientas con resultados muy similares, seguidos por Google Cloud y los subtítulos de Youtube, Amazon AWS queda muy a la par de las herramientas de Google y por último Watson el cual obtuvo los resultados más bajos, siendo este el que más dificultades tuvo al transcribir cambiando, agregando o excluyendo palabras.

En el grupo 1 las mayores dificultades al momento de transcribir fueron los nombres, aunque poco complejos estos solían no transcribir bien algunos nombres principalmente cuando existía presencia de ruido ambiental. Un ejemplo de la mala transcripción de nombres es el cambiar el nombre del comediante “Ojitos de huevo” por “cientos de huevo” o “cuantos debo”. En la tabla 4 se encuentran la transcripción correcta de los nombres (N. o.), los nombres transcritos de manera incorrecta (N. c.) y los nombres que fueron eliminados en la transcripción (N. e.), del grupo 1. Es necesario mencionar que todas las herramientas, transcribieron correctamente todos los nombres del video 3.

ISSN en trámite

		Video 1			Video 2		
Empresa	Servicio	N. o.	N. c.	N. e.	N. o.	N. c.	N. e.
Amazon	Amazon AWS	3	2	0	0	3	0
Google	Nube de google	2	1	2	1	1	1
	Youtube subtitulos	3	2	0	1	2	0
IBM	Whatson	0	3	2	0	1	2
Microsoft	Azure	3	2	0	3	0	0
	Word	3	2	0	2	0	1

Tabla 4 Transcripción de nombres del Grupo 1

En el grupo 2 se observó un mayor problema para los sistemas de transcripción en los nombres más complejos, como por ejemplo “Bobby” siento este cambiado por “Tobi”, “voy” u “hoy”. En la existencia de nombres poco complejos las herramientas de transcripción no pudieron transcribirlos correctamente, al ser mencionados cuando 2 personas hablaban al mismo tiempo. En la tabla 5 se encuentran la transcripción de los nombres del grupo 2.

		Video 1			Video 2			Video 3		
Empresa	Servicio	N. o.	N. c.	N. e.	N. o.	N. c.	N. e.	N. o.	N. c.	N. e.
Amazon	Amazon AWS	2	6	0	0	3	1	0	2	1
Google	Nube de google	1	4	3	0	3	1	0	3	0
	Youtube subtitulos	2	6	0	0	3	1	1	2	0
IBM	Whatson	2	0	6	0	1	3	0	0	3
Microsoft	Azure	1	5	2	0	4	0	0	2	1
	Word	3	5	0	0	4	0	0	2	1

Tabla 5 Transcripción de nombres del Grupo 1

En la presencia de una gran cantidad de ruido ambiental la mayoría de los sistemas reaccionaron muy bien siendo que en la presencia de ruido ambiental intentaban interpretar las palabras que se estaban diciendo, siendo que en algunos casos cambiaban o excluían palabras, sin embargo, donde se notó más deficiente en la existencia de ruido fue Watson, el cual agregaba palabras muy distintas a las originales o excluía muchas palabras.

En la evaluación del balbuceo del Video 1, perteneciente al grupo 2, se quiso comprobar la reacción de los sistemas ante esta situación, en la mayoría de los casos los sistemas intentaron interpretar los balbuceos, a excepción de Word el cual fue el único que ignoro el balbuceo.

Al momento de transcribir los audios se observó una gran diferencia en la trascripción utilizando un habla lenta y un habla rápida, obteniendo mejores resultados en el habla lenta.

6. Conclusiones

Los sistemas de transcripción presentan una gran precisión aun con la existencia de ruido ambiental y un habla rápida, siendo su mayor deficiencia el reconocimiento de nombres. Además, el uso al que este orientado el sistema de transcripción puede afectar positiva o negativamente la transcripción del habla ya que puede que este esté programado para ciertos escenarios específicos.

Se puede notar que los sistemas de transcripción que pertenecen a la misma empresa presentan resultados muy similares por lo que se puede llegar a pensar que utilizan las mismas tecnologías con ciertas modificaciones para su uso al que está enfocado.

7. Bibliografía

Cienfuegos Ardura, J. A., Fernández Gavilanes (advisor), M., & González Coma (advisor), J. P. (2021). Desarrollo de un asistente de voz para la generación de un cuaderno de bitácora digital.

ISSN en trámite

http://calderon.cud.uvigo.es/handle/123456789/411

Garayzábal Heinze, E., Universidad Autónoma de Madrid, Queralt, S., Reigosa, M., Ridao, S., Forenses, S.-L., Policía Nacional Laboratorio de Acústica Forense de la Policía Científica, & Universidad de Almería. (2019). La transcripción de registros de audio en el ámbito policial y judicial español: una propuesta de criterios. Logos (La Serena. Impresa), 29(1), 45–59.

Kirschning, A. O. I. (n.d.). Evaluación de métodos de determinación automática de una transcripción fonética. Udlap.Mx. Retrieved October 24, 2021, from http://ict.udlap.mx/people/ingrid/ingrid/ENC99_409.pdf

López Calderón, J. (2019). Sistema de transcripción y análisis de voz empleando técnicas de Procesado de Lenguaje Natural y Machine Learning. Universitat Politècnica de Catalunya.

Mario Ezequiel, V. G., & Olivares Zepahua, B. A. (2016). Desarrollo de una aplicación para realizar el registro de notas médicas en el expediente clínico electrónico de un sanatorio mediante el reconocimiento de voz.

Monge, A. E., & Elkan, C. (1996). The field matching problem: Algorithms and applications. https://www.semanticscholar.org/paper/2fc7b36564eff791d5997178f7aa649ee57cd72b

Moya Córdoba, D. (2021). Desarrollo de una herramienta para la conversión de voz a texto. ETSI_Informatica.

ISSN en trámite

Construcción de un sistema RBC para la recomendación de fisioterapia pulmonar en pacientes con EPOC

Cinthia Rubi Hernández González *. María Angélica Cerdán*.
Rodrigo Rodríguez Franco*.

**Tecnológico Nacional de México/ITS de Xalapa, Xalapa, Veracruz, CP 91096 MEX (e-mail: 207O01962@itsx.edu.mx,* angelica.cerdan@itsx.edu.mx*, rodrigo.rf@xalapa.tecnm.mx).*

Resumen: Las enfermedades crónico-degenerativas se han convertido en un problema importante de salud en México. Las Enfermedades Pulmonares Obstructivas Crónicas (EPOC), son padecimientos inflamatorios que dañan paulatinamente el pulmón y constituyen una de las primeras diez causas de muerte. Su evolución requiere atención a largo plazo, incluyendo la fisioterapia respiratoria que mejora la calidad de vida del paciente. Estos tratamientos tienen un alto costo tanto para el paciente como para el sistema de salud, y su prescripción se da en función del diagnóstico del paciente y su proceso de evolución. Ante la saturación actual de estos servicios de salud a cuya demanda se ha sumado la derivada por las secuelas del COVID-19, y, con la finalidad de apoyar a la optimización de los tiempos de atención, este trabajo propone desarrollar una aplicación de Razonamiento Basado en Casos (RBC) para recomendar programas de fisioterapia pulmonar. El RBC es el campo de la inteligencia artificial que resuelve un problema basado en casos pasados. Se desarrolló un prototipo RBC para la atención del EPOC utilizando jCOLIBRI empleando el algoritmo k-NN (k-vecinos) para el cálculo de la similitud global, además se ha estudiado su funcionalidad en casos documentados.

Keywords: Razonamiento Basado en Casos, sistema de recomendación, fisioterapia pulmonar, Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica, e-Health, k-NN.

1. INTRODUCCIÓN

La Organización Mundial de la Salud (OMS) menciona que las tres principales causas de muerte a nivel mundial son las enfermedades cardiovasculares, respiratorias y las afecciones neonatales. Además, clasifica las causas de muerte en tres categorías: enfermedades transmisibles, enfermedades no transmisibles o crónicas y lesiones, donde las enfermedades no transmisibles o crónicas representaron el 74% de defunciones a nivel mundial en el año 2019, porcentaje que ha ido en aumento. Tan sólo el número de muertes por cáncer de tráquea, bronquios y pulmón ha aumentado de 1.2 millones a 1.8 millones, ocupando el sexto lugar entre las principales causas de defunción (OMS, 2020). Entre ellas, se estima que las Enfermedades Pulmonares Obstructivas Crónicas (EPOC) afectan a 210 millones de personas, con 3 millones de defunciones anuales (Knox, et al., 2020).

El Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) identifica las EPOC, como la décima causa de muerte en México, en el periodo enero-agosto del año 2020, con un 88.6% de las defunciones en personas mayores de 65 años sólo en ese lapso de tiempo.

Las EPOC son padecimientos de tipo inflamatorio que dañan paulatinamente el pulmón, caracterizados por tos, esputo y disnea, siendo potencialmente mortales. Los pacientes con EPOC enfrentan una evolución en los síntomas que llegan a ser imposibilitantes, afectando seriamente la calidad de vida. Para reducir los síntomas y mejorar la tolerancia al ejercicio, requieren de tratamientos a largo plazo, que pueden incluir esquemas farmacológicos, fisioterapia y en función de la gravedad o ante exhaservaciones, tratamientos más complejos. La rehabilitación pulmonar y física, ayuda principalmente a disminuir los costos médicos y la posibilidad de una intervención hospitalaria (Cox, et al., 2017).

En la actualidad, las tecnologías de la información tienen un impacto directo en el área médica, dado que están surgiendo nuevas investigaciones que mejoran aspectos importantes, como: la atención médica, los tratamientos y la rehabilitación de personas con enfermedades crónicas.

El conocimiento médico y de atención en la rehabilitación, crece de manera constante, incluso a los expertos especialistas les es difícil dar seguimiento a los casos nuevos, métodos de prescripción, pronósticos y tratamientos. Por lo que se necesitan años de ejercicio profesional y práctica para la prescripción y adaptación de tratamientos adecuados a la evolución de un paciente. Así que dotar de sistemas basados en esquemas de razonamiento experto, representa una heramienta importante de apoyo a su trabajo.

ISSN en trámite

Estas herramientas constituyen una tendencia tecnológica de la e-Health, campo emergente que involucra la informática, la medicina y los negocios, para mejorar la atención médica que se ofrece a nivel local, regional y mundial (Ramos, et al., 2018). Los beneficios de la e-Health, se extienden sobre las decisiones médicas, desde el diagnóstico, tratamiento y seguimiento (Abajo, et al., 2011), apoyando en todo momento a los especialistas en la particularización de la atención de los casos.

El Razonamiento Basado en Casos (RBC) es un método muy conocido en el ámbito de la inteligencia artificial, que resuelve problemas bajo el esquema cognitivo de la forma en que un experto aborda un nuevo problema con base a su experiencia. Por lo que se ha aplicado ampliamente en el proceso médico de diagnóstico-prescripción, como parte de la e-Health.

2. RAZONAMIENTO BASADO EN CASOS

El RBC, tal como lo menciona Pajares et al. (2010) en Ortiz Chou, et al. (2017), es un método para la resolución de problemas inspirado específicamente en las ciencias cognitivas, el razonamiento humano y el uso de la memoria. El fundamento principal del RBC, es que casos similares deben tener soluciones similares (Sultan, 2017).

El RBC se puede aplicar básicamente a cualquier dominio de problemas y es ampliamente utilizado en el ámbito de la medicina, generalmente en situaciones donde se toman decisiones, ya que el aprendizaje del RBC es similar al aprendizaje humano, pues es incremental partiendo de la solución que se le da en su momento a un problema ya resuelto (Ortiz Chou, et al., 2017). La resolución de problemas mediante el reuso de soluciones previas (experiencias), ha demostrado su éxito aplicativo. El ciclo básico de un RBC, que recopila casos como experiencias de apredizaje, e incluye (Lozano & Fernández, 2008):

- Recuperación: se eligen casos anteriores con base a sus características y una medida de similitud.
- Reutilización: se utiliza el grado de similitud para elegir la solución adecuada.
- Revisión: se adapta la solución propuesta, modificándola.
- Retención: una vez aplicada la solución, se debe decidir si guarda una diferencia suficiente como para constituir un nuevo caso.

3. TRABAJOS RELACIONADOS

Siendo ampliamente utilizado en la medicina en el dominio de los sistemas de apoyo a la toma de decisiones, el RBC se ha encontrado en diversos trabajos aplicados a padecimientos pulmonares, principalmente para el diagnóstico y como herramienta de apoyo para el personal médico.

Enfocados al asma, (Darabi y Teimourpour, 2017) aplican el RBC para diagnóstico en apoyo a la toma de decisiones del tratamiento y (Quinde, et al., 2020) desarrollan una solución contextual para el manejo personalizado del asma.

Orientados al COVID-19, padecimiento que, aunque multi-sistémico, encuentra en la sintomatología pulmonar una frecuencia importante, (Smiti y Nssibi, 2020) desarrollaron un marco conceptual basado en RBC para la predicción de la enfermedad, con la finalidad de generar un diagnosticador, asistente y guía para el paciente. También con orientación a detección y diagnóstico de COVID-19 a través de lenguaje natural y el uso de una ontología, (Oyelade y Ezugwu, 2020) propusieron un marco temporal basado en casos.

En otras aplicaciones, (Nilsson, et al., 2005) aplican razonamiento multimodal para clasificar las arritmias del seno respiratorio. (Nega y Kumlachew, 2017) desarrollaron un sistema inteligente híbrido de RBC y Razonamiento Basado en Reglas (RBR), para el diagnóstico y tratamiento de la tuberculosis, y, (Evans-Romaine y Marling, 2003) propusieron un prototipo de sistema RBC para apoyo a estudiantes de medicina deportiva, en la prescripción de regímenes de ejercicio a pacientes con enfermedades cardíacas y pulmonares.

Con relación al EPOC, (Sultan, 2017) propuso un prototipo de RBC para diagnóstico de enfermedades crónicas con conocimiento adquirido por expertos, lo que incluye al EPOC, aunque no se trata de una aplicación específica. (Guessoum y Lieber, 2014), proponen un sistema basado en los principios del RBC reuniendo experiencia de expertos, exclusivamente para diagnóstico de EPOC. Y finalmente, (Guessoum, 2012) realiza una combinación de RBC y RBR, entorno al EPOC, para diagnóstico y prescripción de terapia, sin embargo, sus resultados experimentales están enfocados únicamente al diagnóstico.

4. DESARROLLO

Nuestra problemática surge de la necesidad de apoyar a los especialistas involucrados en la rehabilitación pulmonar a optimizar su tiempo de clínica, por la recopilación de la experiencia en diagnósticos pasados, para facilitar y agilizar el trabajo de atención a nuevos casos, además de incrementar la accesibilidad a los servicios de salud por parte del paciente y disminuir los costos de atención. La implementación se basa en el tratamiento a las personas que padecen EPOC, con la finalidad de mejorar su calidad de vida mediante la recomendación de fisioterapia pulmonar (FP), apoyando al especialista en la toma de decisiones mediante casos clínicos pre-existentes asociados al paciente.

4.1 Plataforma de razonamiento jCOLIBRI

A lo largo de la implementación utilizamos la tecnología proporcionada por jCOLIBRI, plataforma especialmente diseñada para la implementación del RBC (GAIA, s.f.). Esta

ISSN en trámite

tecnología nos proporciona la infraestructura necesaria para desarrollar sistemas basados en RBC incluyendo las cuatro fases del ciclo (Figura 1). Principalmente se caracteriza por ser un marco orientado a objetos basado en Java, se ha utilizado la tecnología de JavaBeans para la representación de los casos. Esto ha permitido el fácil diseño de los casos como clases normales en Java con sus métodos *get*() y *set*() para cada atributo.

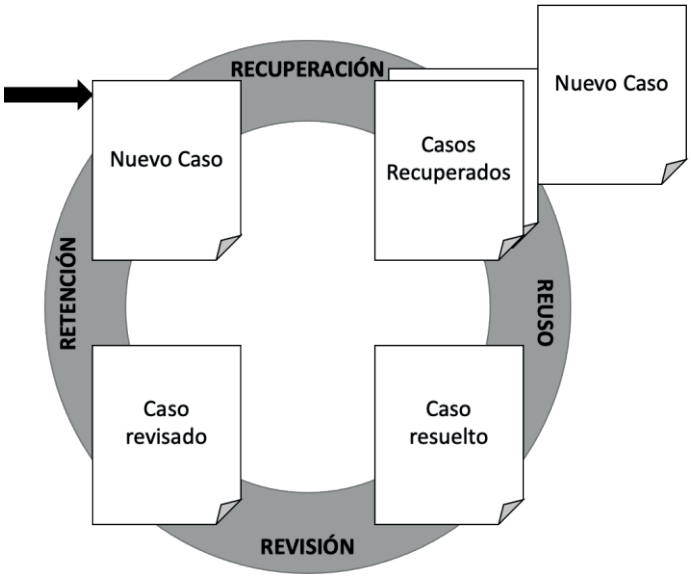


Fig. 1. Fases del RBC en jCOLIBRI

jCOLIBRI maneja la persistencia automática con las bases de datos ocupadas y archivos *XML*, la parte de la persistencia es gestionada por *Hibernate*, por lo cual permite almacenar fácil y automáticamente datos en una base de datos relacional con una o más tablas.

4.2 Estructura de los casos

La adquisición de conocimiento del dominio se ha realizado en dos fases, en la primera se estudiaron y compararon 4 guías internacionales y nacionales para el diagnóstico y tratamiento del EPOC:

1. Guía de práctica clínica: Diagnóstico y tratamiento de la enfermedad Pulmonar obstructiva crónica (IMSS, 2020)
2. Guía de práctica Clínica Mexicana para el diagnóstico y tratamiento de la Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica: GUÍA MEXICANA DE EPOC (Vázquez-García, J. C. et al., 2019)
3. Guía de práctica clínica Latinoamericana de EPOC-2019 (Montes de Oca, M., et al., 2019)
4. *Global strategy for the diagnosis, management, and prevention of chronic obstructive pulmonary disease 2021 report*, (GOLD, 2021).

Extrayéndose un total de 92 características que definen un caso clínico completo de EPOC, desde su diagnóstico hasta su tratamiento, generándose la información del dominio.

En la segunda fase a través de un método de concenso, las 92 características fueron validadas y priorizadas por un grupo de seis expertos (cinco fisioterapeutas, un médico especialista en rehabilitación pulmonar) todos en atención actual a estos padecimientos con experiencia comprobada (tres más de 5 años, uno entre 2 a 5 años y dos al menos 2 años), quedando un total de 35 características divididas en seis categorías, cinco de las cuales describen el caso y una la solución (correspondiente a la fisioterapia pulmonar), lo que se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Caracterización de los casos

Categoría	Característica
Demografía	Edad Género Ocupación Lugar de residencia Nivel socioeconómico Nivel de estudios
Síntomas	Disnea Tos crónica Exacerbaciones Esputo Sibilancias Expectoración Pérdida de peso Limitación del ejercicio físico Infecciones del tracto respiratorio Opresión en el pecho
Factores de Riesgo (FR)	Tuberculosis (TB) Asma
Diagnóstico	Disnea Fuerza muscular VEF1/CVF Oximetría Caminata de 6 minutos (C6M) Auscultación pulmonar (secreción) Índice de masa corporal
Tratamiento	Oxígeno suplementario Bullectomía Cirugía de reducción de volumen Trasplante pulmonar
FP (Fisioterapia Pulmonar)	Duración Tipo de aplicación Técnicas de higiene bronquial Acondicionamiento- entrenamiento físico Técnicas que favorezcan el flujo espiratorio Técnicas de reeducación respiratoria

Los pesos por categoría resultantes de la ponderación inicial otorgada por el grupo de expertos, se presentan en la Tabla 2.

 ISSN en trámite

Tabla 2. Pesos por categoría

Categoría	Pesos
Demografía	5%
Síntomas	70%
Factores de Riesgo (FR)	5%
Diagnóstico	10%
Tratamiento	10%
TOTAL	100%

La clasificación del EPOC se determina por el resultado de la prueba VEF1 (Volumen Espiratorio Forzado en un segundo), siendo: I Leve (>=80%), II Moderado (>= 50% < 80%), III Grave (>= 30% <50%), y IV Muy grave (VEFI < 30%), concepto incluido en la sintomatología. En este primer prototipo, no se incluyó el pre-procesamiento de datos faltantes quedándose como valor nulo.

4.3 Sistema de RBC

El RBC, se configuró con la vesión jCOLIBRI3 en el entorno de desarrollo de Java con el IDE Eclipse en su versión 2021-06 y para el almacenamiento de los casos se implementó una base de datos en MariaDB.

jCOLIBRI proporciona diversos métodos para calcular la similitud, en este caso se ha utilizado el algoritmo k-NN (k-vecinos) para la similitud global, que aplica la distancia euclidiana para comparar los valores de cada atributo. Los métodos de jCOLIBRI se orientan a la aplicación de inicialización (preciclo), uso de la lógica (ciclo) y el cierre (postciclo), en la lógica se ha utilizado la similitud global para la comparación de los casos.

5. RESULTADOS

El estudio experimental sobre el prototipo, evalúa la recuperación bajo un enfoque cualitativo, revisando la similitud calculada con base a un conjunto acotado de casos extraídos de expedientes clínicos reales de pacientes y las recomendaciones realizadas por los expertos, por lo cual, una vez implementado el proceso del RBC, se procedió a realizar pruebas para identificar potenciales mejoras en el diseño.

Para esta validación se cargaron 3 casos completos de pacientes con EPOC, como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Colección de casos previos

	Paciente 1	Paciente 2	Paciente 3
Edad	49	74	53
Género	Femenino	Masculino	Masculino
Síntomas	Tos, expectoración, infecciones en el tracto respiratorio.	Disnea, tos, expectoración, limitación al ejercicio, infecciones en el tracto respiratorio.	Disnea, limitación al ejercicio, infecciones en el tracto respiratorio.
FR	Asma	Tuberculosis	NA
Diagnóstico	Disnea grado 1, VEF1: 89	Disnea grado 5, VEF1: 54	Disnea grado 2, VEF1: 99
Tratamiento	NA	Oxígeno suplementario	NA
FP	Ejercicios: Drenaje postural, vibración manual, Aumento del Flujo Espiratorio (AFE), ELTGOL	Ejercicios: Patrón respiratorio diafragmático, patrón respiratorio costobasal, ELTGOL, ejercicio aeróbico	Ejercicios: Técnicas de Espiración Forzada (TEF), Aumento del Flujo Espiratorio (AFE)

Para probar que el RBC realiza la comparación correcta en las características y ientificando el caso de mayor similitud, se ingresó un cuarto caso con las características de la Tabla 4.

Tabla 4. Características del paciente prueba

	Paciente 4
Edad	70
Género	Masculino
Síntomas	Disnea, tos, limitación al ejercicio, infecciones en el tracto respiratorio.
FR	NA
Diagnóstico	Disnea grado 5, VEF1: 60
Tratamiento	Oxígeno suplementario

En la Tabla 5 se presentan los resultados de la recuperación de casos con base a la similitud (ya ordenados por grado), por los cuales el esquema de FP (Fisioterapia Pulmonar) recomendado, será el correspondiente al paciente número 2. Los resultados demuestran un correcto cálculo de la similitud con base a las características identificadas anterioremente en la Tabla 1 y sus ponderaciones correspondientes de la Tabla 2.

Tabla 5. Resultados ordenados por grado de similitud, de la recuperación

Paciente	Resultado desde el sistema con jCOLIBIRI
2	Retrieved cases: Similaridad: 0.7517095613160651 Paciente 2: Edad: 74 Genero: Masculino

 ISSN en trámite

3	Similaridad: 0.5324240192955892 Paciente 3: Edad: 53 Genero: Masculino
1	Similaridad: 0.4234441317758767 Paciente 1: Edad: 49 Genero: Femenino

Del nuevo caso (Tabla 4), se ejercitaron 10 variantes para estudiar la fiabilidad sobre el cálculo de la similitud (Tabla 6). Se encontró que ante datos faltantes en las características demográficas y de diagnóstico, el cambio fue marginal, caso contrario en los factores de riesgo y tratamiento, donde el grado de similitud disminuyó, aún teniendo características relevantes similares. Fueron necesarios cambios mayores, como los implementados en las variantes 8, 9 y 10, para que la recomendación cambiara.

Tabla 6. Ejercitación de variantes

#	Variantes introducidas en el caso nuevo	Resultado	
		Caso mayor similitud	Grado de similitud
1	Edad- 50, Género- Femenino	2	0.76384
2	Género- Femenino	2	0.74722
3	FR- Asma	2	0.71345
4	Síntomas- sin disnea	2	0.71266
5	Disnea grado- 1	2	0.71187
6	Sin tratamiento	2	0.67302
7	Sin FR, Sin tratamiento	2	0.63000
8	Disnea grado- 2, Sin fuerza muscular C6M- 10, Sin FR, Sin tratamiento	3	0.64305
9	Disnea grado- 1, Sin tratamiento, Síntoma- sin disnea, Sin limitación al ejercicio	1	0.59325
10	Sin FR, Sin tratamiento, Síntoma- sin tos	3	0.58365

6. CONCLUSIONES

El campo de la e-Health, ha evidenciado ser una herramienta útil de apoyo a los expertos de la salud en diferentes áreas. Mecanismos como el Razonamiento Basado en Casos (RBC), ofrecen una alternativa de asistencia al personal médico en la toma de decisiones, para mejorar el apoyo a los pacientes con padecimientos crónicos. El RBC se ha aplicado para el diagnóstico y prescripción de tratamiento en padecimientos pulmonares, incluyendo la EPOC. Se observa la oportunidad de su uso en la prescripción de fisioterapia para este tipo de pacientes.

En este trabajo se implementó la primera aproximación de un sistema de RBC, para la recomendación de programas de fisioterapia pulmonar en pacientes con EPOC. La implementación se realizó en la plataforma jCOLIBRI, almacenándose los casos en MariaDB. Se abordó la primera fase del RBC, correspondiente a la recuperación del caso más similar, aplicando como fórmula de similitud global el algoritmo k-NN y para la similitud parcial la distancia euclidiana.

Como prueba cualitativa, se documentaron 3 casos y se evaluó el cálculo de similitud de un nuevo caso, obteniéndose la mayor similitud (0.7517) con el caso del paciente 2, considerándose las características y ponderaciones iniciales propuestas por un grupo experto, comprobándose como correcto el cálculo.

Con la finalidad de explorar los límites de los valores que generan el cambio en la similitud y la prescripción, se ejercitaron 10 variantes del nuevo caso, que al ser analizadas permiten identificar los efectos de los pesos inicialmente otorgados sobre el resultado, donde se concluye que, deben reconsiderarse los pesos en los factores de riesgo y tratamiento actual, para dar mayor ponderación a las características de diagnóstico. En general los pesos de los síntomas se encuentran bien calibrados.

La recolección de casos es más difícil de lo que se pensaba, además de que la mayoría de las veces, éstos se encontrarán con datos faltantes. Por tal motivo el siguiente paso es el reajuste de los pesos de las características con base a estos resultados en acuerdo con los expertos y el tratamiento de datos faltantes.

Como trabajo futuro se deberá crear una base de conocimientos con un mayor número de casos, para estudiar su comportamiento y eficiencia a nivel de precisión, así como implementar un pre-procesamiento de la información para tatar el problema de datos faltantes. De igual manera, es importante mejorar la "explicabilidad" de la solución resultante, para un mejor entendimiento por parte del experto de la forma en cómo el sistema llega a una conclusión.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece al CONACyT. Beca 2020-000026-02NACF-22812.

Los autores agradecen al TECNM. Proyecto (CI-02/2021A-ppfcn5).

Los autores agradecen a la especialista L.F.T. Alejandra Hernández López, por su invaluable colaboración en este proyecto y a los especialistas que participan en la integración del conocimiento experto.

ISSN en trámite

REFERENCIAS

Abajo, B., Rodrigues, J., Salcines, E.; Fernandez, J., Coronado,M. Y Lozano, C., (2011). M-health y T-health. la evolucicion natural del e-health. En: RevistaeSalud.com.

Cox, N. S., Oliveira, C. C., Lahham, A., y Holland, A. E. (2017). Pulmonary rehabilitation referral and participation are commonly influenced by environment, knowledge, and beliefs about consequences: a systematic review using the Theoretical Domains Framework. *Journal of Physiotherapy*, 63(2), 84–93. doi: https://doi.org/10.1016/j.jphys.2017.02.002

Darabi, S. A., y Teimourpour, B. (2017). A Case-Based-Reasoning System for Feature Selection and Diagnosing Asthma. En: *Handbook of Research on Data Science for Effective Healthcare Practice and Administration*. IGI Global. pp. 444–459. doi: 10.4018/978-1-5225-2515-8.ch019

Evans-Romaine, K., y Marling, C. (2003). Prescribing exercise regimens for cardiac and pulmonary disease patients with CBR. En: *Workshop on CBR in the health sciences at 5th international conference on case-based reasoning* (ICCBR-03) (pp. 45-62).

Global Initiative for Chronic Obstructive Lung [GOLD], (2020). *Global strategy for the diagnosis, management, and prevention of chronic obstructive pulmonary disease 2021 report*. Global Initiative for Chronic Obstructive Lung Disease.

Group of Artificial Intelligence Applications [GAIA], (s.f.). *jCOLIBRI* [en línea]. Disponible en: https://gaia.fdi.ucm.es/research/colibri/jcolibri/ [Consultado el 22 de septiembre de 2021].

Guessoum, S., Laskri, M. T., y Lieber, J. (2014). RespiDiag: a case-based reasoning system for the diagnosis of chronic obstructive pulmonary disease. *Expert Systems with Applications*, 41(2), 267-273. doi: 10.1016/j.eswa.2013.05.065

Guessoum, S., Laskri, M. T., Hayet, D. y Khadir, M.., (2012). Combining Case and Rule Based Reasoning for the Diagnosis and Therapy of Chronic Obstructive Pulmonary Disease. En: *International Journal of Hybrid Information Technology*, 5.

INEGI. (2019). Características de las defunciones registradas en México durante 2018. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Disponible en: https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2019/EstSociodemo/DefuncionesRegistradas2019.pdf

Instituto Mexicano del Seguro Social [IMSS] (2010). *Diagnóstico y Tratamiento de la Enfermedad Pulmonar Obstructiva*. México. Disponible en: http://www.imss.gob.mx/sites/all/statics/guiasclinicas/037GER.pdf

Kouamé, K.-M. y Mcheick, H., (2021). An Ontological Approach for Early Detection of Suspected COVID-19 among COPD Patients. *Applied System Innovation*. **4**(1), 21. doi: 10.3390/asi4010021

Montes de Oca, M., et al., (2019). *Guía de práctica clínica Latinoamericana de EPOC-2019*. Disponible en: https://alatorax.org/es/guias/guia-de-practica-clinica-latinoamericana-de-epoc-basada-en-evidencia

Nega, A. y Kumlachew, A., (2017). Data Mining Based Hybrid Intelligent System for Medical Application. *International Journal of Information Engineering and Electronic Business*. **9**(4), 38–46. doi: 10.5815/ijieeb.2017.04.06

Nilsson, M. y Funk, P., (2004). A Case-Based Classification of Respiratory Sinus Arrhythmia. En: *Lecture Notes in Computer Science*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. pp. 673–685. doi: 10.1007/978-3-540-28631-8_49

Organización Mundial de la Salud [OMS] (2021). Las 10 principales causas de defunción. *WHO | World Health Organization*. Disponible en: https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death

Ortiz Chou, Y. K., Rodas-Osollo, J. y Ochoa Zezzatti, A. (2017) Razonamiento Basado en Casos (RBC). *Cultura Científica y Tecnológica*, (63). Disponible en: http://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/article/view/2178.

Oyelade, N. y Ezugwu, A., (2020). COVID19: A Natural Language Processing and Ontology Oriented Temporal Case-Based Framework for Early Detection and Diagnosis of Novel Coronavirus. *Mathematics & computer science*. 1.

Quinde, M., Augusto, J. C., Khan, N. y van Wyk, A., (2020). ADAPT: Approach to Develop context-Aware solutions for Personalised asthma managemenT. *Journal of Biomedical Informatics*. **111**, 103586. doi: 10.1016/j.jbi.2020.103586

Ramos, M., Sánchez, J., Muñoz, V., Marcial-Romero, J. R., Valle-Cruz, D., López, A. L. y Ramos, F., (2018). E-health: Agent-based models to simulate behavior of individuals during an epidemic outbreak. En: *'18: 19th Annual International Conference on Digital Government Research, Delft The Netherlands*. New York, NY, USA: ACM. doi: 10.1145/3209281.3209289

Smiti, A. y Nssibi, M., (2020). Case Based Reasoning Framework for COVID-19 Diagnosis. *Ingénierie des systèmes d'information*. **25**(4), 469–474. doi: 10.18280/isi.250409

Sultan, E. (2017). Application of Case Based Reasoning For Chronic Disease Diagnosis And Treatment. thesis. Disponible en: http://etd.astu.edu.et/handle/123456789/1249

Vázquez-García, J. C. et al., (2019). Guía de Práctica Clínica Mexicana para el diagnóstico y tratamiento de la Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica GUÍA MEXICANA DE EPOC, 2020. *NCT Neumología y Cirugía de Tórax*. 78(S1), 4–76. doi: 10.35366/nts191a

ISSN en trámite

Modelado numérico de la influencia de la tasa de alimentación y parámetros fisicoquímicos, in situ, en relación con la ganancia de peso de Tilapia (Niloticus Oreocrhomis)

Meza-Villalvazo, A. N. Bricio-Barrios, E. E. Arceo-Díaz, S.

* *Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Colima*
(e-mail: santiago.arceo@colima.tecnm.mx)

Resumen En México, la acuicultura es uno de los sectores productivos más exitosos debido a la facilidad de crianza, cosecha y consumo de especímenes acuáticos. No obstante, los costos asociados al proceso de engorda de los peces pone en riesgo la viabilidad económica del proceso. Por tanto, este trabajo propone abordar, desde una perspectiva de optimización clásica y avanzado, la identificación de la tasa de alimentación de tilapia en un sistema dinámico y validarlo respecto al proceso estacionario y experimental. Los resultados mostraron que existe un sesgo en la relación alimentación-ganancia de peso al evaluar el caso de estudio en estado estacionario y dinámico. Aunado a esto se identificó que el método avanzado tiene una mejor aproximación a los datos experimentales, no obstante, la tasa de alimentación requerida para alcanzar la trayectoria es superior respecto al método clásico de optimización, el cual se asemeja a la tasa de alimentación empleada por los acuicultores artesanales.

Keywords: Acuicultura, Modelado de ganancia de peso, Tilapia, Optimización analítica, Mínimos cuadrados, Levengerg-Marquard.

1. INTRODUCCIÓN

La acuicultura se refiere al cultivo de organismos acuáticos que, generalmente son destinados para su repoblación de ambientes naturales, ornato y, en mayor proporción para consumo humano (Bautista (2007)).

Se estima que el 83.6 % de la producción pesquera es de agua dulce como carpas, salmón y tilapia FAO (2010). En específico, la tilapia Oreochromis Niloticus es un pez originario del continente africano que en las últimas décadas ha sido introducido en prácticamente todas las regiones en ambientes tropicales (Vega, et al, 2010).

El éxito de este especimen se debe a la alta rentabilidad debido a los atributos metabólicos y su alta tasa de ganancia de peso, resistencia a enfermedades y condiciones de alta densidad poblacional, facilidad de adaptación al variar el tipo de alimento dosificado, entre otros (CNA (2015)).

A nivel mundial, en el 2020 México tuvo una producción pesquera de agua dulce de 88 mil 094 toneladas con un valor de dos mil 377 millones de pesos, no obstante fue 4.3 % menor respecto al año anterior por la baja demanda en consumo nacional y de exportación hacia Estados Unidos a causa de la pandemia (SEGOB (2021)).

El proceso de crianza de tilapia para consumo humano ha sido estandarizado por manuales de operación como los publicados escala internacional como FAO (2021) y nacional como SENASICA (2008) y Conapesca (2003). Estos documentos coinciden en la importancia del monitoreo y control de los parámetros de calidad de agua como temperatura, oxígeno disuelto, concentración de amonia sin ionizar (Brett J. y Gloves (1797); Cuenco (1985)) que, en caso de no controlarse, puede provocar una disminución o una pérdida total de la producción (Fernández and Schenone (2010)).

La temperatura del agua es la variable más importante que afecta a la producción acuícola, este parámetro afecta a la productividad natural de los ecosistemas acuáticos y directa o indirectamente a todas las demás variables de calidad del agua; sus valores deben situarse ente los 24 y 29. Respecto a la salinidad se recomienda una concentración inferior a 20 mg/l, en caso que se exceda, la tasa de sobrevivencia se reducirá. La exposición de los animales acuáticos a valores extremos de pH puede ser estresante o letal, aunque también podría afectar los equilibrios acuosos que implican amoníaco, el sulfuro de hidrógeno, el cloro y los metales, así como la fertilidad de los ecosistemas. Por otra parte, la disponibilidad de oxígeno disuelto (OD) limita con frecuencia las actividades y el crecimiento

ISSN en trámite

de los animales acuáticos, si las concentraciones de OD son constantemente bajas, los animales no se alimentarán ni crecerán bien y serán susceptibles a enfermedades infecciosas; si las concentraciones caen a niveles muy bajos, podría provocarles la muerte. El amoníaco es el principal producto de desecho nitrogenado que excretan los peces. La acumulación de amoníaco en los sistemas de acuicultura es indeseable ya que es tóxico para los animales, y, por tanto, su concentración en el medio debe ser menor a 0.1 mg/l; las concentraciones de este compuesto están determinadas por las concentraciones de amoníaco total, el pH y la temperatura del agua (Boyd (1998)), CNA (2015)).

Por otro lado, la tasa de alimentación es un parámetro de interés que ha sido asociado directamente con la ganancia de peso de la tilapia (von Bertalanffy (1938)). No obstante, en caso de sobrealimentar el especimen, incrementará la orina y heces fecales ricas en proteínas que, al degradarse por la acción de oxígeno, se producirán productos tóxicos nitrogenados (Aguilar (2014)).

Dado que, identificar la tasa de alimentación es un proceso a prueba y error, esta problemática se torna un nicho de oportunidad que puede ser abordado a través de métodos de minimización de errores de los datos experimentales respecto al modelo propuesto. Este trabajo, propone, vía simulación, evaluar la influencia de la tasa de alimentación identificada a través de estrategias numéricas y su relación con los parámetros de calidad de agua en estado estacionario y dinámico en relación con ganancia de peso en tilapia (Niloticus Oreocrhomis).

2. METODOLOGÍA

2.1 Modelo matemático

La simulación numérica de la ganancia de peso (en gramos) en función del tiempo (días) se realizó a través del modelo matemático propuesto por Ursin (1957) que, representa el metabolismo de la tilapia conformada por la fracción y eficiencia de las constantes de asimilación "a", "b" en magnitud adimensional, coeficiente de consumo de alimento h en $g/día$, tasa de alimentación diaria r (alimento diario/peso de la tilapia) y coeficiente de catabolismo k en $(g*día)^{-1}$ La magnitud de estos coeficientes se pueden consultar en Yi (1998) .

$$\frac{dW}{dt} = \{(1-a)*b*r*W^n\} - k*W^m; \qquad (1)$$

$$k = k_{min} * e^{\{j(T-T_{min})\}}. \qquad (2)$$

donde k_{min} es la constante de consumo catabólico al no consumir alimento en $gr*día^{-1}$, j corresponde a la temperatura de catabolismo y T_{min} y T es la temperatura mínima y del medio en el cuerpo de agua en $°C$.

Para disponer de un modelo matemático de mayor precisión, se incorporó los efectos medioambientales, llamada "E"

$$E = \tau * \delta * \nu; \qquad (3)$$

La Ec. 4 asocia la relación de la ganancia de peso con los parámetros fisicoquímicos del cuerpo de agua como la temperatura, τ, la concentración de amonio sin ionizar, δ, y el OD, ν, magnitudes que son adimiensionales al ser normalizados bajo las siguientes funciones a trozos que dependen de las condiciones ambientales medidas en un tiempo definido:

$$\frac{dW}{dt} = \{(1-a)*b*r*E*W^n\} - k*W^m; \qquad (4)$$

Dado que, los sistemas acuícolas son de tipo dinámico; Yi (1998) propuso que los parámetros que conforman los efectos medioambientales fuesen una variable que dependiera de los intervalos de sobrevivencia y condiciones óptimas de ganancia de peso la tilapia. Estas relaciones se muestran a continuación.

$$\tau = exp\left\{-4{,}6 * \left[\frac{T_{opt}-T}{T_{opt}-T_{min}}\right]^4\right\}; \qquad si \quad T < T_{opt}$$

$$\tau = exp\left\{-4{,}6 * \left[\frac{T-T_{opt}}{T_{max}-T_{opt}}\right]^4\right\}; \qquad si \quad T \geq T_{opt}$$

donde T_{op}, T_{min} es la temperatura óptima.

$$\delta = \frac{DO_{min}}{DO_{crit}-DO_{min}}; \qquad si \quad DO_{min} \leq DO \leq DO_{crit}$$

$$\delta = 1 \qquad si \quad DO > DO_{crit}$$

$$\delta = 0 \qquad si \quad DO > DO_{min}$$

la magnitud DO_{min} y DO_{crit}, corresponde a la concentración mínima y crítica de oxígeno disuelto.

$$\nu = \frac{A_{max}-A}{A_{max}-A_{crit}}. \qquad si \quad A_{crit} \leq A \leq A_{max}$$

$$\nu = 1 \qquad si \quad A < A_{crit}$$

$$\nu = 0 \qquad si \quad A > A_{max}$$

las magnitudes de A_{crit} y A_{max} es la concentración de amonio sin ionizar crítico y máximo medido en el interior del estanque de crianza, en g/l.

ISSN en trámite

2.2 Banco de trabajo

Se seleccionaron los datos experimentales reportados por Mena (2001), quien realizó el sensado semanal, in situ, durante 157 días de los parámetros de calidad de agua (temperatura, pH, OD), peso de alimento vertido en el tanque de crianza de tilapia (en gramos) y ganancia de peso de los especímenes (en gramos). Este estudio se realizó en la granja acuícola *El Naranjo* ubicada en la laguna de Jualuapan, en Colima, México.

Para emplear el modelo matemático que describe la ganancia de peso de la tilapia desarrollado por (Ec. 4) Ursin (1957), es necesario disponer con los parámetros de calidad de agua. No obstante, la amonia sin ionizar, es compuesto nitrogenado cuya medición requiere un sensor con un costo aproximado de 1500 USD (Hanna (2020)), limitando significativamente la adquisición de este dispositivo por los acuicultores artesanales. Este parámetro de calidad de agua puede estimarse indirectamente a través de las propiedades extensivas de la materia, es decir, temperatura, pH y peso molecular. A continuación se muestra la estimación de la concentración indirecta propuesta por Chang (2010):

$$NH_3 = NH_{3_{total}} * f * \frac{PM_{NH_3}}{PM_{NH_4}}; \quad (5)$$

$$f = \frac{1}{10^{p_{ka}-pH}}; \quad (6)$$

$$NH_{3_{total}} = \frac{\alpha^2}{K_b} + \alpha; \quad (7)$$

$$p_{ka} = 0{,}0901821 + \frac{2729{,}92}{T_c + 273{,}2}. \quad (8)$$

donde T_c es la temperatura del cuerpo de agua, en $°C$, $\alpha = 10^{pOH-pH}$, K_b es la constante de equilibrio con magnitud de $1{,}8x10^{-5}$ y PM_{NH3}; PM_{NH_4} corresponden al peso molecular, en gr/mol, de la amonia sin ionizar y amoniaco, respectivamente.

2.3 Identificación de la tasa de alimentación

Como etapa previa a la simulación, se requiere identificar la magnitud o vector de tasa de alimentación de pellet hacia el cuerpo de agua. Para ésto, se eligieron tres estrategias de trabajo:

- Valores constantes de alimentación durante el proceso de crianza. De las propuestas disponibles se eligió el reportado por Zafra and Trelles (2019), quienes evaluaron un sistema de crianza y control de parámetros semejante a Mena (2001).
- Dado que el modelo matemático de Ursin (1957) es de naturaleza no lineal, se empleó el método de Levenberg- Marquard (LMA) está diseñado para la minimización del error de medición en sistemas no lineales Coleman (1984). Esta estrategia propuesta por Gauss-Newton emplea la solución del vector Jacobiano J en lugar de la linealización del sistema empleando una solución inicial δ a través de una expansión por series de Taylor, es decir:

$$min(f(x)) = \sum (y_i - \hat{y})^2 = \sum_a^b (y_i - f(x_i + \beta) - J_i * \delta)^2; \quad (9)$$

donde y_i, $\bar{x}$ es la magnitud de cada datos experimental y su media, respectivamente. Mientras que, $f(x_i)$ corresponde a la ecuación de regresión que describe a los datos experimentales Coleman (1991).
- El método de método de mínimos cuadrados (Ec. 10 tiene por objetivo identificar la "*mejor*" solución de las ecuaciones. Su funcionamiento se basa en el cálculo de la suma de los cuadrados de los errores entre los valores predichos y los experimentales.

$$min(f(x)) = \sum (y_i - \hat{y})^2 = \sum_a^b (y_i - f(x_i))^2. \quad (10)$$

donde y_i, $\bar{x}$ es la magnitud de cada datos experimental y su media, respectivamente. Mientras que, $f(x_i)$ corresponde a la ecuación de regresión que describe a los datos experimentales Coleman (1991). Esta estrategia requiere baja demanda de cómputo, no obstante ha mostrado bajo desempeño en sistemas no lineales.

2.4 Propuesta de método de mínimos cuadrados basado en criterios de penalización

Debido a que la exactitud de los modelos numéricos integrados a partir del método de Runge-Kutta dependen de la magnitud del tamaño de paso y a que los datos obtenidos a partir del trabajo de Mena (2001) fueron reportados a intervalos de 14 días, resultaba conveniente el contar con una fórmula de aproximación que reprodujera los datos y que, simultáneamente, permitiera calcular valores de menor

Con este propósito utilizamos el método de mínimos cuadrados para buscar un modelo polinomial que pudiera ajustarse adecuadamente a los datos. Dicho método se basa en resolver la ecuación matricial:

$$\begin{pmatrix} \mathrm{n} & \sum_{i=1}^n t_i & \dots & \sum_{i=1}^n t_i^n \\ \sum_{i=1}^n t_i & \sum_{i=1}^n t_i^2 & \dots & \sum_{i=1}^{n+1} t_i^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n t^{n+1} i & \sum_{i=1}^n t_i^{n+2} & \dots & \sum_{i=1}^{n+1} t_i^{2n} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathrm{c}_0 \\ \mathrm{c}_1 \\ \vdots \\ \mathrm{c}_{n-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n y_i t_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n y_i t_i^{n-1}. \end{pmatrix}$$

ISSN en trámite

para calcular las componentes del vector de constantes $(c_1, c_2...c_n)$ que al sustituirse en el polinomio

$$y(t) = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + .. + c_n t^n \tag{11}$$

minimizan el error absoluto entre los datos el modelo de ajuste. La bondad de ajuste del modelo polinomial se evalua mediante el coeficiente

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - y(t_i))}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})}. \tag{12}$$

si el valor de R es cercano a 1 significa que el ajuste reproduce adecuadamente los datos. En el caso presente, econtramos que los datos puede aproximarse con el polinomio de tercer orden

$$y(t) = 22{,}197 + 2{,}297t - 0{,}01t^2 + 0{,}00011t^3, \tag{13}$$

el cual corresponde a $R^2 = 0{,}994$. Este polinomio se utilizó como referencia para los modelos de optimización.

Para obtener el modelo de optimización basado en el método de mínimos cuadrados, se resolvió la ecuación diferencial de Yang et al. (2001), dejando fijos todos los parámetros de interés, a excepción del que se toma como variable de control (e.g., la ración diaria r"). Se creó un vector que valores discretos crecientes para la variable de control y se integró la ecuación de Yi (1998) para cada uno de estos valores discretos. Por ejemplo, para r se creó un vector de valores que inicia en r=0.1 hasta r=3, a intervalos de 0.1 y se integró la ecuación diferencial del Yang desde t=1 hasta t=157. Esto permitió crear una matriz de valores numéricos W_{ij} en la que cada componente representa el peso estimado por la solución a la ecuación de Yi (1998), calculado tomando un valor fijo para la variable de control, y en la que los índices $i \in [1, 30]$ y $j \in [1, 157]$ hacen referencia a valores específicos para la variable de control y el tiempo. A partir de esta matriz se definió la matriz de errores:

$$E_{ij} = \left| W_{ij} - y_{(i)}(t_j) \right|. \tag{14}$$

Esta matriz de error sirvió como función objetivo, permitiendo la búsqueda de los valores de r que minimizaran el error para cada valor de tiempo. A partir de esta búsqueda se obtuvo un vector de valores de r que, al sustituirse en la ecuación diferencial de Yang et al. e integrar mediante el método de Runge-Kutta para un valor específico de t, reportan el error mas pequeño respecto a la estimacióndel polinomio de orden 3. Así mismo, se agregó una condición de penalización en la que si el peso estimado, para un valor específico de t, varía en mas del 10 % respecto al peso calculado a partir del polinomio de orden 3, el valor de r utilizado para el siguiente paso se aumenta (o reduce) en un 20 %.

3. RESULTADOS

3.1 Datos experimentales

Al disponer del modelo matemático que describe la ganancia de peso (Ec. 1 - 4), datos experimentales (Ec. 5 - 8) y estrategias para identificar la tasa de alimentación (Ec. 9 y 10). Se procedió a la las simulaciones numéricas en una computadora portátil MacBook Air con un procesador i5. Se empleó el software de libre acceso Octave GNU v5.2.0 para la programación del modelo matemático y su solución numérica a través del método de Runge-Kutta de cuarto orden con $\Delta t = 1$. La Tabla 1 muestran los parámetros medioambientales normalizados y la ganancia de peso de la tilapia reportados por Mena (2001).

Tiempo (días)	τ	δ	ν	Peso ganado (gr)
7	0.92	0.78	1	43.67
21	0.93	0.78	1	68.13
35	0.94	0.78	1	83.83
49	0.93	0.77	1	129.90
63	0.95	0.77	1	137.34
77	0.95	0.77	1	216.21
91	0.96	0.76	1	228.70
115	0.96	0.76	1	315.19
129	0.97	0.76	1	363.68
143	0.97	0.76	1	484
157	0.98	0.75	1	550

3.2 Vector de alimentación identificado por el método de mínimos cuadrados con criterios de penalización vs Levenberg- Marquard

A partir los parámetros medioambientales (τ, δ, ν) de la Tabla 1, se procedió a la generación de las trayectorias de la tasa de alimentación empleando los métodos LMA y MCP. Para lograrlo se requirió localizar la magnitud de r"que será empleada como vector semilla. La Figura 1 muestra la ganancia de peso tomando la tasa de alimentación reportada en la literatura abierta Zafra and Trelles (2019) respecto a la identificada manualmente.

ISSN en trámite

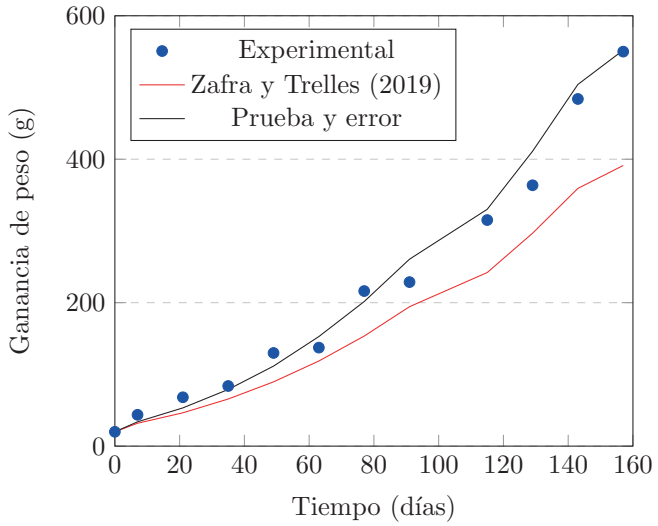


Figura 1. Identificación del vector semilla del LMA y MCP.

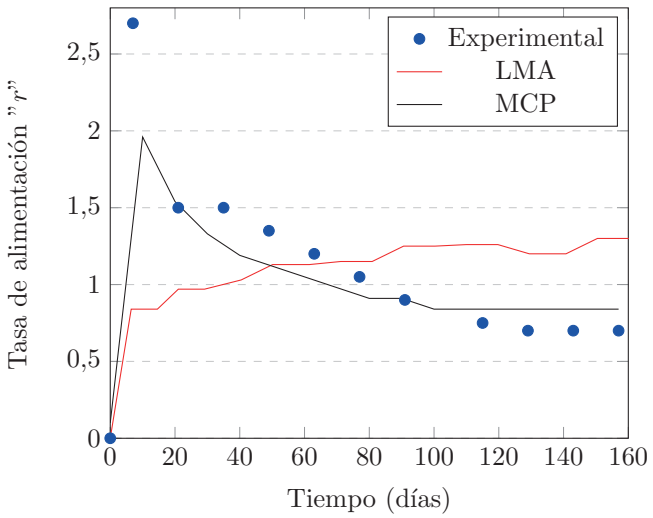


Figura 2. Tasa de alimentación identificado por el proceso experimental vs LMP y MCP.

La Figura 1 reporta la tasa de ganancia de peso de la tilapia durante 157 días bajo un régimen de alimentación constante. Se observa que la magnitud de $r = 1{,}39$ propuesta por Zafra y Trelles (2019) alcanza un peso máximo de 396 gr, casi 150 gr de diferencia respecto al peso final deseado. Por otro lado, la identificación de la tasa de alimentación a prueba y error se identificó que la magnitud de $r = 1{,}65$ muestra una trayectoria análoga a los valores experimentales y, al concluir el periodo de crianza; alcanza el peso deseado.

3.3 Desempeño de métodos de mínimos cuadrados con criterios de penalización vs Levenberg- Marquard

Al disponer con la magnitud del vector semilla, se realizó la simulación numérica para identificar la tasa de alimentación "r" en función del tiempo de los métodos LMA y MCP, estas trayectorias se muestran en la Figura 2.

La Figura 2 muestra que los datos experimentales y MCP se observa una sobrealimentación en etapas tempranas de la crianza de 2.7 y 1.98 veces el peso del especimen acuático ("r"), posteriormente desciende hasta alcanzar un mínimo de 0.7 y 0.8 veces el peso de la tilapia, respectivamente. Mientras que, LMA muestra una trayectoria de saturación de alimentación con un máximo de 1.4 r".

Identificada la tasa de alimentación en ambos métodos de mínimos cuadrados, se procedió a la simulación numérico de la ganancia de peso en condiciones medioamabientales reales, empleado los parámetros de calidad de agua normalizados de la Tabla 1.

La Figura 3 muestra las trayectorias de ganancia de peso de los datos experimentales respecto a los obtenidos por LMA y MCP en condiciones mediambientales reales. Al evaluar el desempeño de LMA se empalman con los datos experimentales. Mientras que, MCP se observa una

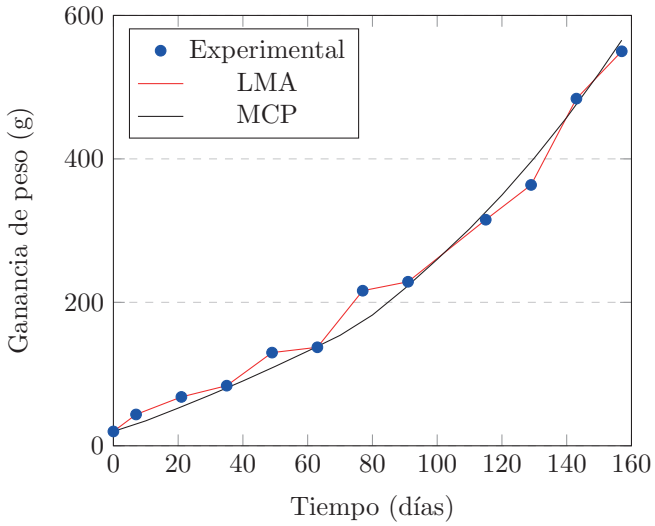


Figura 3. Desempeño de métodos LMA vs MCP bajo condiciones medioamientales variables.

oscilacion descendente los primeros 100 días y ascendente posteriormente, alcanzando el peso deseado al finalizar la crianza de tilapia a los 157 días.

Para concluir este estudio, se realizó un diagrama de contorno (Figura 4), que permitirá identificar el efecto de dos variables de entrada o control (tasa de alimentación y tiempo) respecto a la variable de salida que corresponde a la ganancia de peso.

ISSN en trámite

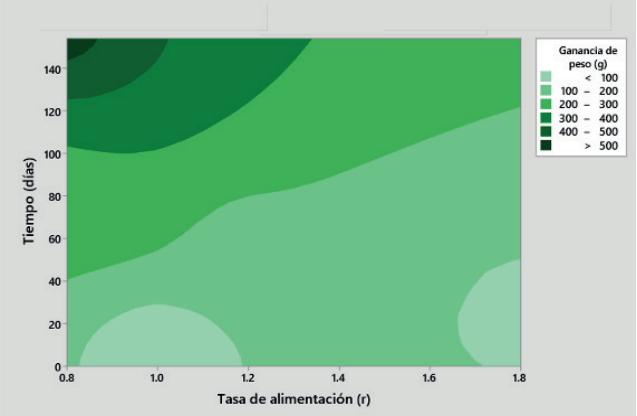


Figura 4. Diagrama de contorno que asocia la tasa de alimentación, el tiempo de crianza y ganancia de peso de tilapia.

La Figura 4 muestra el diagrama de contorno de la relación de tasa de alimentación (eje horizontal) y tiempo (eje vertical) respecto a la ganancia de peso de la tilapia (zonas de colores). Se observa que al inicio de la crianza, delimitada por la primer zona, la tasa de alimentación de $r = 1$ hasta $r = 1{,}8$, por lo cual el crecimiento de los especímenes, aumenta drásticamente, en la segunda y la tercera zona, el crecimiento se dio de manera uniforme y en las últimas zonas, la tasa de alimentación fue de $r = 0{,}8$, lo cual reflejó una disminución de la ganancia de peso, respecto a las otras zonas.

4. CONCLUSIÓN

Este trabajo se reporta el modelado numérico del proceso de crianza de tilapia, in situ, empleado en la identificación de la tasa de alimentación de pellet a través del método de mínimos cuadrados con criterios de penalización (MCP) basados en un vector semilla obtenido a prueba y error. El desempeño de MCP se validó respecto al método Levenberg- Marquard (LMA). Las trayectorias de ganancia de peso obtenidas mostraron que ambos métodos alcanzan la máxima ganancia de peso al finalizar la crianza de tilapia. A pesar que LMA mostró mayor desempeño, se requiere alta demanda de cómputo respecto a la actual propuesta.

De acuerdo al diagrama de contorno se observó la estrecha relación de la tasa de alimentación y la ganancia en peso; donde una buena administración del alimento es indispensable para el correcto crecimiento de las tilapias.

Como trabajo a futuro se pretende evaluar la concentración de proteínas contenidas en los pellets, su relación con los parámetros fisicoquímicos y efecto en la ganancia de peso de tilapia.

REFERENCIAS

Aguilar, V. (2014). *Efecto de la salinidad en la tasa de reducción de amonio aplicando zeolitas comerciales.* Universidad de Machala, Machala, Ecuador.

Bautista, J. y Ruiz, R. (2007). alidad de agua para el cultivo de tilapia en tanques de geomembrana. *Revista Fuente*, 3, 10–14.

Boyd, C. (1998). *Pond aquaculture water quality management.* Kluwer Academic Publishers, Massachusetts, USA.

Brett J. y Gloves, T. (1797). *Physiological energetics, in Fish Physiology.* W.S. Hoar, D.J. Randall and J.R. Brett), New, York, USA.

Chang, R. (2010). *Química.* Mc. Graw Hll, Cuidad de México, México.

CNA (2015). *Instituto Nacional de Pesca; Carta Nacional Acuícola.* Cuidad de México, México.

Coleman, T. (1984). *Large sparse numerical optimization.* Springer-Verlag, Munich, Alemania.

Coleman, T. (1991). *Una introducción a la teoría de mediciones y al diseño de experimentos.* Pearson Prentice, CDMX, México.

Conapesca (2003). *Anuario Estadístico de Pesca, 2003.* Cuidad de México, México.

Cuenco, M. Stickney R. y Grant, M. (1985). Fish bioenergetics and growth in aquaculture ponds: Individual model development. *Ecological Modelling*, 27, 169—190.

FAO (2010). *A strategic assessment of the potential for freshwater fish farming in Latin Americ.* New York, USA.

FAO (2021). *Documento Técnico de Pesca.* Cuidad de México, México.

Fernández, A. and Schenone, M. (2010). Calidad de agua para la producción de especies animales tradicionales y no tradicionales en argentina. *AUGMDOMUS*, 1, 45—66.

Hanna, I. (2020). *Manual de instrucciones HI4101, Electrodo de Ion Selectivo de Amoniaco.* Cuidad de México, México.

Mena, A. (2001). Relación entre la gasometría y las variables productivas de la tilapia roja (híbrida) Oreochromis Niloticus (linnaeus) x Oreochromis Mossambicus (Peters), durante la adaptación y cultivo a diferentes salinidades, Universidad de Colima, México.

SEGOB (2021). *Secretaria de Gobernación; Tercer Informe de Gobierno.* Cuidad de México, México.

SENASICA (2008). *Situación zoosanitaria nacional 2008.* Cuidad de México, México.

Ursin, E. (1957). A mathematical model of some aspects of fish growth, respiration, and mortality,. *ournal of the Fisheries Research Board of Canada*, 24, 2355—2363.

von Bertalanffy, L. (1938). A quantitative theory of organic growth (inquires on growth iasw ii). *Hum. Biol*, 10, 181—213.

Yi, Y. (1998). A bioenergetics growth model for nile tilapia (oreochromis niloticus) based on limiting nutrients and fish standing crop in fertilized ponds,. *Aquacultural Engineering*, 18, 157—173.

Zafra, A. and Trelles, M. (2019). Conversión y eficiencia alimenticia de oreochromis aureus var. suprema (cichlidae) con diferente alimento balanceado en sistema cerrado. *Arnaldoa*, 2, 815—926.

ISSN en trámite

Detección automática de delitos en sistemas de videovigilancia: una Revisión Sistemática de la Literatura

Félix Cortés Ramírez, Nimrod González Franco, Dante Mújica Vargas, Juan Gabriel González Serna, Raúl Pinto Elías

Departamento de Ciencias de la Computación, TecNM/CENIDET, Morelos 62490, México;
m21ce006@cenidet.tecnm.mx(F.C.R); nimrod.gf@cenidet.tecnm.mx (N.G.F); dante.mv@cenidet.tecnm.mx (D.M.V); Gabriel.gs@cenidet.tecnm.mx (G.G.S); raul.pe@cenidet.tecnm.mx (R.P.E)

Resumen: Una Revisión Sistemática de la Literatura (RSL), proporciona información cuantitativa y cualitativa sobre la investigación de algún tema en específico, detallando sobre conceptos utilizados durante la investigación como son: bases de datos, palabras clave utilizadas, resultados, etc. En este artículo, se presentará una revisión sistemática sobre el tema de Detección Automática de delitos en sistemas de videovigilancia mediante técnicas de aprendizaje profundo.

Palabras clave: Videovigilancia, detección de crimen, aprendizaje profundo, redes neuronales, robo.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la detección de crimen [1 – 4] es uno de los problemas que sigue afectando a muchos países en diferentes aspectos; a pesar de que existen sistemas [5, 6] de videovigilancia [7–10] que tienen como propósito la detección en tiempo real [11] y lograr manejar de manera eficiente un acto de crimen [12], estas no han logrado obtener buenos resultados, dado que dichos sistemas son monitoreados [13] por un humano [14], y esto a su vez genera ineficiencia en algunas ocasiones, por lo tanto, no se cumple el objetivo que es la detección de crimen.

Por otro lado, la detección [15] de crimen resulta difícil [9], dado que no hay un patrón [16] o algún método [17] que haga eficiente este proceso, además, los movimientos [18] antes del crimen [19] cada vez son cambiantes y esta razón hace que sea un verdadero reto, además, por otro lado se encuentran los problemas de alta, baja iluminación y el desenfoque de las cámaras de seguridad [6 -7], [11], los cuáles generan problemas para la visualización correcta de escenas de crimen.

Las Revisiones Sistemáticas de la Literatura (RSL) son importantes para lectores que desean realizar una búsqueda rápida sobre algún tema en específico, por lo que, ayudan a conocer sobre fuentes de consulta, técnicas de búsqueda y selección de la información, además hacen mención sobre la cantidad de información que existe sobre el tema.

En esta Revisión Sistemática, se mencionará sobre una amplia investigación de los trabajos relacionados con la detección de crimen en sistemas de videovigilancia usando aprendizaje profundo, así como las técnicas utilizadas para la obtención de información y los resultados finales.

El objetivo que se siguió en esta investigación fue conocer el estado del arte sobre el diseño, la implementación y la evaluación de un modelo de aprendizaje profundo para el reconocimiento de crímenes, además, se usó como pregunta principal de investigación la siguiente:

- PI: ¿Cuáles son las técnicas utilizadas actualmente en sistemas de videovigilancia para la detección de crimen?

Los materiales y métodos usados en la RSL se describen en la sección 2 del artículo, mientras que los resultados obtenidos se presentan en la sección 3. Finalmente, la sección 4 presenta las conclusiones derivadas de la revisión.

2.MATERIALES Y MÉTODOS

En toda investigación científica es indispensable la utilización de algún método y/o material de estudio, y para el presente trabajo se utilizaron técnicas de cribado para reducir el sesgo de información, criterios de inclusión y exclusión de artículos, los cuáles de dan a conocer en esta sección.

2.1 Criterios para la selección de información

Para la selección de información, se utilizaron criterios de inclusión y exclusión, los cuáles fueron de gran importancia por el hecho de que el volumen de información relacionada fue impresionante, y con la aplicación de estos criterios, hubo una reducción considerable del mismo, lo cual benefició a obtener información más relacionada al tema de estudio. Los criterios para la inclusión de trabajos fueron cinco:

- Trabajos con menos de 5 años de antigüedad.
- Trabajos redactados en idioma español e inglés.
- Considerar solo artículos científicos y libros.

ISSN en trámite

- Trabajos enfocados estrictamente al tema y palabras clave.
- Trabajos relacionados en el área de Ciencias de la Computación.

2.2 Fuentes de consulta

Por la relación de su contenido con el tema que se está trabajando, para esta RSL se utilizaron las siguientes bases de datos como fuentes de consulta: Google Académico, IEEExplore, ScienceDirect, MDPI, SpringerLink y arXiv.

2.3. Filtros de búsqueda de información

En los filtros de información, se utilizaron diferentes combinaciones de palabras clave utilizando como conectores principales el *and* y el *or*. En la Tabla 1 se muestran las cadenas de búsqueda utilizadas; cabe resaltar que, para obtener mayor número de información, se manejaron las palabras claves en el idioma inglés, por ser uno de los idiomas más utilizado a nivel mundial.

Tabla 1. Cadenas de búsqueda

No.	Cadena de búsqueda
1	*video surveillance and crime detection and deep learning and neural networks and human behavior*
2	*video surveillance and crime detection and deep learning and human behavior*
3	*video surveillance and crime detection and human behavior*
4	*video surveillance and crime detection or deep learning or neural networks or human behavior*
5	*video surveillance or crime detection or deep learning* or neural networks or human behavior

2.4 Estrategia de búsqueda electrónica

Las cadenas de búsqueda fueron introducidas en los buscadores de las fuentes de consulta seleccionadas, obteniendo los resultados presentados en la Tabla 2.

Como se puede observar, las cadenas de búsqueda con el operador *or* arrojó más resultados, sin embargo, al analizar los trabajos recuperados se pudo percartar que con el operador *and,* los trabajos encontrados se acercaban más al tema de estudio. Además, Google Académico reflejó una duferencia muy alta comparado con las otras bases de datos, lo cual se debe a que ésta fuente considera los registros de las demás, así como patentes, libros y otros repositorios. Luego de aplicar los criterios de inclusión la cantidad de trabajos recuperados se redujo a 23,228, además de que se obtuvieron 19,800 trabajos de otras fuentes.

Tabla 2. Total de artículos recuperados de las fuentes de consulta antes de aplicar las técnicas de cribado

No. de cadena	Google Académico	IEEExplore	Science Direct	MDPI	Springer Link	axXiv
1	19600	2	184	0	991	0
2	28600	2	352	0	1598	0
3	41600	13	1029	0	2630	2
4	18500	2	184	1	3184	0
5	16900	2	184	296	22746	0

2.5 Proceso de selección de los trabajos

La selección de trabajos se realizó conforme a las etapas representadas en la Figura 1, en la cual se muestra de manera cuantitativa los artículos obtenidos en cada etapa. Como puede apreciarse, en la etapa de identificación se contabilizó por separado los trabajos encontrados directamente de bases de datos, y por otro lado los que se obtuvieron de motores de búsqueda. Luego, en la etapa de cribado se descartaron los trabajos duplicados y aquellos que no cumplían con los criterios de cribado. Al llegar a la etapa de idoneidad aún se tenía un número significativo de trabajos, por lo que se realizó una revisión rápida leyendo el título, y en caso de no encontrar suficiente información, se le dio lectura al resumen, y de esta manera, en la etapa de inclusión se logró identificar 32 artículos relacionados con el tema de estudio.

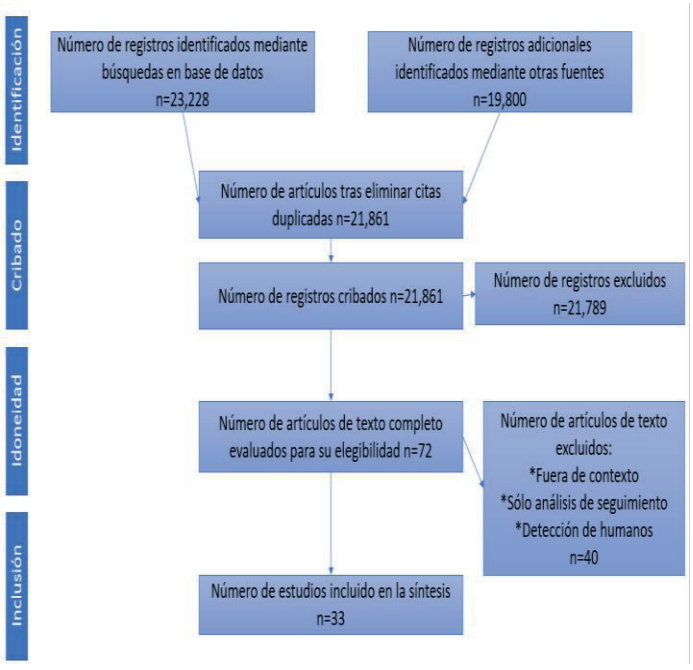


Figura 1. Diagrama de flujo para selección de artículos

ISSN en trámite

3. RESULTADOS

Como se puede apreciar en la Figura 2, el 2020 fue el año en el que se publicó la mayor cantidad de artículos seleccionados, seguido muy de cerca por el 2021, año actualmente en curso, por lo que consideramos que el tema esta siendo trabajado cada vez más.

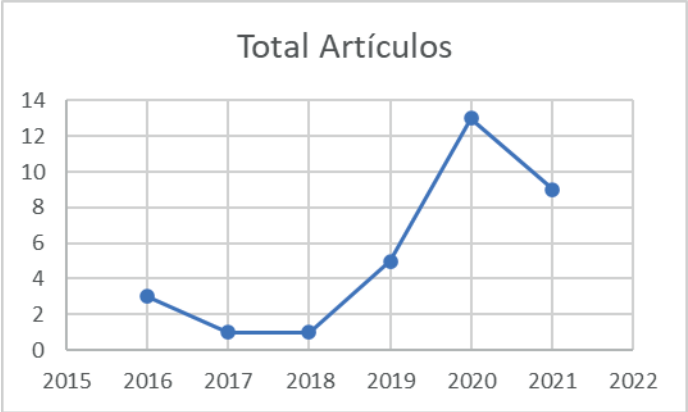


Figura 2. Artículos seleccionados agrupados por el año de publicación.

Tras la lectura de los 32 trabajos seleccionados y a pesar de que en su mayoría presentan buenos resultados, se notó que 9 de ellos presentan de manera precisa, información altamente valiosa para cumplir el objetivo de esta investigación, como se mencionó en la sección introductoria, fue conocer el estado del arte sobre el diseño, la implementación y la evaluación de un modelo de aprendizaje profundo para el reconocimiento de crímenes. Las características más relevantes de estos 9 artículos científicos se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Artículos destacados de la RSL

Ref.	*Dataset* utilizado	Temática	Resultados
[20]	13164 imágenes de 1360 peatones de seis cámaras de vigilancia y se amplía agregando 933 imágenes de 107 peatones.	Modelo semántico: Descripción Estructural de Video (VSD) para representar y organizar el contenido en videos.	80% de precisión
[21]	*Avenue*: tiene 16 videos de entrenamiento y 21 de prueba, 30,652 imágenes en total. Tiene 47 eventos anormales con resolución de 360 × 640 píxeles.	Reconocimiento de anomalías basado en una red neuronal convolucional liviana (CNN) eficiente y funcional en un entorno de vigilancia con una complejidad de tiempo reducida	99% de precisión

Tabla 3. Artículos destacados de la RSL (continuación)

Ref.	*Dataset* utilizado	Temática	Resultados
[22]	UMN: (11 videos capturados en césped, cuadrado e interior. Contiene partes normales de personas que caminan con indiferencia, seguidas de eventos anormales de personas que huyen del pánico. Tamaño de fotogramas de 320 × 240 píxeles) CAVIAR: incluye personas que caminan, se encuentran, compran y pelean. El tamaño de los fotogramas es de 384 × 288 píxeles) La Web: (incluye 8 clips de comportamiento anormal, pánico, protesta y peleas y 12 clips de comportamiento normal, caminar y maratón)	Método de reconocimiento de comportamiento anormal basado en 3D-CNN y *Long Short-Term Memory* (LSTM)	99.5% de precisión con UMN, 97.4% de precisión con CAVIAR, 92.6% de precisión con Web.
[23]	300 videos HD, con resolución de 1920x1080, fps. Todos los videos con 200 fotogramas c/u.	Método de reconocimiento de conductas sospechosas en vectores de movimiento. 3D *Convolutional Neural Network*, SVM	91.7% de precisión
[24]	*Hockey Fight*: tiene videos de 500 peleas y 500 no peleas *Crowd Violence*: tiene 246 videos de escenas de violencia en multitudes (123 videos violentos y 123 no violentos)	Propuesta de Red Neuronal Convolucional 3D para detectar de manera efectiva peleas, movimientos agresivos y escenas de violencia en transmisiones de video en vivo.	98.51 % de precisión en *Hockey Fight* y 99.29 % de precisión en *Crowd Violence*

ISSN en trámite

Tabla 3. Artículos destacados de la RSL (continuación)

Ref.	*Dataset* utilizado	Temática	Resultados
[25]	*UCF-Crime* (1.900 videos, 128 horas en total, se dividen en 13 anomalías (abuso, robo, peleas, etc.) de importancia para la seguridad pública), VOC (11, 530 imágenes con 27, 450 objetos anotados, que se dividen en 20 subclases.)	Diseño de una red neuronal ligera y rápida de comprensión de anomalías. Desarrollo de un modelo LSTM espacio temporal basado en las características de series de tiempo estructuradas y tensorizadas, que son extraídas de videos de vigilancia	78.75% de AUC
[26]	*Dataset UCF-Crime* (1900 videos, 13 clases, tamaño de imágenes 240x320 px) y 203 películas (2 clases, de 240x320 px)	Método eficiente de detección de delitos utilizando Deep Learning, que se puede utilizar en dispositivos seguimiento de la delincuencia. Uso de RNN, LSTM.	91.3% de precisión
[27]	CUHK Avenue: contiene 16 videos de entrenamiento y 21 de prueba con un total de 47 eventos anormales, arrojar objetos, holgazanear y correr. *ShanghaiTech*: contiene detección de anomalías extremadamente desafiante. Contiene 330 videos de entrenamiento y 107 de prueba con 130 eventos anormales. Consta de un total de 13 escenas y varios tipos de anomalías.	Enfoque sobre predicción del comportamiento anormal utilizando redes generativas adversarias (GAN)	60.47 % de precisión en CUHK avenue y 88.27 % de precisión en ShanghaiTech

Tabla 3. Artículos destacados de la RSL (continuación)

Ref.	*Dataset* utilizado	Temática	Resultados
[28]	UCF-Crime (1.900 videos, 128 horas en total, que se dividen en 13 anomalías del mundo real (abuso, robo, robo, peleas, etc.) de importancia para la seguridad pública), VOC (11, 530 imágenes con 27, 450 objetos anotados, que se dividen en 20 subclases.)	Un enfoque simple pero efectivo para aprender características espacio-temporales utilizando redes convolucionales tridimensionales profundas	82% AUC

4. CONCLUSIONES

En conclusión, durante esta investigación se logró identificar gran cantidad de artículos relacionados con el tema de sistemas de videovigilancia para la detección de crimen, cabe resaltar que en sus particularidades cada trabajo demuestra que es un área con gran complejidad, por el hecho de que la detección del comportamiento humano es cambiante día a día, incluso para un humano es difícil predecir el comportamiento de una persona.

De manera concreta, los principales hallazgos de la RSL fueron los siguientes:

El dataset más utilizado es el UCF-Crime, el cual contiene un conjunto de datos a gran escala de 128 horas de videos. Consiste en 1900 videos de vigilancia del mundo real, con 13 anomalías realistas que incluyen abuso, arresto, incendio premeditado, asalto, accidente de tránsito, explosión, peleas, robo, tiroteo, hurto en tiendas y vandalismo.

Normalmente, el UCF-Crime sirve para dos tareas, siendo la primera la detección de anomalías generales considerando todas las anomalías en un grupo y todas las actividades normales en otro grupo. En segundo lugar, se usa para reconocer cada una de las 13 actividades anómalas que en él se presentan.

La técnica de aprendizaje profundo más utilizado en los trabajos es la Red Neuronal Convolucional 3D.

Los autores con más trabajos sobre el tema son: Guillermo Arturo Martínez Mascorro [1–4] y Hugo Terashima Marín [1, 2, 4], quienes trabajaron sobre un método de extracción de características en videos [4] y un método de entrenamiento [1] para el reconocimiento de comportamiento sospechosos y violento, así como en el modelado del comportamiento

ISSN en trámite

sospechoso de crimen [3] y el comportamiento previo al crimen [2].

Con esta investigación, se da respuesta a la pregunta de investigación sobre las nuevas técnicas utilizadas para la detección de crimen en sistemas de videovigilancia.

REFERENCIAS

[1] G. A. Martínez-Mascorro, J. C. Ortiz-Bayliss, and H. Terashima-Marín, "Detecting Suspicious Behavior: How to Deal with Visual Similarity through Neural Networks," pp. 1–9, 2020, [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/2007.15235.

[2] G. A. Martinez-Mascorro, J. Carlos Ortiz-Bayliss, and H. Terashima-Marin, "Detecting suspicious behavior on surveillance videos: Dealing with visual behavior similarity between bystanders and offenders," *2020 Ieee Andescon, Andescon 2020*, 2020, doi: 10.1109/ANDESCON50619.2020.9272175.

[3] G. A. Martínez-Mascorro, J. R. Abreu-Pederzini, J. C. Ortiz-Bayliss, and H. Terashima-Marín, "Suspicious Behavior Detection on Shoplifting Cases for Crime Prevention by Using 3D Convolutional Neural Networks," pp. 1–12, 2020, doi: 10.3390/computation9020024.

[4] G. A. Martínez-Mascorro, J. R. Abreu-Pederzini, J. C. Ortiz-Bayliss, A. Garcia-Collantes, and H. Terashima-Marín, "Criminal Intention Detection at Early Stages of Shoplifting Cases by Using 3D Convolutional Neural Networks," *Computation*, vol. 9, no. 2, p. 24, 2021, doi: 10.3390/computation9020024.

[5] C. Jyotsna and J. Amudha, "Detection from Surveillance Video," *ICIMIA 2020 IEEE Int. Conf. Innov. Mech. Ind. Appl.*, no. Icimia, pp. 335–339, 2020.

[6] N. Nasaruddin, K. Muchtar, A. Afdhal, and A. P. J. Dwiyantoro, "Deep anomaly detection through visual attention in surveillance videos," *J. Big Data*, vol. 7, no. 1, 2020, doi: 10.1186/s40537-020-00365-y.

[7] A. Castillo, S. Tabik, F. Pérez, R. Olmos, and F. Herrera, "Brightness guided preprocessing for automatic cold steel weapon detection in surveillance videos with deep learning," *Neurocomputing*, vol. 330, pp. 151–161, 2019, doi: 10.1016/j.neucom.2018.10.076.

[8] R. Halder and R. Chatterjee, "CNN-BiLSTM Model for Violence Detection in Smart Surveillance," *SN Comput. Sci.*, vol. 1, no. 4, 2020, doi: 10.1007/s42979-020-00207-x.

[9] D. Roy and K. M. C., "Snatch theft detection in unconstrained surveillance videos using action attribute modelling," *Pattern Recognit. Lett.*, vol. 108, pp. 56–61, 2018, doi: 10.1016/j.patrec.2018.03.004.

[10] K. Doshi and Y. Yilmaz, "Online anomaly detection in surveillance videos with asymptotic bound on false alarm rate," *Pattern Recognit.*, vol. 114, p. 107865, 2021, doi: 10.1016/j.patcog.2021.107865.

[11] V. Singh, S. Singh, and P. Gupta, "Real-Time Anomaly Recognition Through CCTV Using Neural Networks," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 173, no. 2019, pp. 254–263, 2020, doi: 10.1016/j.procs.2020.06.030.

[12] N. Shah, N. Bhagat, and M. Shah, "Crime forecasting: a machine learning and computer vision approach to crime prediction and prevention," *Vis. Comput. Ind. Biomed. Art*, vol. 4, no. 1, 2021, doi: 10.1186/s42492-021-00075-z.

[13] C. S. Sung and J. Y. Park, "Design of an intelligent video surveillance system for crime prevention: applying deep learning technology," *Multimed. Tools Appl.*, 2021, doi: 10.1007/s11042-021-10809-z.

[14] F. Serpush and M. Rezaei, "Complex Human Action Recognition Using a Hierarchical Feature Reduction and Deep Learning-Based Method," *SN Comput. Sci.*, vol. 2, no. 2, pp. 1–15, 2021, doi: 10.1007/s42979-021-00484-0.

[15] S. Loganathan, G. Kariyawasam, and P. Sumathipala, "Suspicious Activity Detection in Surveillance Footage," *2019 Int. Conf. Electr. Comput. Technol. Appl. ICECTA 2019*, pp. 1–4, 2019, doi: 10.1109/ICECTA48151.2019.8959600.

[16] R. S. Sidhu and M. Sharad, "Smart surveillance system for detecting interpersonal crime," *Int. Conf. Commun. Signal Process. ICCSP 2016*, pp. 2003–2007, 2016, doi: 10.1109/ICCSP.2016.7754524.

[17] H. Wei and N. Kehtarnavaz, "Semi-Supervised Faster RCNN-Based Person Detection and Load Classification for Far Field Video Surveillance," *Mach. Learn. Knowl. Extr.*, vol. 1, no. 3, pp. 756–767, 2019, doi: 10.3390/make1030044.

[18] H. Wei, M. Laszewski, and N. Kehtarnavaz, "Deep learning-based person detection and classification for far field video surveillance," *Proc. 2018 IEEE Dallas Circuits Syst. Conf. DCAS 2018*, pp. 1–4, 2019, doi: 10.1109/DCAS.2018.8620111.

ISSN en trámite

[19] T. Sultana and K. A. Wahid, "IoT-Guard: Event-Driven Fog-Based Video Surveillance System for Real-Time Security Management," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 134881–134894, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2941978.

[20] Z. Xu, C. Hu, and L. Mei, "Video structured description technology based intelligence analysis of surveillance videos for public security applications," *Multimed. Tools Appl.*, vol. 75, no. 19, pp. 12155–12172, 2016, doi: 10.1007/s11042-015-3112-5.

[21] W. Ullah, A. Ullah, T. Hussain, Z. A. Khan, and S. W. Baik, "An efficient anomaly recognition framework using an attention residual lstm in surveillance videos," *Sensors*, vol. 21, no. 8, 2021, doi: 10.3390/s21082811.

[22] Y. Guan, W. Hu, and X. Hu, "Abnormal behavior recognition using 3D-CNN combined with LSTM," *Multimed. Tools Appl.*, vol. 80, no. 12, pp. 18787–18801, 2021, doi: 10.1007/s11042-021-10667-9.

[23] C. Mu, J. Xie, W. Yan, T. Liu, and P. Li, "A fast recognition algorithm for suspicious behavior in high definition videos," *Multimed. Syst.*, vol. 22, no. 3, pp. 275–285, 2016, doi: 10.1007/s00530-015-0456-7.

[24] S. Accattoli, P. Sernani, N. Falcionelli, D. N. Mekuria, and A. F. Dragoni, "Violence Detection in Videos by Combining 3D Convolutional Neural Networks and Support Vector Machines," *Appl. Artif. Intell.*, vol. 34, no. 4, pp. 329–344, 2020, doi: 10.1080/08839514.2020.1723876.

[25] Y. Cheng *et al.*, "An Anomaly Comprehension Neural Network for Surveillance Videos on Terminal Devices," *Proc. 2020 Des. Autom. Test Eur. Conf. Exhib. DATE 2020*, pp. 1396–1401, 2020, doi: 10.23919/DATE48585.2020.9116533.

[26] S. V. Venkatesh, A. P. Anand, G. S. Sahar, A. Ramakrishnan, and V. Vijayaraghavan, "Real-time surveillance based crime detection for edge devices," *VISIGRAPP 2020 - Proc. 15th Int. Jt. Conf. Comput. Vision, Imaging Comput. Graph. Theory Appl.*, vol. 4, pp. 801–809, 2020, doi: 10.5220/0008990108010809.

[27] M. Emad, M. Ishack, M. Ahmed, M. Osama, M. Salah, and G. Khoriba, "Early-Anomaly Prediction in Surveillance Cameras for Security Applications," *2021 Int. Mobile, Intelligent, Ubiquitous Comput. Conf. MIUCC 2021*, pp. 124–128, 2021, doi: 10.1109/MIUCC52538.2021.9447668.

[28] R. Maqsood, U. I. Bajwa, G. Saleem, R. H. Raza, and M. W. Anwar, "Anomaly recognition from surveillance videos using 3D convolution neural network," *Multimed. Tools Appl.*, vol. 80, no. 12, pp. 18693–18716, 2021, doi: 10.1007/s11042-021-10570-3.

[29] S. Bouindour, M. M. Hittawe, S. Mahfouz, and H. Snoussi, "Abnormal event detection using convolutional neural networks and 1-class SVM classifier," *IET Semin. Dig.*, vol. 2017, no. 5, pp. 1–6, 2017, doi: 10.1049/ic.2017.0040.

[30] D. Zh Satybaldina, N. S. Glazyrina, K. A. Kalymova, and V. S. Stepanov, "Development of an algorithm for abnormal human behavior detection in intelligent video surveillance system," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1069, no. 1, p. 012046, 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1069/1/012046.

[31] R. Alfaifi and A. M. Artoli, "Human Action Prediction with 3D-CNN," *SN Comput. Sci.*, vol. 1, no. 5, pp. 1–15, 2020, doi: 10.1007/s42979-020-00293-x.

[32] A. Sharma and N. Varshney, "Identification and detection of abnormal human activities using deep learning techniques," *Eur. J. Mol. Clin. Med.*, vol. 7, no. 4, pp. 408–417, 2020.

[33] D. G. Shreyas, S. Raksha, and B. G. Prasad, "Implementation of an Anomalous Human Activity Recognition System," *SN Comput. Sci.*, vol. 1, no. 3, pp. 1–10, 2020, doi: 10.1007/s42979-020-00169-0.

[34] J. Amutharaj, G. Nayagam, D. Sobya, G. Ahila Poornima y P. Ramkumar, "Surveillance Automation for Detection and Identification of Human Behaviors". INDIA Patente 202041036283, 11 09 2020.

[35] A. Divya Vani, V. Keerthika y P. Manjula, "Frame Comparison and Detection of Undesired Action using Image Processing". India Patente 201841018453, 22 11 2019.

ISSN en trámite

Sistema de monitoreo de CO_2 y TVOC en espacios confinados, basado en una plataforma IoT

Ramón Chávez-Bracamontes*. Amany R. Gutiérrez-Magaña. *
Samuel A. Sepúlveda-Rubio*

**Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán, Av. Tecnológico # 100, CP. 49100, Cd. Guzmán, Jal., México (Tel: 3415752050; ramon.cb@cdguzman.tecnm.mx)*
{m20291049, m21290936}@cdguzman.tecnm.mx

Resumen: En el presente artículo se describe la implementación de un sistema de monitoreo inalámbrico para medir los niveles de dióxido de carbono (CO_2) y total de compuestos orgánicos volátiles (TVOC) en un ambiente confinado, debido a que estos gases en el ambiente pueden ser perjudiciales para la salud si se encuentran concentraciones del más del 20%, ya que un nivel normal de CO_2 que no afecte al sistema respiratorio es del 5.3% a nivel del mar. El empleo de la tecnología de Internet de las Cosas (IoT) facilita el monitoreo de las variables ambientales con el fin de que el usuario tenga acceso a la medición de forma remota a través de un dispositivo móvil.

Palabras clave: sensor CCS811, software, hardware, IoT, Sistema embebido ESP32

1. INTRODUCCIÓN

La mala calidad del aire en zonas urbanizadas se ha vuelto una preocupación mayor. De acuerdo con la OMS (Organización Mundial de la Salud, 2021) en 2019 más del 90% de la población mundial vivía en zonas en las que las concentraciones superaban los niveles de referencia fijados por la OMS en 2005. En un reporte de la OMS emitido en 2018 (Organización Mundial de la Salud, 2018) afirman que la contaminación es la causa de la muerte de 7 millones de personas cada año, por lo que las personas son cada vez más cautelosas al momento de estar en un lugar con mala calidad en el aire, siendo la casa, las escuelas, e incluso los automóviles en donde pasan la mayor parte del tiempo (S. Faiazuddin, 2020). Y no es ésta la única consecuencia de la mala calidad del aire que respiramos, sino que repercute muy negativamente en la productividad de la gente, incrementa los gastos médicos, afecta y daña el suelo, los cultivos, bosques, ríos y lagos.

En algunos países de Europa la calidad del aire ha mejorado en las últimas décadas gracias a su legislación y los avances tecnológicos, así como el progresivo abandono de los combustibles fósiles altamente contaminantes. Sin embargo, la calidad del aire en espacios interiores o confinados también requiere atención. La situación actual de la pandemia por COVID-19 con las recomendaciones de quedarnos en casa, a generado que cada vez pasemos más tiempo en nuestras casas y en el interior de los edificios. Aunque algunos de los contaminantes del aire en ambientes interiores proceden del exterior, lo cierto es que la mayor parte se liberan dentro del propio edificio. Esto es debido a las personas que habitan y circulan por él, al mismo tiempo se generan una mezcla de contaminantes muy diferentes por compuestos orgánicos desprendidos por el mobiliario, los materiales de construcción, al limpiar o quemar combustibles o por los animales domésticos. En cualquier caso, es indudable que los contaminantes del aire en espacios confinados pueden llegar a tener efectos adversos en la salud y por tanto será necesario conocer los elementos tóxicos que forman parte del aire que respiramos y los niveles de contaminación de la forma más aproximada posible en nuestro entorno.

Las normas de calidad del aire son un instrumento importante de manejo del riesgo y de las políticas ambientales, y cada país debe establecerlas para proteger la salud pública de sus ciudadanos. En octubre de 2005 la OMS emitió una actualización a la guía de calidad del aire (Organización Mundial de la Salud, 2005). En México las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) como la NOM-034-ECOL-1993, NOM-035-ECOL-1993, NOM-036-ECOL-1993, NOM-037-ECOL-1993 Y NOM-038-ECOL-1993, establecen los métodos de medición para determinar la concentración de elementos como el monóxido de carbono, las partículas suspendidas en el aire, el ozono, el bióxido de nitrógeno y el bióxido de azufre en el aire ambiente, así como los procedimientos para la calibración de los equipos de medición. El dióxido de nitrógeno, por ejemplo, es un producto de los procesos de combustión y generalmente se encuentra en la atmósfera íntimamente asociado con otros agentes contaminantes primarios como las partículas ultrafinas. Es también un precursor del ozono y por lo tanto coexiste en la contaminación con oxidantes de generación fotoquímica. El dióxido de nitrógeno es de por sí tóxico y sus concentraciones con frecuencia tienen una fuerte correlación con las de otros agentes contaminantes tóxicos.

ISSN en trámite

El formaldehido es un elemento que pertenece a los conocidos como compuestos orgánicos volátiles (COV). Se trata de forma específica por su amplio uso por parte de la industria, es posiblemente el compuesto químico orgánico con mayor producción mundial y es altamente inflamable y muy volátil. El material particulado se denomina a la mezcla de partículas líquidas y sólidas, de sustancias orgánicas e inorgánicas, que se encuentran en suspensión en el aire. Su composición es muy variada: desde sulfatos, nitrato, amoniaco, etc. y producen reacciones químicas en el aire. El CO_2 o dióxido de carbono es un gas incoloro e inodoro que forma parte de la naturaleza y no es realmente un tóxico, pero produce el desplazamiento del oxígeno y en concentraciones altas de más de 30,000 ppm, puede producir asfixia. Es un indicador fundamental para determinar la necesidad de renovación de aire. El NO_2 o dióxido de nitrógeno es un compuesto químico gaseoso tóxico e irritante. Se produce en los incendios forestales o erupciones volcánicas, aunque también de forma natural por la descomposición de nitratos orgánicos. La exposición continuada al NO_2 se relaciona con diversas enfermedades de las vías respiratorias. El SO_2 o dióxido de azufre es un gas incoloro, irritante, con un olor penetrante. La principal fuente de emisión de dióxido de azufre es la combustión de productos petrolíferos y la quema de carbón en centrales.

Gracias a los últimos avances tecnológicos disponemos hoy en día de dispositivos que nos permiten medir y controlar la calidad del aire interior a través de distintos tipos de sensores, sondas de calidad del aire y controles inteligentes. Algunos de los sensores más utilizados para evaluar la calidad del aire interior son los sensores de CO_2 que miden las partes por millón (ppm). Los más habituales son los sensores de CO_2 por infrarrojos que basan su funcionamiento en el principio de absorción de energía de los compuestos a una determinada longitud de onda. Los sensores de concentración de COV miden las sustancias químicas que contienen carbono y se hallan en la mayoría de los elementos vivos. Este tipo de sensores traducen la lectura realizada a equivalentes en partes por millón (ppm) para de esta forma seguir una referencia similar a los sensores CO_2. Los sensores de PM $_{2.5}$ evalúan las partículas finas en suspensión que son partículas que pueden tener origen muy diverso, pueden causar problemas respiratorios e incluso enfermedades cardiovasculares. Los sensores de humedad también denominados termohigrómetros miden la temperatura y la humedad relativa en un ambiente determinado. Su uso está muy extendido dada la incidencia de la humedad en la calidad del aire interior.

Tras un estudio científico en 2007, la agencia EPA (Protección del Medio Ambiente) concluyó que los gases de efecto invernadero contribuían a la contaminación del aire y amenazaban con poner en peligro la salud pública. Los resultados de este estudio revelaron que se identifican seis gases de efecto invernadero que son peligrosos para la salud, y entre ellos se encuentra en CO_2 (Dióxido de carbono) (Beningo, 2018). Por otro lado, se encuentra el total de compuestos orgánicos volátiles (TVOC), que son gases o vapores mezclado con carbono y que pueden contener hidrógeno, oxígeno, flúor, cloro, bromo, azufre o nitrógeno. Este tipo de compuestos son liberados por combustibles como la gasolina, madera, carbón incluso gas natural. El TVOC es un tipo de gas que tiene una significante relación con la salud humana y con calidad del aire. De acuerdo con (A. A. Widhowati, 2021), es necesario que se tenga un sistema de monitoreo que determine la concentración de TVOC en cierto espacio confinado.

Recientemente la tecnología del Internet de las Cosas (IoT) y el cómputo en la nube han facilitado el monitoreo en tiempo real de la calidad del aire y sus contaminantes. Según (Somayya Madakam, 2015), el IoT apunta a la transformación de unificar nuestro mundo en una estructura común, dando como resultado, el mantener la información del estado de las cosas. De acuerdo con (Garrido, 2015) la primera vez que se propuso el concepto de IoT fue en 1999, por Kevin Ashton, quien presentó un proyecto sobre sistemas de sensores e identificadores de radiofrecuencia. Al mismo tiempo, los sistemas electrónicos actuales, es especial los sistemas embebidos, se diseñan para realizar funciones específicas de procesamiento y control de señales provenientes de interfaces de entrada/salida que generalmente son alimentadas por señales de sensores en particular y actuadores sobre otros sistemas.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

Algunos de los trabajos recientes sobre la aplicación del IoT a los sistemas de monitoreo de la calidad del aire han sido reportados por autores como Preethichandra en 2013 quien reportó un sistema de monitoreo basado en comunicación Zigbee (D. M G P, 2013), Gaurav Rout et al. desarrollaron en 2018 un sistema de monitoreo de contaminación usando IoT (Gaurav Rout, 2018), (Liang Zhao, 2019) empleó múltiples interfaces de comunicación en la detección de la calidad del aire, Soto-Cordova presentó un prototipo de monitoreo de la calidad del aire de áreas urbanas basado en IoT (Martin M. Soto-Cordova, 2020), y JunHo Jo propuso una plataforma basada en la integración de la nube y el IoT para el monitoreo de la calidad del aire en interiores (JunHo Jo, 2020).

En este artículo se describe la metodología empleada en la implementación de sistema de monitoreo inalámbrico para las variables de CO_2 y TVOC bajo una arquitectura de IoT. En la sección 2 se abordan los trabajos relacionados y en la sección 3 se definen los materiales y métodos para implementación de las herramientas de hardware y software empleadas como son el uso de un sensor de gas de ultra-baja potencia como es el CCS811 de la compañía SPARKFUN controlado por un sistema embebido ESP32 de bajo consumo energético. En esta sección se abordan las aplicaciones ThingSpeak y ThingShow para el desarrollo de la plataforma bajo un esquema del IoT que realiza el procesamiento y registro de las mediciones en tiempo real en la nube, accediendo a la información del sistema en forma remota a través de un dispositivo móvil. En las secciones 4 y 5 se describen los resultados y conclusiones de las pruebas realizadas para la verificación del prototipo implementado.

ISSN en trámite

3. MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación, se describe la metodología que se utilizó para la implementación de un prototipo que lleva a cabo las tareas de la adquisición de datos a través de sensores de gases de CO_2 y TVOC, el acondicionamiento de las señales se implementa mediante el sistema embebido ESP32, la transmisión y procesamiento de datos en la nube se lleva a cabo con las aplicaciones ThingSpeak y ThingShow, y por último el acceso remoto a las mediciones mediante dispositivos móviles.

Existen tres componentes básicos que interactúan entre sí y que son de suma importancia para la comunicación mediante el IoT.

A. El hardware, que está constituido principalmente por los sensores de gases y el sistema embebido ESP32.

B. La plataforma en la nube, que es un software el cual permite el intercambio de información entre aplicaciones.

C. Las herramientas que facilitan la visualización, análisis e interpretación de la información y que son diseñadas para poder tener acceso a la información a través de diferentes dispositivos.

3.1 Sistema embebido ESP32

Los módulos ESP32 creados por la compañía Espressif Systems, son sistemas embebidos con microcontroladores de altas prestaciones, bajo costo, bajo consumo energético, con sistema de Wi-Fi y Bluetooth, así como dos núcleos que pueden ser programados de forma independiente. La Tarjeta ESP32 (Fig. 1) es un módulo que por su tamaño permite ser instalado en lugares de muy poco espacio. La conectividad inalámbrica a IoT se implementa mediante protocolos de Wi-Fi o Bluetooth lo cual se facilita con este sistema.

La tarjeta ESP32 ofrece capacidades wifi, bluetooth y BLE a bajo costo. Tiene un CPU de dos núcleos de hasta 240Mhz que se pueden controlar independientemente. Además, integra internamente una gran cantidad de periféricos incluyendo: sensores táctiles capacitivos, sensor de efecto Hall, amplificadores de bajo ruido, interfaz para tarjeta SD, Ethernet, SPI de alta velocidad, UART, I2S e I2C.

El punto fuerte de este sistema embebido es su gran comunidad en internet que brinda soporte y desarrollo constante de nuevas herramientas para su uso. Para su desarrollo cuenta con gran variedad de software, lenguajes de programación, frameworks, librerías, códigos, y otros recursos. Los más comunes a elegir son: Esp-idf (Espressif IoT Development Framework) desarrollado por el fabricante del chip, Arduino (en lenguaje C++), Simba Embedded Programming Platform (en lenguaje Python), RTOS's (como Zephyr Project, Mongoose OS, NuttX RTOS), MicroPython, LUA, JavaScript (Espruino, Duktape, Mongoose JS), Basic.

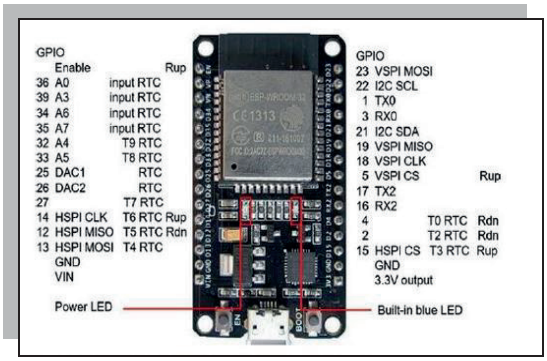


Fig. 1 Tarjeta ESP32 de 30 pines

3.2 Sensor CCS811

El sensor CCS811 (Fig.2) de la compañía SPARKFUN es una solución para la medición de gases como CO_2 y TVOC, es un sistema digital de ultra bajo consumo. Este sensor integra un sensor de gas de metal óxido (MOX/ Mixed Oxide/ uranio empobrecido y plutonio reprocesado) para el monitoreo de calidad del aire interior (IAQ) además de un microcontrolador (MCU/Unidad de Control del Microprocesador) y un convertidor de analógico - digital (ADC). La comunicación es digital a través de interfaz I²C (Inter-Integrated Circuit/ Circuito Inter-Integrado). El sensor CCS811 es ideal para aplicaciones portátiles tales como teléfonos inteligentes, médicos y aplicaciones de control de aire por su bajo consumo de energía.

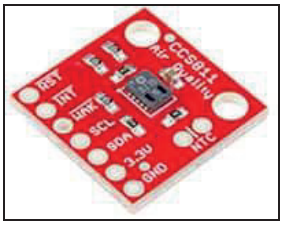


Fig. 2 Sensor CCS811

3.3 Plataforma ThingSpeak

ThingSpeak es una aplicación de código abierto para el Internet de las Cosas que permite almacenar y recopilar datos de objetos conectados a través del protocolo HTTP a través de Internet o de una red local. Con ThingSpeak, el usuario puede crear aplicaciones de registro de datos de sensores, aplicaciones de seguimiento de ubicación y una red social para los objetos conectados, con actualizaciones de estado.

Para trabajar en esta plataforma es necesario crear una cuenta, debido a que de esta manera se podrán acceder a las mediciones que para este caso se obtienen mediante el sensor CCS811 y también porque esta cuenta podrá dar acceso al uso de una aplicación móvil en donde se podrá tener acceso a cada una de las lecturas del sensor.

ISSN en trámite

3.4 Aplicación ThingShow

Está aplicación permite visualizar información almacenada en la plataforma de *ThingSpeak*. Para poder leer los datos es necesario configurar una cuenta con una ID que se crea en la plataforma de *ThingSpeak*, esta cuenta requiere la definición de una llave conocida como *API key*, para tener acceso a la información desde un teléfono móvil que tenga instalada la aplicación *ThingShow,* que permite crear una interfaz de usuario usando elementos gráficos conocidos como *widgets*, permitiendo al usuario administrar y visualizar la información de la mejor manera y de una forma práctica.

4. SISTEMA DE MONITOREO PROPUESTO

4.1 Descripción del Sistema

El sistema de monitoreo de CO_2 y TVOC requiere como se observa en la Fig. 3, de un sistema embebido central que emplea la tarjeta ESP32, la cual cuenta con una conexión de Wifi incluido, también se utiliza el sensor de gases CCS811. La comunicación entre el sensor y la tarjeta ESP32 permite la adquisición en tiempo real de las lecturas de las variables CO_2 y TVOC con un tiempo de muestreo configurable entre 250 ms, 1 s, 10 s y 60 s. Para el procesamiento de los datos de forma remota se requirió crear una cuenta con el acceso a la aplicación de ThingSpeak donde se definen las variables y la configuración para la correcta transmisión inalámbrica. El protocolo de comunicación definido es Wifi integrado en el ESP32 y una vez configurado en el entorno de desarrollo del IDE de Arduino se descarga el firmware sobre el sistema ESP32. En la Fig. 4 se muestra la conexión por I2C entre el sistema embebido ESP32 y el sensor CCS811. Las lecturas de los datos medidos en tiempo real pueden ser visualizadas en ya sea en un dispositivo móvil con conexión Wifi a internet ya sea en una computadora o un teléfono inteligente haciendo uso de la APK ThingShow.

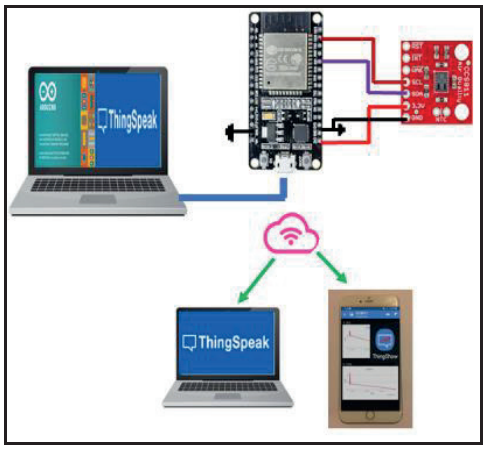


Fig.3 Sistema de monitoreo de CO_2 y TVOC

La tarjeta de desarrollo ESP32 es un componente muy poderoso, ya que, aunque su tamaño es pequeño da al usuario la opción de ser instalada en lugares no tan espaciosos o que no se desee abarcar un lugar tan grande, la ESP32 tiene la capacidad de poder conectarse a una red wifi, que, para el sistema de monitoreo, fue de gran utilidad ya que, la información que el sensor registra puede ser visualizada en la plataforma ThingSpeak o a través de un dispositivo móvil.

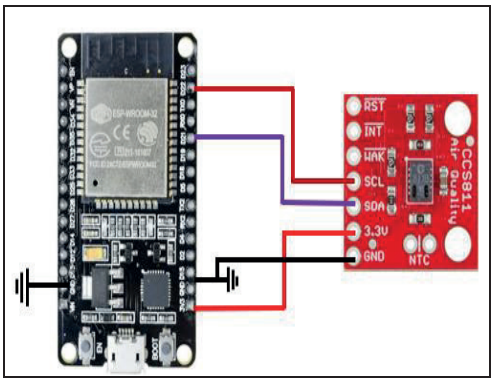


Fig.4 Conexión entre el sensor CCS811 y la tarjeta ESP32

5. RESULTADOS

Una vez que se implementó el sistema de monitoreo descrito en la sección 4, se experimentó exponiendo al sensor de CO_2 y TVOC en un área confinada de 25 m^2 en condiciones de aire ambiental limpio para verificar los parámetros medidos por el sensor bajo condiciones de referencia, es decir, sin presencia de humo, gases o algún elemento que pudiera perturbar al sensor.

Posteriormente se realizaron mediciones en condiciones de contaminación del aire ambiental, cabe señalar que el área de exposición del sensor no estaba sellada totalmente, así como la inclusión de personas dentro del área confinada bajo prueba. Durante las pruebas se estuvieron transmitiendo los datos entre la plataforma ThingShow y la plataforma de ThingSpeak. La Fig. 5 corresponde a la interfaz generada en el dispositivo móvil mediante la APK ThingShow, en ella podemos observar las mediciones en tiempo real tanto de CO_2 como de TVOC. Es importante mencionar que la aplicación de ThingShow solo despliega en la pantalla de la interfaz un promedio de dos minutos de información, mientras que la plataforma de ThingSpeak una vez configurado el canal de comunicación, almacena continuamente los datos desde el momento que el sensor comienza a ser utilizado, pudiendo exportar la información de la base de datos generada a un archivo en formato estándar para poder ser procesado en otras plataformas si fuera necesario.

ISSN en trámite

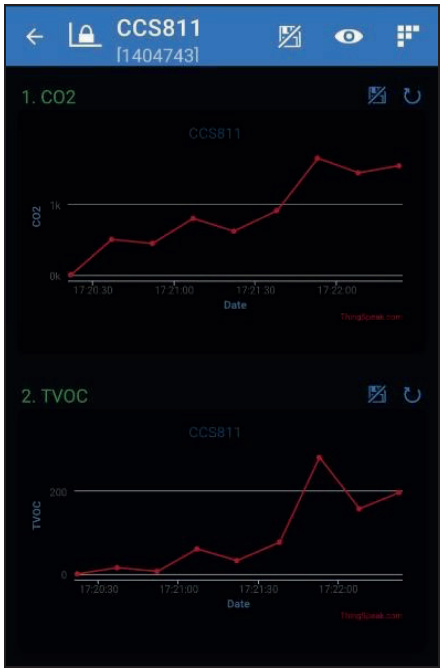


Fig. 5 Pantalla de ThingShow, monitoreo sin perturbación

La Fig. 6 representa la información almacenada y recuperada offline para su análisis y procesamiento de acuerdo con las necesidades del usuario. Se verificó que la información correspondiera con la información generada en tiempo real por el sistema embebido, logrando corroborar esta información.

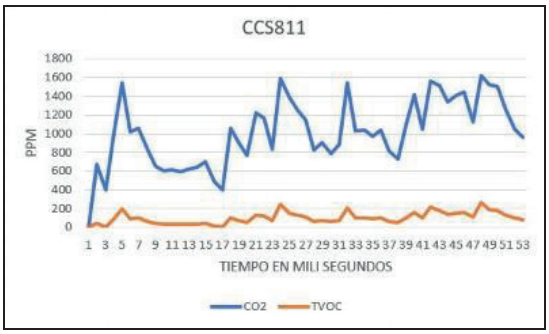


Fig. 6 Gráficas obtenidas de ThingSpeak, sin perturbación

La experimentación consistió en la exposición del sensor al medio ambiente en un área confinada con un mínimo de perturbaciones y un mínimo de personas dentro del espacio confinado. Los resultados muestran valores que se mantienen en rangos desde 0 hasta las 2000 ppm para el CO_2, estos son resultados sin agentes externos. Por otro lado, en las Fig. 7 y Fig. 8, podemos observar que los cambios comienzan a ser notables debido a que el sensor fue expuesto a un ambiente contaminado por la combustión de un cerillo y a la de un incienso, dando como resultado el aumento de CO_2, también aumentan los niveles de TVOC, pero a diferencia del CO_2, los niveles de TVOC tienden a ser más lineales que el CO_2.

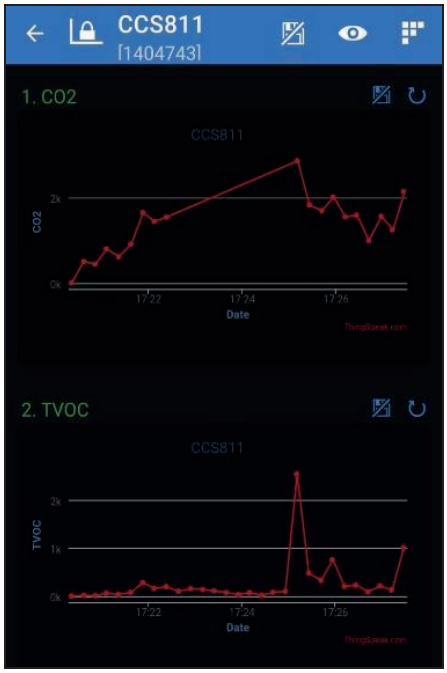


Fig. 7 Pantalla de ThingShow, monitoreo con perturbación

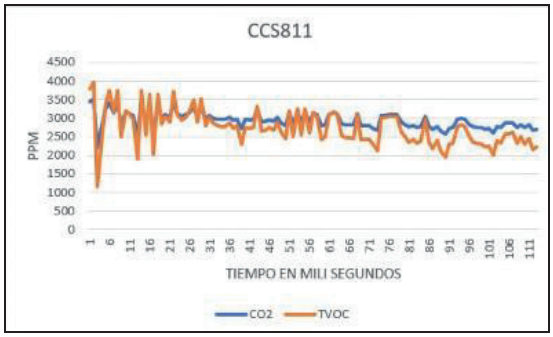


Fig. 8 Gráfica obtenida de ThingSpeak, con perturbación

También se puede observar que ahora los niveles superan a las 4500 ppm de las dos variables (CO_2 y TVOC). El CO_2 tiene un aumento significativo, para después ir disminuyendo, esto se debe a que la combustión de los elementos antes mencionados se consumía con el paso del tiempo. En el caso con el TVOC es diferente, ya que, tiene un aumento, pero después se mantiene estable, después se observó un pico de aumento, para después estabilizarse nuevamente.

4. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos se puede llegar a la conclusión de que el sistema implementado es confiable de acuerdo con las NOM-085-ECOL-1994 que establece los niveles máximos permisibles de gases entre ellos el CO_2 y VOC, confirmando que el sistema trabaja conforme a lo esperado. En el apartado 6.1.1.3 del punto 6 de la norma antes mencionada, se menciona la frecuencia con la que se deben muestrear los resultados de las mediciones. La tabla 6 de esta Norma da todos los datos

ISSN en trámite

sobre las mediciones. También es importante señalar que, al momento de integrarlo al mundo del Internet de las Cosas se facilitó mucho el almacenamiento de datos, y sobre todo la visualización de ellos; la plataforma de ThingSpeak permitió almacenar datos y generar un histórico que puede ser procesado posteriormente, lo cual permitirá comparar las lecturas bajo diferentes situaciones. Una de las ventajas que se tienen con la implementación del sistema de monitoreo implementado es que puede ser replicado en múltiples sitios para monitorear de manera simultánea múltiples espacios desde un sitio remoto y con las facilidades que ofrece un sistema IoT.

Los trabajos relacionados descritos en la sección 2, son sistemas de monitoreo que se han desarrollado cada uno con sus alcances y limitaciones. El trabajo realizado en este artículo utiliza hardware de muy bajo consumo energético (aproximadamente de 100mW de acuerdo con las especificaciones técnicas) ya que la tarjeta ESP32 requiere de un máximo 46mW, y el sensor CCS811 de 60mW, lo que nos permitiría colocar un mayor número de sensores mejorando las mediciones de los niveles de CO_2 y TVOC bajo algoritmos que ponderen las mediciones en función de las necesidades del área confinada.

5. REFERENCIAS

A. A. Widhowati, A. Y. P. W. H. A. D. M. N. a. A. B., 2021. Development of a Portable Volatile Organic Compound Concentration Measurement System Using a CCS811 Air Quality Sensor. International Symposium on Electronics and Smart Devices, pp. 1 - 5.

Beningo, J., 2020. Cómo seleccionar y usar el módulo ESP32 con Wi-Fi/Bluetooth adecuado para una aplicación de IoT industrial. [En línea]: https://www.digikey.com.mx/es/articles/how-to-select-and-use-the-right-esp32-wi-fi-bluetooth-module. [Último acceso: 24 Octubre 2021].

Digi-Key, 2017. Sparfun Electronics. [En línea]: https://www.digikey.com.mx/es/product-highlight/s/sparkfun/ccs811-indoor-air-quality-sensor-breakout-board.

elnuevodiario.com.ni, 2009. Gases de efecto inverndero}. peligrosos para la salud pública. [En línea]: https://www.elnuevodiario.com.ni/internacionales/45447-gases-efecto-invernadero-peligrosos-salud-publica/ [Último acceso: 19 Octubre 2021].

Garrido, R. L., 2015. Estudio de Plataformas IoT. [En línea].

Gaurav Rout, S. K. a. P. T. N., 2018. Pollution monitoring system using IoT. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 13(6), pp. 2116-2123.

Gonzalez, M., 2015. Elementos IoT. [En línea].

JunHo Jo, B. J. ,. K. ,. S. K. a. W. H., 2020. Development of an IoT-Based Indoor Air Quality Monitoring Platform. Journal of Sensors, Volumen 2020, p. 14.

Liang Zhao, W. W. S. L., 2019. Design and implementation of an IoT based indoor air quality detector with multiple communication interfaces. IEEE INTERNET OF THINGS JOURNAL, pp. 2327-4662.

Martin M. Soto-Cordova, M. M.-D.-L.-C. A. M.-M., 2020. An IoT based Urban Areas Air Quality Monitoring Prototype. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 11(9), pp. 711-716.

Monet, M. O., 2019. Implementación y evaluación de plataformas en la nube para servicios IoT. [En línea].

Organización Mundial de la Salud, 2005. OMS Guía de calidad del aire actualización mundial 2005, Bonn, Alemania: Organización Panamericana de Salud.

Organización Mundial de la Salud, 2018. Contaminación atmosférica y salud infantil - Preescribir aire limpio. [En línea]: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/275548/WHO-CED-PHE-18.01-spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y [Último acceso: 24 10 2021].

Organizacion Mundial de la Salud, 2021. WHO. [En línea]: https://www.who.int/es/news/item/22-09-2021-new-who-global-air-quality-guidelines-aim-to-save-millions-of-lives-from-air-pollution [Último acceso: 22 octubre 2021].

Preethichandra, D. M. G., 2013. Design of a smart indoor air quality monitoring wireless sensor network for assisted living. Minneapolis, MN, USA, IEEE, pp. 1306-1310.

Rakhimov, A., 2018. Respiración Normal. [En línea]: https://www.respiracionnormal.org/co2/ [Último acceso: 19 Octubre 2021].

S. Faiazuddin, M. V. L. K. T. A. M. R., 2020. IoT based Indoor Air Quality Monitoring system using Rasperry Pi4. International Conferences on Electronics, Communication and Aerospace Technology, Volumen 4, pp. 714-719.

Somayya Madakam, R. R. S. T., 2015. Internet of Things (IoT): A Literature Review. Journal of Computer and Communucations, 3(5), p. 10.

ISSN en trámite

La influencia del léxico afectivo en los discursos políticos y su relación con los resultados de las elecciones

Pavel Ricardo Morales Ocampo* Dr. Noé Alejandro Castro Sánchez**
Dr. Nimrod Gonzáles Franco* Dr. Leonor Rivera Rivera******

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos
*{e-mail: *m20ce085, **noe.cs, ***nimrod.gf {@cenidet.tecnm.mx})*
***** Instituto Nacional de Salud Pública, Cuernavaca, Morelos (e-mail: lrivera@insp.mx)*

Abstract: Political speeches are a complex and multi-dimensional phenomenon. Its analysis brings together different areas of the humanities. The particularities of political discourse are represented by a series of structured characteristics. The speech of a political speaker is considered a type of social influence and a political phenomenon, as well as a form of communication. In this study, a series of 139 documents is analyzed to study whether the use of affective vocabulary is related to the outcome of the election.

Keywords: natural language; political speech; elections; affective vocabulary.

1. INTRODUCCIÓN

Los discursos políticos son una de las mayores representaciones de las propuestas de los candidatos, y juegan un papel importante en la toma de decisión de los votantes. Los discursos políticos llevan una estructura de redacción y tienden a ser persuasivos [1] para convencer a terceras personas de lo que se está proponiendo [2]. A través de estos discursos se puede cambiar la opinión pública, informar sobre los planes y, por supuesto, influenciar al público. La influencia puede realizarse a través del manejo de humor, de hablar mal de otras personas o con el uso de determinado léxico. En este trabajo se analiza el léxico afectivo de los discursos emitidos por candidatos a la presidencia de México en los periodos electorales de 2006, 2012, y 2018.

2. ANTECEDENTES

En las ciencias humanas y sociales, las emociones son objeto de diversos enfoques que dependen de la especificidad de cada disciplina [1]. Respecto a los discursos políticos, éstos han sido estudiados ampliamente en su relación con el aspecto emocional o la apelación por sentimientos. En [2] se presenta un estudio con enfoque mixto (cuantitativo y cualitativo) que contrasta los discursos de dos partidos políticos opuestos de UK, demostrando que uno de los partidos incluye mayor afectividad y también que los tipos de emoción expresada o evocada son diferentes. En [3] se propone un método de clasificación automática de tweets políticos con base en los sentimientos. Para entrenar el modelo se utiliza un corpus anotado de manera manual.

En este trabajo se realiza un estudio del uso de léxico afectivo en los discursos políticos y su relación con los resultados de las elecciones. Los datos se obtienen de un proceso automático de contabilización de frecuencias basado en un léxico afectivo y se estudian con pruebas paramétricas.

3. DISEÑO EXPERIMENTAL

3.1 Objetivos

La meta de este estudio es analizar transcripciones de los discursos emitidos por candidatos a la presidencia de México con el propósito de identificar si existe una relación entre el uso de léxico afectivo que se emplea en ellos y el resultado de las elecciones. Para esto, se utilizan datos de los periodos electorales de 2006, 2012 y 2018.

3.2 Hipótesis

H0: No existe una relación entre el uso de léxico afectivo en los discursos políticos y el resultado de las elecciones.

HI: Existe una relación entre el uso de léxico afectivo en los discursos políticos y el resultado de las elecciones.

3.3 Variables

Para realizar este experimento, se utiliza el léxico emocional SEL (Spanish Emotion Lexicon) [6, 7], un léxico que contiene 2,036 palabras con una medida de PFA para diferentes emociones: Alegría, Enojo, Tristeza, Sorpresa, Repulsión, Miedo.

El PFA o Probabilidad de Factor Afectivo: es una variable continua que ofrece el factor por el que una palabra suele presentarse con la connotación emocional: por ejemplo, la palabra *alegre* tiene un PFA de 1, lo que indica que el cien por ciento de las veces que se utiliza esta palabra tiene connotación

ISSN en trámite

alegre; por otro lado, la palabra *familiar* tiene un PFA de 0.52, lo que indica un cincuenta y dos por ciento de probabilidad de indicar alegría.

A fin de comprobar la hipótesis de investigación, en este trabajo se utilizan las siguientes variables:

Frecuencia (F): esta variable discreta hace referencia al número de veces que una palabra afectiva del SEL aparece en un discurso.

F-PFA: esta variable corresponde a la sumatoria de la Frecuencia de una palabra multiplicada por su factor PFA.

Ganador: esta variable categórica hace referencia a si el candidato resultó ganador o no del comicio electoral correspondiente.

3.4 Limitaciones del estudio

El estudio queda limitado a variables de afectividad emocional.

4. EJECUCIÓN

En este apartado se describen las etapas seguidas para el desarrollo de este trabajo.

4.1 Muestreo

Se seleccionaron documentos con transcripciones de discursos que cumplieran con los criterios de elegibilidad. Estos fueron:

- Discursos emitidos por los candidatos a la presidencia de México en los periodos electorales de 2006, 2012, y 2018.
- Discursos emitidos durante las campañas electorales.
- Discursos con un mínimo de 100 palabras.
- Discursos formales; se excluyeron comentarios u opiniones en entrevistas.

Los textos fueron obtenidos de un repositorio [5] y descargados de internet (periódicos formales) [8, 9, 10].

5. ANÁLISIS

5.1 Descripción del corpus

En la Tabla 1 se muestra un resumen del corpus utilizado; se incluye la media como representación del tamaño de cada documento. Como se mencionó anteriormente, se cuentan con documentos de tres periodos electorales. En total se cuenta con 139 documentos, cada uno con un promedio de 1839 palabras.

Año de elección	**Candidato**	**Número de documentos**	**Promedio de palabras por documento**
2006	AMLO	19	2170.1
	Calderón	17	2774.0
	Madrazo	21	2159.1
2012	AMLO	2	915.0
	EPN	3	1927.7
	JVM	2	1478.5
2018	AMLO	11	2136.4
	Anaya	4	2251.5
	Meade	58	1683.7
	Zavala	2	895.0
TOTAL		139	1839

Tabla 1 Resumen del corpus utilizado

5.2 Preprocesamiento del corpus

En esta sección se describen las tareas realizadas en la etapa de preprocesamiento del corpus.

- Los documentos que componen el corpus fueron transformados al formato docx y agrupados por periodo y nombre del candidato.
- Limpieza de los textos que componen el corpus: normalización a minúsculas, eliminación de stopwords, palabras vacías, espacios múltiples y puntuación.

5.3 Obtención de variables

En este apartado se describen las tareas que se realizaron sobre el corpus para obtener las variables estudiadas. En este trabajo se decidió aplicar una ponderación a las frecuencias de aparición de las palabras del léxico afectivo multiplicándolas por su factor PFA, esto con la finalidad de obtener una representación más fiel del significado de las palabras afectivas, ya que, de tomarse las frecuencias absolutas, todos los términos tendrían pesos idénticos y no serían una clara representación del fenómeno escrito.

- Se realiza la lectura de texto palabra por palabra para realizar un conteo de la frecuencia de palabras en el léxico afectivo.
- Se realiza la sumatoria del factor PFA multiplicado por la frecuencia de aparición de cada palabra asociada a una emoción.
- Finalmente se genera un valor único para las diferentes emociones.

5.4 Aplicación de pruebas

Para hacer las pruebas se siguieron los siguientes pasos:

ISSN en trámite

- Separación de muestras por aquellas que pertenecen a candidatos que ganaron la presidencia y aquellos que no.
- Graficación de diagramas de caja para explorar el comportamiento de cada una de las seis variables emocionales respecto a la dicotomización de contendientes.
- Se decidió utilizar la prueba Shaphiro-Wilk porque el tamaño de las muestras es pequeño.
- Se realiza la prueba de Shaphiro-Wilk para determinar la distribución de las muestras. Con base en estas se determinó el tipo de prueba a aplicar.
- Se definió un $\alpha = 0.05$.
- Finalmente, utilizando el programa R, se realiza la prueba T para aquellas muestras que tienen una distribución normal y una prueba U para aquellas que no.

Para comprobar el supuesto de normalidad y homocedasticidad se usó la prueba F, considerando un nivel de significancia α de 0.05. Los resultados obtenidos en esta prueba se muestran en la Tabla 2, donde se observa que las varianzas de Alegría y Repulsión presentan diferencias significativas.

Emoción	**P-value**
Alegría	0.03313
Enojo	0.5422
Tristeza	0.4186
Sorpresa	0.5375
Repulsión	0.02659
Miedo	0.5074

Tabla 2 Resultados de la prueba F

A continuación se muestra el análisis realizado para cada una de las emociones. Se muestra primero el diagrama de cajas y bigotes y la inspección visual de la variable y en seguida la prueba paramétrica realizada (T, para el caso de Alegría y Repulsión, y U para las demás emociones).

5.4.1 Categoría emocional: Alegría

Para el caso de alegría se observa una diferencia en las medias, siendo la mayor del candidato que ganó y una presencia de datos que representan mayor grado de Alegría (PFA = 1).

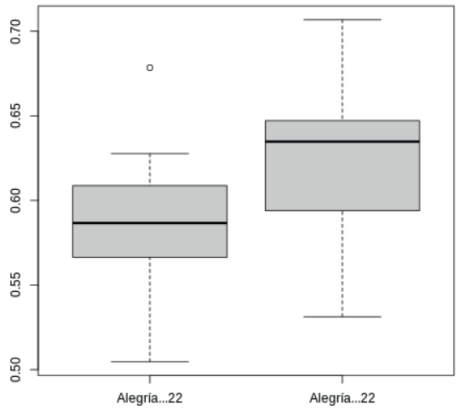


Figura 1 Diagrama de cajas y bigotes: Alegría (Muestra de ganadores: izquierda; muestra de perdedores: derecha)

La prueba T (Tabla 3) reveló que para la categoría de Alegría existe evidencia de que su uso influye en el resultado de la elección. La prueba T arrojó un p-value de 0.008492, valor menor que el α de 0.05 establecido, por lo que sí hay diferencias en las medias poblacionales.

Prueba T	
Alegría	data: ganadores and perdedores t = 2.8889, df = 22.112, p-value = 0.008492 alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0 95 percent confidence interval: 0.01069358 0.06505805 sample estimates: mean of x mean of y 0.6227184 0.5848425

Tabla 3 Resultados de la prueba T para la emoción alegría

5.4.2 Categoría emocional: Tristeza

En el caso de la tristeza el rango de frecuencia de palabras es menor para el candidato ganador, y su distribución se aleja más al valor PFA = 1. Se observa una diferencia pequeña que no parece importante según el test T.

ISSN en trámite

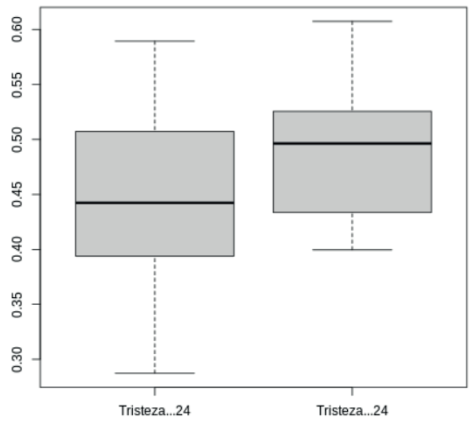


Figura 2 Diagrama de cajas y bigotes: Tristeza (Muestra de ganadores: izquierda; muestra de perdedores: derecha)

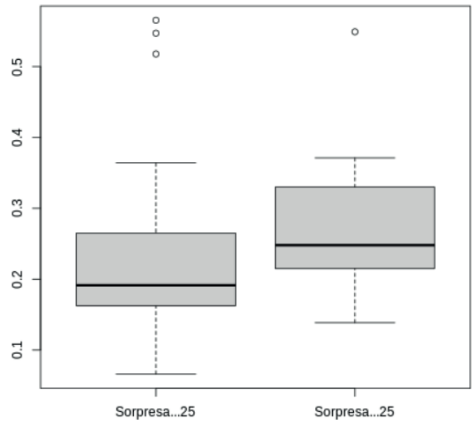


Figura 3 Diagrama de cajas y bigotes: Sorpresa (Muestra de ganadores: izquierda; muestra de perdedores: derecha)

La prueba U (Tabla 4) reveló que para la categoría no existe evidencia de que su uso no influye en el resultado de la elección. La prueba arrojó un p-value de 0.08912, valor superior al α de 0.05 establecido, por lo que no hay diferencias en las medias poblacionales.

Prueba U	
Tristeza	data: ganadores and perdedores W = 438, p-value = 0.08912 alternative hypothesis: true location shift is not equal to 0

Tabla 4 Resultados de la prueba T para la emoción tristeza

Para el caso de la categoría de Sorpresa se utilizó la prueba U, ya que la prueba Shapiro arrojó que la muestra no provenía de una distribución normal. En esta prueba se obtuvo un p-value de 0.02494 (Tabla 5) que nos indica que sí existe una diferencia en las medias poblacionales.

Prueba U	
Sorpresa	data: ganadores and perdedores W = 469, p-value = 0.02494 alternative hypothesis: true location shift is not equal to 0

Tabla 5 Resultados de la prueba U para la emoción sorpresa

5.4.3 Categoría emocional: Sorpresa

En el caso de la sorpresa se muestra una diferencia aparente en las medias (demostrada por la prueba U). Además, la distribución de los datos se aleja más del cero para el caso de los discursos de los candidatos ganadores.

5.4.4 Categoría emocional: Repulsión

En el caso de la repulsión no se encontró una diferencia significativa en las medias.

ISSN en trámite

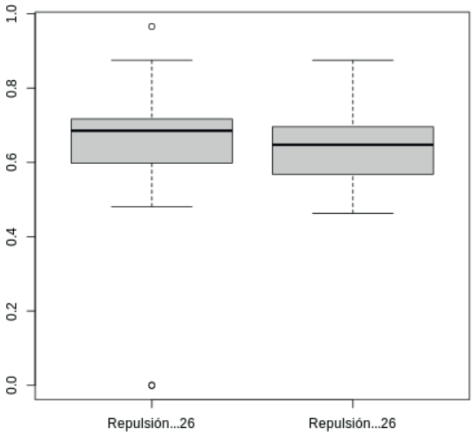


Figura 4 Diagrama de cajas y bigotes: Repulsión (Muestra de ganadores: izquierda; muestra de perdedores: derecha)

Para la categoría de Repulsión, la prueba T no reveló evidencia que demostrara una variación en las medias. El p-value obtenido fue de 0.1901, mayor al α de 0.05 (Tabla 6).

Prueba T	
Repulsión	data: ganadores and perdedores t = -0.33911, df = 48.901, p-value = 0.736 alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0 95 percent confidence interval: -0.08859482 0.06301258 sample estimates: mean of x mean of y 0.6294514 0.6422425

Tabla 6 Resultados de la prueba T para la emoción repulsión

5.4.5 Categoría emocional: Miedo

En el caso del miedo no se encontró una diferencia significativa en las medias.

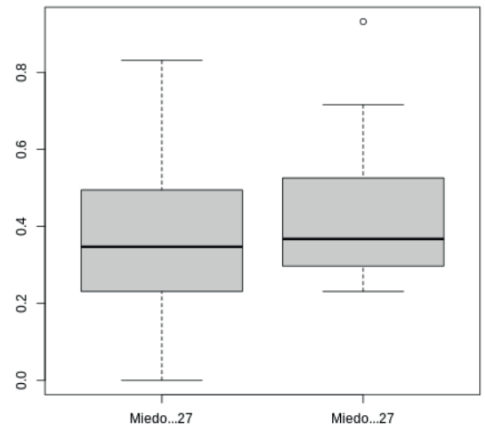


Figura 5 Diagrama de cajas y bigotes: Miedo (Muestra de ganadores: izquierda; muestra de perdedores: derecha)

Para la categoría de Miedo no se encontró evidencia que demostrara una variación en las medias. El p-value obtenido fue 0.3196, mayor al α de 0.05 (Tabla 7).

Prueba U	
Miedo	data: ganadores and perdedores W = 397.5, p-value = 0.3196 alternative hypothesis: true location shift is not equal to 0

Tabla 7 Resultados de la prueba U para la emoción miedo

5.4.6 Categoría emocional: Enojo

En el caso del enojo, el diagrama de cajas y bigotes no se observa una diferencia significativa.

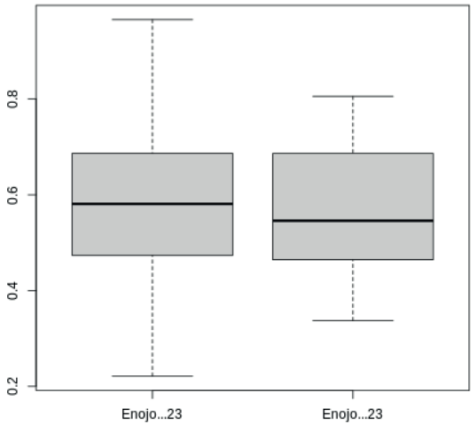


Figura 6 Diagrama de cajas y bigotes: Enojo (Muestra de ganadores: izquierda; muestra de perdedores: derecha)

ISSN en trámite

Para la categoría de Enojo no se encontró evidencia que demostrara una variación en las medias. El p-value obtenido fue de 0.844, mayor al α de 0.05 (Tabla 8).

Prueba U	
Enojo	data: ganadores and perdedores t = -0.19828, df = 34.731, p-value = 0.844 alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0 95 percent confidence interval: -0.09390579 0.07719864 sample estimates: mean of x mean of y 0.5643580 0.5727116

Tabla 8 Resultados de la prueba U para la emoción enojo

6. CONCLUSIONES

El análisis estadístico de los documentos demostró que en el escenario político mexicano parece existir una relación entre el uso de léxico afectivo y el resultado de la elección. Sin embargo, hay que señalar que la muestra es de sólo tres periodos electorales, lo que podría resultar insuficiente para hacer una determinación definitiva. Las categorías afectivas que resultaron relevantes en este trabajo fueron las de Alegría y Sorpresa. En el caso de la primera categoría, su presencia puede influir en la credibilidad [11]. Sin embargo, en el caso de la sorpresa, lo mejor sería estudiar el fenómeno desde un ángulo psicológico.

Como trabajo futuro se planea realizar el análisis con datos a nivel gubernatura, donde se espera encontrar mayor cantidad de discursos y una muestra más amplia. Esta investigación podría sugerir a los futuros candidatos políticos el uso del léxico afectivo que mostró relevancia en los resultados (alegría y sorpresa) con la finalidad de lograr un mayor impacto en el público. Además, para los votantes, los resultados pueden concientizar sobre el uso de palabras afectivas y su efecto sobre ellos, así el público puede evitar ser influenciados por quienes generan (y emiten) los discursos, y puede también reformular sus criterios al momento de elegir a un candidato.

REFERENCIAS

1. Patrick Charaudeau, "Las emociones como efectos de discurso", revista Versión, n°26, junio 2011, La experiencia emocional y sus razones, pp.97-118, UAM, México, 2011, consulté le 16 novembre 2021 sur le site de Patrick Charaudeau - Livres, articles, publications.
2. Breeze R. Emotion in politics: Affective-discursive practices in UKIP and Labour. Discourse & Society. 2019;30(1):24-43. doi:10.1177/0957926518801074
3. Arcila-Calderón, C., Ortega-Mohedano, F., Jiménez-Amores, J., & Trullenque, S. (2017). Análisis supervisado de sentimientos políticos en español: clasificación en tiempo real de tweets basada en aprendizaje automático. Profesional De La Información, 26(5), 973–982. https://doi.org/10.3145/epi.2017.sep.18
4. Educación: Cómo hacer un discurso perfecto, según el escritor que se los redacta a Obama. [Online]. Available: http://www.elconfidencial.com/alma-corazon-vida/2015-01-15/6-consejos-para-elaborar-un-discurso-convincente-segun-el-asesor-de-obama_621098/.[Accessed: 21-Oct-2021].
5. Felipe Ojeda-Cruz, Noé Alejandro Castro-Sánchez, Héctor Jiménez-Salazar. Research in Computing Science. 2016. pp. 165–176
6. Grigori Sidorov, Sabino Miranda-Jiménez, Francisco Viveros-Jiménez, Alexander Gelbukh, Noé Castro-Sánchez, Francisco Velásquez, Ismael Díaz-Rangel, Sergio Suárez-Guerra, Alejandro Treviño, and Juan Gordon. Empirical Study of Opinion Mining in Spanish Tweets. *LNAI* 7629, 2012, pp. 1-14.
7. Ismael Díaz Rangel, Grigori Sidorov, Sergio Suárez-Guerra. Creación y evaluación de un diccionario marcado con emociones y ponderado para el español. *Onomazein*, 29, 23 p., 2014, DOI 10.7764/onomazein.29.5
8. ¿Qué dijeron los candidatos presidenciales en sus cierres de campaña?. [Online]. Available: https://ellince.mx/noticias/articulo/12600/que-dijeron-los-candidatos-presidenciales-en-sus-cierres-de-campana-estos-son-sus-discursos.html
9. ¿Qué dijeron los candidatos presidenciales al arrancar campaña? [Online]. Available: https://www.periodicocentral.mx/2018/nacional-seccion/item/7062-que-dijeron-los-candidatos-presidenciales-al-arrancar-campana-estos-fueron-sus-discursos#ixzz7AGVAoPwK
10. Arranque de campaña. [Online] Availabable: https://www.margaritazavala.com/opinion/arranque-de-campana-en-el-angel-de-la-independencia/
11. Torre, I; Goslin, J. White, L. (2020) If your device could smile: People trust happy-sounding artificial agents more, Computers in Human Behavior

ISSN en trámite

Classification and Transmission System of ECG Signals on Development Board

J.R. Cárdenas-Valdez*, D. Valdez-Luis*, M. de J. García-Ortega* and A. H. Corral-Domínguez*

** ITT, Department of Electrical and Electronics Engineering, Tijuana Institute of Technology, Tijuana, Mexico 22435. (e-mail: jose.cardenas@tectijuana.edu.mx; daniela.valdez18@tectijuana.edu.mx; manuel.garciao@tectijuana.edu.mx; angel.corral@tectijuana.edu.mx).*

Abstract: In this work, a system for the classification of ECG signals and their implementation in hardware is performed. In order to determine whether or not the ECG signals present syndromes related to the value of the cardiac QTc wave. This information is emulated in hardware using the digital-to-analog converters on the FPGA Cyclone V development board. Over time as short, long QT syndrome, or no syndrome at all. The design of this classifier and implementation in hardware is a contribution to applications in the post-pandemic era. The system comprises the following stages, data acquisition, SVM processing and classification of ECG signals, conversion from c language to VHDL and hardware emulation.

Keywords: Data acquisition, ECG, Hardware Implementation, Signal Classification, SVM.

1. INTRODUCTION

Cardiovascular events can cause up to 12 deaths a day in Mexico, thus making cardiovascular diseases the leading cause of death in the country (Rosas-Peralta, M., and Attie, F. (2007).). Most cardiovascular diseases derive from genetic malformation or develop when risk factors such as age, weight, diabetes, smoking, etc., are present. That is, leading a sedentary lifestyle with little physical activity increases the appearance of these conditions. Even considering these factors, it is possible to prevent these diseases with the help of an electrocardiogram (ECG), e.g. Marquez, S., Rodriguez, J., and De Abajo, S. (2006).

Developing a project with these characteristics arises from the problems created by social and economic inequality in Mexico, particularly the lack of access to health services by the population in these communities and the lack of available technology on the part of the health sector of Mexico. Among the problems mentioned in the PND (National Development Plan) during 2019-2024 by Diario Oficial de la Federacion, (2019).. There is a particular interest in the development of telecommunication technologies. The motivation behind this project aims to be a watershed in the area of telemedicine for hardware applications in the post-pandemic era. This project is a start and a small-scale test; as future work, the implementation in the time domain of this work will be transferred to transceiver systems that operate in the radio frequency (RF) domain in the 2 GHz band or with the introduction of 5G in the 5 GHz band.

The ECG is based on obtaining 5 waves, the PQRST waves, which are linked by an isoelectric line. Each wave represents a different stage of the heartbeat; because the ECG waves are measured in milliseconds, it is possible to distinguish the existence of syndromes and thus be able to diagnose and provide effective treatment. Among the diseases that can be detected with the use of the ECG test analysis and classification, the short QT and long QT syndromes defined by Rudic, B., Schimpf, R. and Borggrefe, M. (2014), Brugada syndrome, e,g, Lee, Leslie, Felmlee, N. (2010), and the Wolff-Parkinson-White syndrome by Surawicz, B., et, al. (2009)..

This project focuses on short QT and long QT syndromes. In the first instance, an support vector machine (SVM) classification system is developed to determine the presence of the short QT and long QT syndromes with the QTc value; this value is defined as corrected QT. The short QT and long QT syndromes refer to the distance in the QT interval, the measure of time between the beginning of the Q wave and the end of the T wave on the ECG. A graphical representation of the processed measurements is obtained, leaving the data available for transmission and classification, e.g. Davey, P. (2000).. Once the classification is done, the next step is to transmit the signals in order to observe the differences between each of them. The signal transmission is implemented in time. For this step, a Cyclone V FPGA card is used.

To perform the SVM classification, data comparison and division are performed using a hyperplane. Usually, classifiers of this type perform a binary classification where 2 cases are obtained, of existence or nonexistence. However, we seek to find 3 cases (short QT, normal QT, and long QT), so we choose to use a multiclass classifier. The process is done through Simulink where it is verified if the selected wave belongs to a normal, short, or long-time range. This research work is organized as follows, section 2 shows the methodology used, and the SVM classifier, as well as a description of the implementation platform, section 3 shows the results obtained. In section 4 the

ISSN en trámite

discussion of the results obtained is shown, and finally in section 5 the conclusions obtained are shown.

2. METHODOLOGY

This section gives a detailed process description that was carried out for the development of this classification and transmission system. The three main stages of the project are covered in detail, management of the database, creation of the SVM classifier, and finally, the transmission of the signals. Fig. 1 shows a representative block diagram of the development stages of this project.

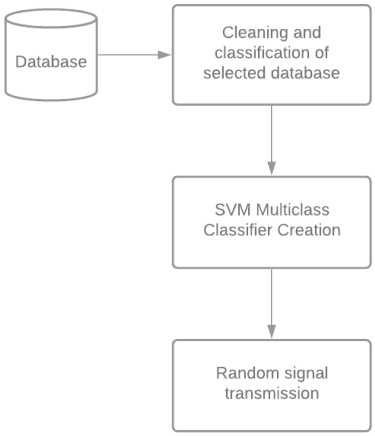


Fig. 1. Project development stages

In this case, there is a database of 10646 test subjects, each subject with 16 columns of information, defined by Zheng, J., et al., (2020). The first step is to divide the database in two; this action is carried out since the QTc values vary according to gender. The QTc interval within which a patient has short QT syndrome differs depending on the gender of the patient, male or female. One database corresponds to the male gender and the other to the female gender. The next step is to design the training vectors to be able to run and design the required multiclass SVM classifier. However, before proceeding to the development of such vectors, it is essential to recognize the differences within the QTc value for men and women. For this SVM multiclass classification process, the QT distances expressed in ms are evaluated; then filtering between genders and the SVM detection algorithm determines between tree classes. From a finite set of several elements, the established database for more than 10,000 patients are defined by the QT periods. The evaluation process is based on distances over time. This difference can be seen in Table 1.

Table 1. QTc values and heart disease

Men		Women
470ms	Very long QT value Long QT value, even being asymptomatic.	480 ms
450ms	Long QT value QT value supported by symptoms, family history, or additional tests.	460 ms
390 ms	Possibly long QT value Additional exams when indicated	400 ms
360 ms	Normal QT value	370 ms
330ms	Short QT value Short QT value, supported by symptoms, family history, or additional tests. Very short QT value Short QT value, even being asymptomatic.	340 ms

Figure 2 shows the QT interval that was the basis for delimiting the separation in milliseconds in the gender classification process. In this work the signal QT Interval under analysis with an ECG signal in the time domain.

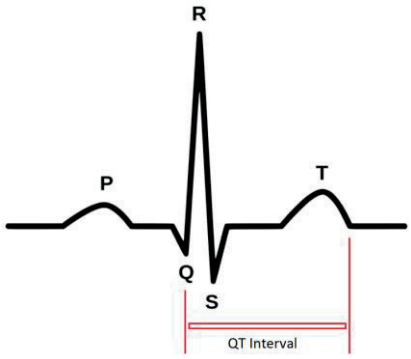


Fig. 2. ECG figure of normal rhythm and its QT Interval.

2.1 SVM Classifier

A SVM system can be designed for different kinds of data. In this case, it finds the best hyperplane that separates data defined with one trend from another to find the greatest distance between the plane and the data under evaluation. An SVM system requires high computational cost and optimization during programming, in addition. The points separated by the

ISSN en trámite

hyperplane of the SVM are at the boundary of the defined data. A simple representation of the training and definition of the SVM hyperplane is shown below. The training data is defined by a series of x_n vectors along its y_n categories, as can be seen in (1).

$$f(x) = x\beta + a = 0. \quad (1)$$

In this case in order to find the best hyperplane is necessary to find β and **α** that minimize the norm of β for all data point (x_n, y_n), where $y_n f(x_n) \leq 1$. The support vector values are the x_n on the boundary defined by $y_n f(x_n)=1$. The optimal solution for (β, α) defines the z vector classification as is depicted in (2):

$$class(z) = sign(z\beta + \alpha) = sign\,(f(z)). \quad (2)$$

Where f(z) is the classification target and represent the distance from the decision boundary, e.g. Sandeep, R.; Chandra, K. (2017) and Venkatesan, C., Karthigaikumar, P., Satheeskumaran, S.. and Kumar, R.. Paul. A. (2018).

Based on this difference and data division, both SVM classifiers were created, where random signals are chosen at the end to be transmitted. Signals for comparison and classification are chosen to be transmitted because the Altera Cyclone V and HSMC cards to be used are limited by the number of transmission channels because they are connected to a two DAC channels. Fig. 3 shows the interconnection between these three devices.

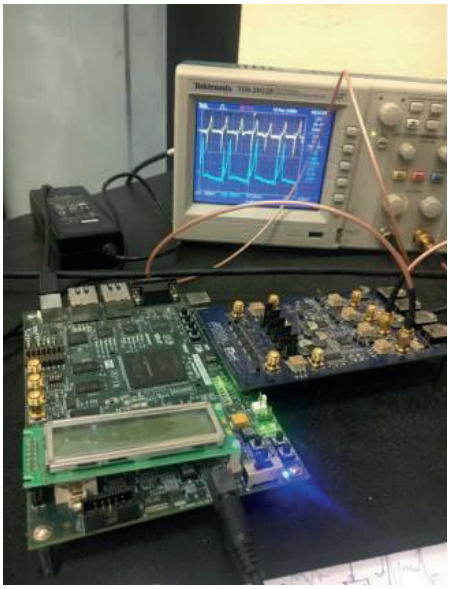


Fig. 3. Test platform for SVM implementation based on Cyclone V card and HSMC

Data classification was developed using SVM, Fig. 4 shows a flow diagram of the process carried out.

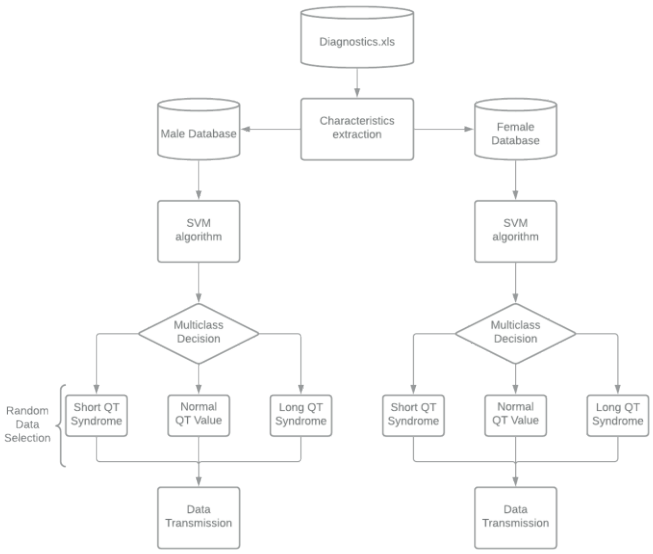


Fig. 4. Flow diagram of the SVM classifier system

This flowchart shows in detail the steps of the storage of variables of the ECG signals that have been classified. A program was created in Simulink for the process of transmission of these ECG signals. Fig. 5 shows the block diagram of the hardware implementation.

ISSN en trámite

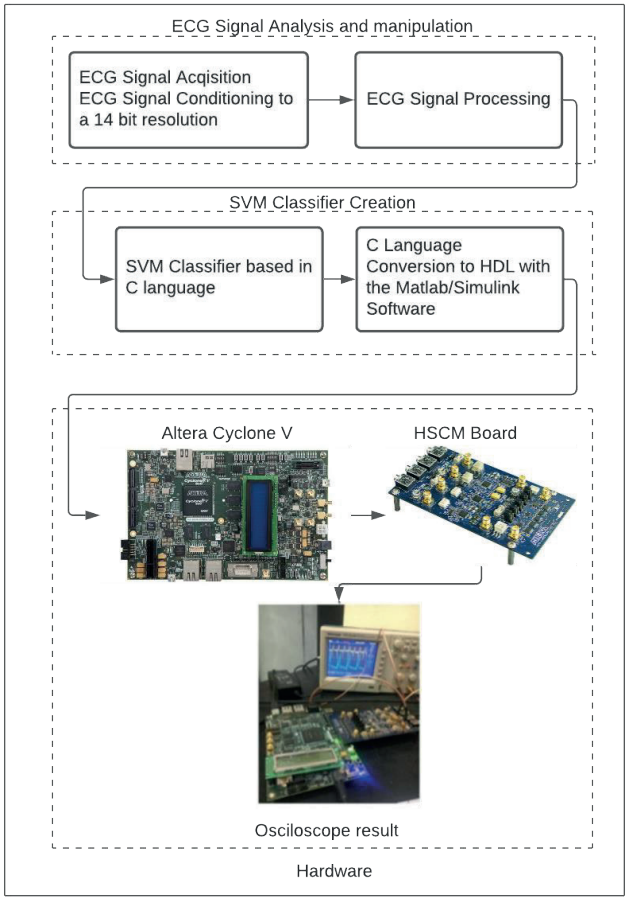


Fig. 5. Block diagram of the hardware implementation.

The block diagram represents the link between the Simulink environment and the physical environment for the transmission of ECG signals. For comparison, the 14 Bit resolution HSMC data acquisition card provides a sample per signal of 16384 parts, giving a high resolution of the developed system. The system allows defining between a "good" signal and a diseased signal. In this way, the distance between the Q and T waves of the two signals is observed.

3. RESULTS

This section presents the results obtained from the SVM classification and the transmission of both signals for a visual comparison. During the programming and creation period of the SVM classifiers, a scatter plot was made where the age of the patients is compared with respect to their gender. This was done with the intention of showing that heart conditions and age are not related. It is concluded that age is not directly related to heart conditions. Fig. 6 graphically shows the relationship between genders and QT waves based on the SVM classifier.

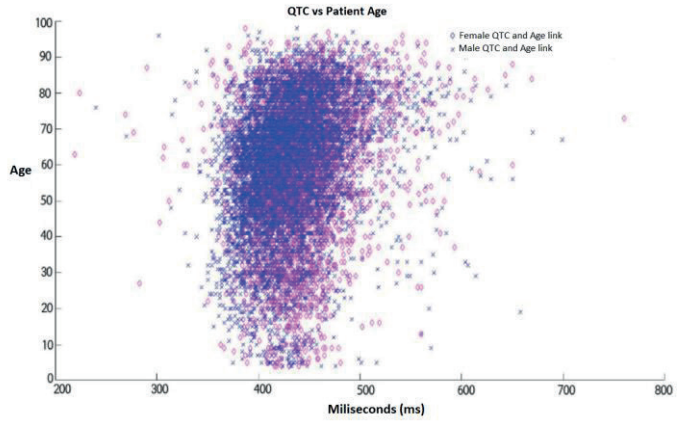


Fig. 6. Dispersion plot of the relationship by gender and QT wave.

It is important to remember that two SVM classifiers were performed since the values differ depending on the gender of the patients. Figs. 7 and 8 show the classifiers made where the QTc values are shown on the x-axis and the 3 possible classes are shown on the y-axis. The first class corresponds to patients with a QTc value referring to the short QT syndrome, the second to a normal QTc value, that is, a healthy ECG signal, and finally, class 3 corresponds to the values of the long QT syndrome.

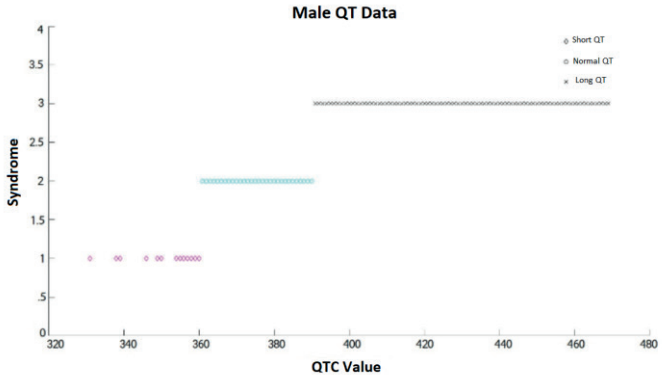


Fig. 7. Multiclass SVM classifier corresponding to male gender

ISSN en trámite

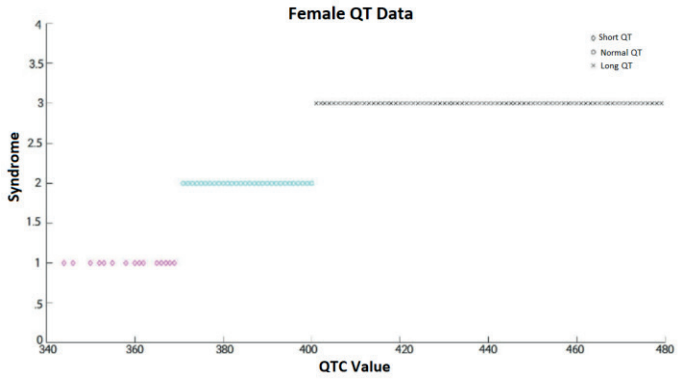


Fig. 8. SVM Multiclass classifier corresponding to female gender

In order to avoid image saturation concerning the comparison made of two signals (a healthy signal and a diseased signal), two cases of comparison between a healthy ECG signal and a diseased ECG signal corresponding to the male gender will be shown. The first corresponds to a signal with short QT syndrome versus a signal without any syndrome. The second case corresponds to an ECG signal with long QT syndrome than a signal without any syndrome.

Figs. 9 and 10 show the hardware implementation of the classification made for two cases under test. The healthy ECG signal is represented in yellow, while the second is an ECG signal with long QT syndrome. The easiest way to appreciate this difference is with the number of cycles of each one of them. It has been stated that a signal with long QT syndrome has a greater distance between its Q and T waves, for which it is possible to determine that it will be repeated fewer times in a certain period. In contrast, a healthy ECG signal will repeat the usual amount of times within that same period.

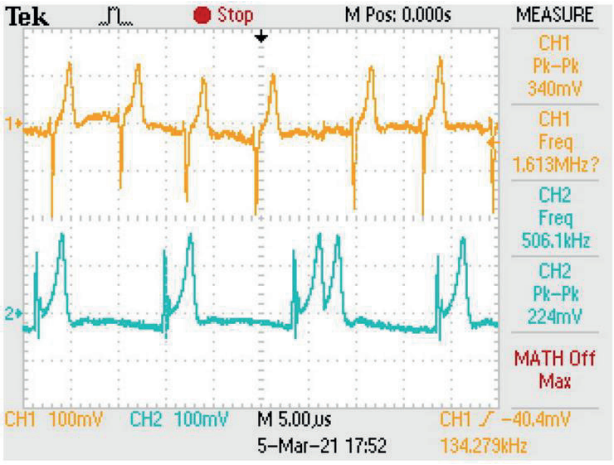


Fig. 9. Overview of the hardware implementation of normal QT wave 1.613 MHz frequency versus long QT wave 506.1 KHz frequency.

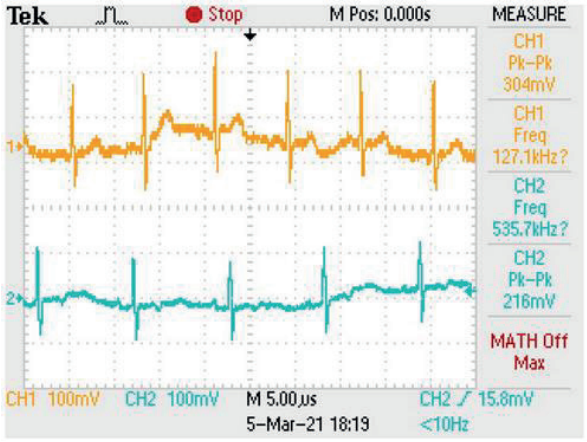


Fig. 10. Overview of the hardware implementation of the normal QT wave frequency 127.1 KHz versus short QT wave frequency 535.7 KHz.

4. DISCUSSION

The ECG signal classification and transmission system were carried out based on the design of an SVM classifier and the hardware implementation of the Cyclone V development board. With the classification for both sexes based on SVM, it is determined that age is not a determining factor to establish the syndrome of short and long QT. The design of the SVM and its hyperplane, in this case, is sufficient to determine the improvement of a patient or not. It is intended that this work developed is the beginning of an RF implementation for telemedicine applications in the post-COVID era, where the core part is the diagnosis and classification of signals that can help a specialized doctor. The use of resources shows a utilization below 1% of the possible logic gates, so there is plenty of systems to implement classifiers in real-time through the use of ECG signal acquisition cards. In the same way, less than 2% of the memory block usage is used for this application. Table 2 shows the use of resources used based on the Quartus Prime evaluation software.

Based on experimental tests, a precision above 93% was obtained. However, it can be improved in the first data filtering stage in the separation between genders and the valuation of the classifier. In the same way, the threshold that defines the separation of the hyperplane in SVM training impacts the precision achieved.

ISSN en trámite

Table 2. Implementation report based on Quartus Prime V12.1 software for the Cyclone V card

Family	Cyclone V
Device	5CEFA7F31
Logic utilization ALMs	351/56 480
Total registers	786
Total pins	40/480
Total block memory bits	129024/7024640
Total PLLs	1/7

5. CONCLUSIONS

The application to process a database and determine if one of the patients has the presence of any of the syndromes directly related to the value of the QT segment (Short QT Syndrome, Long QT Syndrome) was implemented. The hardware emulation was done based on the Cyclone V FPGA card development board and a DAC/ADC acquisition card; the classifier was developed in a graphical environment, and a comparative database was used for the SVM classification process.

As work in the future, it is possible to add a biological signal acquisition stage. This task is possible due to the existence of ADC ports inside the FPGA card. In addition to this, an RF transmission stage can be developed for sensing telemedicine applications in remote places and applications that impact the post-covid area.

The most important part of this project is based on the classification system to detect pathologies based on the lengths of the Qt waves. The implementation in hardware allows us to think about a development for telemedicine applications, the developed system is aligned with the PND (National Development Plan) 2019-2024, and leaves the bases for RF applications in the 2 GHz and 5 GHz bands.

REFERENCES

Davey, P. (2000). Which lead for QT interval measurements? *Cardiology,* volume (94), number (3), pp. 159-164.

Diario Oficial de la Federacion, (2019). *Plan Nacional de Desarrollo*, 2019-2024.

Lee, Leslie, Felmlee, N. (2010). Brugada syndrome. Unmasking a silent killer, *Nursing: Spring 2010*, volume (40), pp. 8-10.

Marquez, S., Rodriguez, J., and De Abajo, S. (2006). Sedentarismos y Salud: Efectos Beneficiosos de la actividad fisica, *Actividad física y salud,* number (83), pp. 12-24.

Rosas-Peralta, M., and Attie, F. (2007). Cardiovascular disease. First cause of death in adults in Mexico and worldwide. *Archivos de Cardiología de México,* volumen (77), number (2), Mexico.

Rudic, B., Schimpf, R. and Borggrefe, M. (2014). Short QT syndrome–review of diagnosis and treatment. *Arrhythmia & electrophysiology review*, volume (3), number (2), pp. 76-79.

Sandeep, R.; Chandra, K. (2017). ECG Signal Analysis Using DCT-Based DOST and PSO Optimized SVM. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. volume (66), number (3), pp. 470–478.

Surawicz, B., et, al. (2009). AHA/ACCF/HRS recommendations for the standardization and interpretation of the electrocardiogram: part III: intraventricular conduction disturbances: a scientific statement from the American Heart Association Electrocardiography and Arrhythmias Committee, Council on Clinical Cardiology; the American College of Cardiology Foundation; and the Heart Rhythm Society. Endorsed by the International Society for Computerized Electrocardiology, *Journal of the American College of Cardiology,* volume (53), number (11), pp. 976-981.

Venkatesan, C., Karthigaikumar, P., Satheeskumaran, S.. and Kumar, R.. Paul. A. (2018). ECG Signal Preprocessing and SVM Classifier-Based Abnormality Detection in Remote Healthcare Applications. *IEEE Access,* volume (6), pp. 9767-9773.

Zheng, J., Zhang, J., Danioko, S., Yao, H., Guo, H., and Rakovski, C. (2020). A 12-lead electrocardiogram database for arrhythmia research covering more than 10,000 patients. *Scientific data,* volume (7), number (48), pp. 1-8.

f

ISSN en trámite

Evaluaciones de legibilidad lingüística en artículos de Wikipedia

Denny Paola Velasco-Márquez[1], Noé Alejandro Castro-Sánchez[2], Héctor Jiménez-Salazar[3] María Yasmín Hernández Pérez[4], Nimrod González Franco[5], Juan Gabriel González Serna[6].

[1,2,4,5,6] Tecnológico Nacional de México campus CENIDET, Cuernavaca, Morelos (e-mail: {[1]m21ce029, [2]noe.cs, [3]yasmin.hp, [4]nimrod.gf, [5]gabriel.gs}@cenidet.tecnm.mx).
[3] Universidad Autónoma Metropolitana, Ciudad de México (e-mail: hjimenez@dccd.mx)

Resumen: Este artículo reporta una experimentación realizada con 30 artículos de Wikipedia en español, para conocer su nivel de legibilidad lingüística a través de distintas evaluaciones. Se tomó como primera evaluación la categorización que realiza Wikipedia a sus artículos; como segunda, la categorización que determinaron 20 lectores distintos; y como tercera evaluación, se usaron cuatro métricas de legibilidad lingüística: Fernández Huerta, Índice de Flesch-Szigriszt, INFLESZ y Legibilidad µ. Los resultados obtenidos permiten concluir que no existe una homogeneidad de resultados entre métricas y que, además, las evaluaciones utilizadas no presentan estrecha relación, es decir, no se aprecian equivalencias entre todas las clasificaciones.

Palabras clave: Legibilidad lingüística, métricas, Wikipedia, lectores, clasificación.

1. INTRODUCCIÓN

La legibilidad es el conjunto de características de los textos que favorecen o dificultan una comunicación más o menos eficaz entre ellos y los lectores, de acuerdo a las competencias de éstos y a las condiciones en que realizan la lectura (Alliende, 1996).

La facilidad de lectura que posee un texto es de relevancia para poder transmitir de manera efectiva el mensaje que el escritor pretende dar al lector. Wikipedia, la gran enciclopedia libre, alberga más de 1 600 000 artículos en español y entre ellos se señalan algunos como poseedores de una calidad buena (Wikipedia, 2020) o una calidad destacada (Wikipedia, 2021).

En este trabajo se presentan distintas evaluaciones aplicadas a determinados artículos de Wikipedia, los cuales se encuentran ya clasificados por la misma Enciclopedia; además de incluir el resultado de las evaluaciones hechas por los lectores y las evaluaciones de los textos generadas a través de algunas de las métricas de legibilidad en español.

2. PROBLEMÁTICA

Las evaluaciones actuales de legibilidad lingüística están dadas por diversas métricas, las cuales de manera independiente nos proporcionan información sobre la comprensibilidad del texto o la edad mínima requerida para poder entenderlo. Sin embargo, las distintas maneras de categorizar los resultados no son homogéneas, lo que complica conocer cuál es la evaluación más certera de un texto.

3. MOTIVACIÓN

La motivación de este artículo es conocer si existe relación o vínculo entre distintas evaluaciones de legibilidad lingüística. Para ello, se utilizan tres puntos de categorización, buscando entre ellas la asociación de relación entre sus categorías, utilizando como base los artículos de Wikipedia, los cuales son categorizados por la misma plataforma, considerando características independientes de las métricas de legibilidad lingüística.

4. OBJETIVOS

4.1 General

Comprobar si existe asociación entre la consideración de los lectores para clasificar los artículos, la clasificación que brindan las evaluaciones de legibilidad lingüística dada por las distintas métricas empleadas y la categorización que Wikipedia da a sus propios artículos.

4.2 Específicos

- Obtener un corpus de textos para la experimentación.
- Normalizar el corpus generado.
- Evaluar la legibilidad de los textos en el corpus a través de: lectores y diversas métricas de legibilidad lingüística.
- Comparar las similitudes de las evaluaciones realizadas.

 ISSN en trámite

5. PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Para verificar si existe relación entre distintos tipos de evaluaciones, se seleccionaron 30 artículos al azar de la enciclopedia de Wikipedia, debido a que esta plataforma web nos permite conocer sus escritos en distintas categorías evaluadas por el mismo. Estos fueron tomados de cada categoría en forma equitativa, es decir, se tomaron diez artículos de cada categoría: destacados, buenos y regulares. Con la ayuda de 20 lectores que poseen un grado de estudios de nivel universitario, se clasificaron estos mismos artículos en tres categorías que determinaron el grado de facilidad de lectura para cada texto. Además, se implementaron los resultados de las evaluaciones de cuatro métricas de legibilidad lingüística: Inflesz (Barrio-Cantalejo et al., 2008), Legibilidad mu (Muñoz, 2006), Fernández Huerta y el índice de perspicuidad Szigriszt Pazos (Pazos, 2001). Estas dos últimas métricas usan la puntuación obtenida con su fórmula para presentar los resultados en función de la edad mínima requerida para la comprensión de un texto.

6. ALCANCES

El experimento consideró obtener artículos de Wikipedia, los cuales fueron tomados de manera proporcional de las categorías regular, bueno, destacado, en la que Wikipedia los clasifica. Además, se conformó un grupo de 20 lectores para evaluar dichos textos y clasificarlos en estas mismas categorías de acuerdo al grado de dificultad de comprensión de los mismos. Cada artículo fue evaluado por al menos tres lectores distintos y por cuatro métricas en español de legibilidad.

7. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

Para el experimento se contó con la participación de 20 lectores. Todos ellos con un grado de estudios superior a preparatoria-bachillerato. Se solicitó clasificar los artículos de Wikipedia en tres categorías: destacados, buenos o regulares, esto de acuerdo con la apreciación que tuvieran al leerlos. Las especificaciones de dichas categorías que recibieron los lectores fueron las siguientes:

1. Artículo destacado: No tuve ningún problema en entender el texto. La redacción es clara y concisa. Comprendí la idea principal del tema. La lectura fue fluida, todas las ideas están bien relacionadas. El vocabulario es amplio, pero no tuve problemas en entender ninguna de las palabras.

2. Artículo bueno: Se me dificultó un poco la lectura. Tuve una o varias razones para no comprender completamente el texto, entre estas puede ser que encontré información que considero innecesaria, algunas ideas en el escrito no las consideré correctamente relacionadas entre sí, el vocabulario no era diverso y podían usar un mejor léxico, entre otras; sin embargo, me quedó una idea del tema.

3. Artículo regular: Me pareció complicado entender el texto. Algunas de las razones pueden ser que el vocabulario es muy poco entendible, las ideas no están relacionadas de manera natural o son muy vagas, la información proporcionada no es concreta, el artículo incluye información que considero innecesaria, entre otras.

Se proporcionaron a los lectores todos los artículos en formato PDF para evitar que accedieran a las versiones en línea, pues de lo contrario podrían sugestionarse con la clasificación que proporciona Wikipedia, la cual está indicada en la esquina superior derecha de cada artículo. Los textos fueron reducidos a dos cuartillas, procurando que se terminará la sección del subtema, lo que eran un aproximado de 970-1010 palabras, para lograr mantener la atención de los lectores en el tema que leían y no les pareciera tedioso leer el texto completo.

Cada artículo fue evaluado por al menos tres lectores distintos, e inclusive, en casos particulares donde los resultados de categorización no tenían coincidencia, se optó por un cuarto evaluador, siendo estos casos mínimos y excepcionales.

Se realizó una segunda fase de experimentación, la cual se realizó con distintas métricas de legibilidad. A continuación, se presentan las métricas con sus respectivas fórmulas:

- Fernández Huerta

$$L = 206.84 - 0.60P - 1.02F \quad (1)$$

L es la lecturabilidad; P, el promedio de sílabas por palabra; F, la media de palabras por frase.

- Índice de perspicuidad de Szigriszt-Pazos

$$P = 206.835 - \frac{62.3S}{P} - \frac{P}{F} \quad (2)$$

P es la perspicuidad; S, el total de sílabas; P, la cantidad de palabras; F, el número de frases.

- Escala Inflesz

$$I = 206.835 - \frac{62.3S}{P} - \frac{P}{F} \quad (3)$$

I es la escala Inflesz; S, el total de sílabas; P, la cantidad de palabras; F, el número de frases.

- Legibilidad mu

$$\mu = \left(\frac{n}{n-1}\right)\left(\frac{\bar{x}}{\sigma^2}\right) \times 100 \quad (4)$$

μ es el índice de legibilidad; n, el número de palabras; $\bar{x}$, la media del número de letras por palabra; σ^2, su varianza.

ISSN en trámite

8. RESULTADOS DEL EXPERIMENTO

En la ***tabla 1*** podemos ver la correspondencia de los artículos utilizados en la experimentación, donde el "Id" es utilizado para hacer referencia a ellos en las siguientes tablas de presentación de resultados.

Tabla 1 Correspondencia de los artículos

Id	Nombre del artículo
1	Agujero negro
2	Apocalipsis
3	Calentamiento global
4	Ciencia y tecnología de la dinastía Song
5	Creencias sobre vampiros
6	Computadora
7	Conato
8	El jardín de las delicias
9	Epistemología
10	Hipocampo
11	Internet
12	Juegos Olímpicos de México 1968
13	Látex
14	Latín
15	Latín vulgar

Id	Nombre del artículo
16	Lingüística
17	Nebulosa Ojo de gato
18	Neurona
19	Ninja
20	Nube
21	Panthera onca
22	Perséfone
23	Planeta extrasolar
24	Química forense
25	Reconocimiento de patrones
26	Red neuronal artificial
27	Sirenia
28	Sushi
29	Tango
30	Triángulo de las Bermudas

En la ***tabla 2*** se presentan los resultados de las evaluaciones en función de la dificultad que se aprecia en los textos de acuerdo a las fórmulas matematicas dadas por las métricas, y las apreciaciones de los lectores, junto con las categorizaciones dadas por Wikipedia. Se puede observar que no existe una incidencia constante que nos pueda permitir concluir que cierto tipo de categorías son equivalentes con otras.

Tabla 2 Legibilidad en escalas de dificultad

Id	Legibilidad					
	Wikipedia	Lector	Fernández Huerta	Szigriszt	INFLESZ	Legibilidad μ
1	Regular	Destacado	Algo difícil	Bastante difícil	Algo difícil	Un poco difícil
2	Destacado	Bueno	Normal	Normal	Normal	Difícil
3	Destacado	Destacado	Algo difícil	Bastante difícil	Algo difícil	Difícil
4	Destacado	Bueno	Algo difícil	Bastante difícil	Algo difícil	Difícil
5	Destacado	Destacado	Algo difícil	Bastante difícil	Algo difícil	Difícil
6	Regular	Destacado	Normal	Normal	Normal	Difícil
7	Bueno	Destacado	Difícil	Bastante difícil	Algo difícil	Difícil
8	Destacado	Regular	Algo fácil	Bastante fácil	Bastante fácil	Un poco difícil
9	Regular	Bueno	Algo difícil	Normal	Algo difícil	Difícil
10	Bueno	Bueno	Normal	Normal	Normal	Un poco difícil
11	Regular	Bueno	Algo difícil	Normal	Algo difícil	Difícil
12	Destacado	Destacado	Algo difícil	Bastante difícil	Algo difícil	Difícil
13	Bueno	Bueno	Algo difícil	Normal	Algo difícil	Difícil
14	Bueno	Destacado	Algo difícil	Normal	Algo difícil	Un poco difícil
15	Destacado	Regular	Normal	Normal	normal	Un poco difícil
16	Regular	Bueno	Algo difícil	Bastante difícil	Algo difícil	Difícil
17	Destacado	Regular	Algo difícil	Normal	Algo difícil	Difícil
18	Bueno	Regular	Algo difícil	Bastante difícil	Algo difícil	Difícil
19	Destacado	Destacado	Algo difícil	Normal	Normal	Difícil
20	Regular	Destacado	Normal	Normal	Normal	Difícil
21	Bueno	Destacado	Normal	Normal	Normal	Un poco difícil
22	Regular	Bueno	Normal	Normal	Normal	Un poco difícil
23	Bueno	Destacado	Algo difícil	Normal	Algo difícil	Difícil
24	Bueno	Destacado	Difícil	Bastante difícil	Muy difícil	Difícil
25	Regular	Bueno	Difícil	Bastante difícil	Algo difícil	Difícil
26	Regular	Bueno	Algo difícil	Bastante difícil	Algo difícil	Difícil
27	Bueno	Regular	Algo fácil	Bastante fácil	Bastante fácil	Un poco difícil
28	Destacado	Bueno	Algo fácil	Bastante fácil	Bastante fácil	Un poco difícil
29	Bueno	Destacado	Algo difícil	Normal	Algo difícil	Difícil
30	Regular	Destacado	Normal	Normal	Normal	Un poco difícil

Tabla 3 Legibilidad en aproximaciones de edad mínima

Id	Wikipedia	Lector	FH	Szigriszt
1	Regular	Destacado	Preuniversitario	Cursos secundarios
2	Destacado	Bueno	7°-8° grado	Popular
3	Destacado	Destacado	Preuniversitario	Cursos secundarios
4	Destacado	Bueno	Preuniversitario	Cursos secundarios
5	Destacado	Destacado	Preuniversitario	Cursos secundarios
6	Regular	Destacado	7°-8° grado	Popular
7	Bueno	Destacado	Cursos selectivos	Cursos secundarios
8	Destacado	Regular	6° grado	12 años
9	Regular	Bueno	Preuniversitario	Popular
10	Bueno	Bueno	7°-8° grado	Popular
11	Regular	Bueno	Preuniversitario	Popular
12	Destacado	Destacado	Preuniversitario	Cursos secundarios
13	Bueno	Bueno	Preuniversitario	Popular
14	Bueno	Destacado	Preuniversitario	Popular
15	Destacado	Regular	7°-8° grado	Popular
16	Regular	Bueno	Preuniversitario	Cursos secundarios
17	Destacado	Regular	Preuniversitario	Popular
18	Bueno	Regular	Preuniversitario	Cursos secundarios
19	Destacado	Destacado	Preuniversitario	Popular
20	Regular	Destacado	7°-8° grado	Popular
21	Bueno	Destacado	7°-8° grado	Popular
22	Regular	Bueno	7°-8° grado	Popular
23	Bueno	Destacado	Preuniversitario	Popular
24	Bueno	Destacado	Cursos selectivos	Cursos secundarios
25	Regular	Bueno	Cursos selectivos	Cursos secundarios
26	Regular	Bueno	Preuniversitario	Cursos secundarios
27	Bueno	Regular	6° grado	12 años
28	Destacado	Bueno	6° grado	12 años
29	Bueno	Destacado	Preuniversitario	Popular
30	Regular	Destacado	7°-8° grado	Popular

ISSN en trámite

En la ***tabla 3*** se presentan los resultados de dos métricas que fueron desarrolladas para poder clasificar los textos en función de estimar las edades mínimas para poder comprender el texto. La apreciación que se tiene en la tabla es que no existe un factor de coincidencia, sin embargo, los artículos que fueron categorizados como "destacados" por los lectores oscilan entre las categorías de "preuniversitario" y "cursos secundarios", de donde no se pueden usar como referencias de equivalencia, debido a que las ponderaciones empleadas en sus fórmulas son bastante diferentes.

9. CONCLUSIÓN Y TRABAJO FUTURO

Los resultados que brindan las métricas empleadas en la experimentación no son homogéneos, lo que complica la tarea de categorizar un mismo texto que se evalúa con distintas métricas.

Se puede concluir que no existe relación estrecha entre las distintas evaluaciones.

Es necesario reconocer que las métricas de legibilidad actuales no son completas, pues las variables que utilizan para su evaluación son pocas y, además, la manera en las que estas han sido probadas no abarcan una amplia variedad de textos, lo que limita el alcance del resultado.

Se pretende generar un experimento más extenso, que involucre un público variado, para poder ver el comportamiento de similaridad entre la categorización de los lectores y los resultados que pronostican las métricas de legibilidad.

El resultado de la experimentación se utilizará en la generación de un algoritmo que pueda realizar una evaluación menos general de la legibilidad, es decir, la evaluación no solo contemplará el texto en su totalidad para asignar una ponderación como las que se realizan actualmente, sino que se pretende segmentar el texto y evaluar estos segmentos de forma individual; contribuyendo de este modo a que el escritor tenga la posibilidad de hacer mejoras a su escrito de manera más rápida y asertiva.

REFERENCIAS

Alliende González f. *La legibilidad de los textos escritos. Santiago*, editorial Andrés Bello, 1994, 287 p. (1996). Revista de Educación (Santiago), 238, 63–63.

Barrio-Cantalejo, I. M., Simón-Lorda, P., Melguizo, M., Escalona, I., Marijuán, M. I., & Hernando, P. (2008). *Validación de la Escala INFLESZ para evaluar la legibilidad de los textos dirigidos a pacientes*. Anales Del Sistema Sanitario de Navarra, 31(2), 135–152.

Muñoz Baquedano Miguel. *Legibilidad y variabilidad de los textos*. Viña del Mar, Chile; 2006.

Pazos, F. S. (2001). *Sistemas predictivos de legibilidad del mensaje escrito: fórmula de perspicuidad*. Universidad Complutense de Madrid.

Wikipedia. (15 de junio de 2020). Wikipedia: Artículos buenos. Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Art%C3%ADculos_buenos

Wikipedia. (09 de enero de 2021). Wikipedia: Artículos destacados. Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Art%C3%ADculos_destacados

ISSN en trámite

Diseño e implementación de un Data Warehouse de información escolar

Diego Armando Mantilla Gutiérrez* Leonardo Nevárez Chávez**
Marisela Ivette Caldera-Franco***

**Tecnológico Nacional de México Campus Chihuahua II, Chihuahua, Chih. 11101 MX (Tel: 442-50-; e-mail: m13550393@chihuahua2.tecnm.mx).*
***Departamento de posgrado, Tecnológico Nacional de México Campus Chihuahua II, Chihuahua, Chih. 11101 MX (Tel: 442-50-; e-mail: leonardo.nc@chihuahua2.tecnm.mx)*
**** Departamento de posgrado, Tecnológico Nacional de México Campus Chihuahua II, Chihuahua, Chih. 11101 MX (Tel: 442-50-; e-mail: marisela.cf@chihuahua2.tecnm.mx)*

Resumen: En la actualidad en instituciones de educación superior, el fenómeno de la deserción académica se ha convertido en una situación en aumento, a causa de la pandemia surgida a partir de la enfermedad denominada SARS-CoV-2 (COVID-19). Llevar a cabo un seguimiento exhaustivo, del rendimiento académico de los alumnos pertenecientes a dichas instituciones, es un reto constante para las autoridades escolares, y para aquellos que conforman el cuerpo de educadores de las distintas áreas educativas. Por lo mencionado con anterioridad se tiene como propósito en esta investigación, diseñar e implementar, un Data Warehouse, a partir de un sistema de gestión de aprendizaje o plataforma LMS (Learning Management System) por sus siglas en inglés, para realizar consultas históricas de las actividades de los alumnos, durante su periodo escolar, y con esto tener la opción de generar modelos de predicción y de Learning Analytics, con la finalidad de realizar un debido seguimiento al rendimiento académico de los estudiantes.

Palabras clave: Data Warehouse, Sistema de gestión de aprendizaje, Rendimiento académico, Modelos de predicción, Bases de datos.

1. INTRODUCCIÓN

Dentro de las instituciones educativas, como en las grandes empresas es común que se lleve a cabo el manejo de aplicaciones, productos tecnológicos, que se enfocan a la administración y conocimiento del medio, a través del análisis de los datos existentes dentro de éstas. Esto es mejor conocido como, Business Intelligence (BI) (CEUPE, 2021), una estrategia que constantemente implica el uso de herramientas capaces de llevar a cabo el registro de grandes volúmenes de información, en un formato único, involucrando dimensiones, jerarquías, hechos y medidas; el conjunto de todos estos requerimientos en acción brinda como resultado un Data Warehouse (DW por su abreviatura) (Bernabeu R., 2020).

El uso del Data Warehouse no es nuevo, al contrario, lleva aproximadamente una vigencia de más de tres décadas, con una evolución significativa en los últimos años (IBM, 2020), agregando capacidades de análisis y herramientas de visualización y presentación de datos, además de contar con la característica de poder ser alojado en un dispositivo dedicado o en la nube (Oracle, 2021), así mismo, los datos a medida de que son manipulados pueden ser limpiados, validados, reorganizados y hasta resumidos (Microsoft, 2019).

La gran ventaja de la implementación del Data Warehouse es notable y fundamental para el manejo de grandes volúmenes de información, en esencia tiene esa capacidad de generar reportes enriquecidos a causa de la diversidad de las fuentes de información. Por tal motivo se planteó la idea, de llevar a cabo el desarrollo de un Data Warehouse, que involucrara directamente la manipulación de la información escolar de los estudiantes, generada en las bases de datos, así como en las bitácoras del sistema de gestión de aprendizaje LMS Moodle (Learning Management System) por sus siglas inglés, del Instituto Tecnológico Nacional de México campus Chihuahua II (TecNM campus Chihuahua II).

El SARS-CoV-2 (COVID-19), nos ha involucrado tanto a estudiantes, como autoridades escolares y profesores, a cambiar nuestro modus vivendi, abriendo camino a una era escolar-digital, en la cual, las brechas existentes entre la educación clásica en aulas y la educación digital en casa, sacaron a flote los problemas que muchos suponían desde el inicio de este nuevo estilo educativo; primero la constante lucha de aquel docente que no está relacionado con el manejo de las tecnologías actuales, y segundo, lo más importante, la capacidad de aprendizaje, constancia e interés del educando, por recibir clases a través del medio digital.

ISSN en trámite

Tanto para alumnos y maestros, no fueron sorpresa, las distintas complicaciones que se presentaron, desde el comienzo de los semestres virtuales, desde problemas de carácter socioeconómico, y en una mayor medida aquellas cuestiones que causaban un bajo desempeño escolar en los alumnos, puesto que muchos, no terminaron de familiarizarse con este método de enseñanza. Se comenzó a visualizar de manera casi inmediata la repercusión de todas estas problemáticas, desde alumnos que preferían darse de baja de forma temporal, alumnos que repetían sus cursos a causa del bajo rendimiento escolar, hasta aquellos alumnos que dejaron en su totalidad sus estudios en curso, lo que se conoce como deserción escolar. Está claro que llevar un seguimiento del desempeño de cada alumno que cada profesor lleva bajo su tutela, es una tarea muy complicada, y aunado a esto, no saber por dónde comenzar a atacar el conflicto del bajo rendimiento escolar y los problemas de aprendizaje, para cada educando, que a la par lleva un ritmo único de rendimiento, sería en verdad difícil.

Es a causa de todo esto, que, en este trabajo, se hace uso del LMS Moodle del TecNM campus Chihuahua II, como fuente de datos principal, para el desarrollo de un DW que permita generar a futuro modelos de Learning Analytics, con la finalidad de identificar a aquellos alumnos con bajo rendimiento académico, tratando de evitar principalmente la deserción escolar. Pero por qué el uso del LMS Moodle para el desarrollo de este proyecto, la respuesta a esto, es que al ser un sistema de gestión de aprendizaje, es capaz de ser manipulable por los profesores, para llevar a cabo sus cursos, subir actividades ricas en variedad, monitorear las interacciones de los alumnos con sus tareas, emplear foros para las recomendaciones de los alumnos, generar exámenes, calificarlos, entre otros; y con todo esto reflejado en una base datos y en bitácoras generadas por este sistema de gestión de aprendizaje, realizar el desarrollo de un Data Warehouse que centralice todo ese volumen de información en un solo formato, manipulable a través del tiempo, es como encontrar la herramienta ideal, del monitoreo de los alumnos con bajo rendimiento para su atención inmediata.

1.1 ¿Por qué un Data Warehouse?

Con anterioridad investigadores, han desarrollado trabajos haciendo uso de DW, con un propósito en el medio educativo, por ejemplo, en el artículo titulado Análisis de rendimiento académico estudiantil usando Data Warehouse Difuso (Zambrano Matamala, et al., 2017), se implementó un Data Warehouse que operaba con medidas difusas, hechos difusos, relaciones difusas y niveles difusos, para el análisis cualitativo de datos educacionales dentro de una institución educativa. Proyectos como el anteriormente mencionado, reflejan lo versátil que puede llegar a ser el uso de DW dentro de las escuelas, para la manipulación de información en distintos niveles.

Un DW no es la única herramienta existente en la actualidad, para manipular información de grandes volúmenes; En el caso de este proyecto, el procesamiento, manipulación y consulta de datos a través del tiempo, es uno de los principales ejes para la implementación de un sistema que generará consultas históricas, a partir de las cuales se podrán llevar a cabo implementaciones de modelos de predicción y de Learning Analytics de un gestor LMS Moodle (Cantabella, et al., 2019).

Es natural pensar que herramientas como Bases de Datos (DB), Data Marts o Data Lakes (Lagos de Datos), podrían ser opciones viables para llevar a cabo los objetivos que este proyecto involucra, sin embargo, si se ahonda con mayor detalle en las capacidades de cada herramienta, y se realiza un análisis entre estos sistemas de gestión de datos, se visualiza la opción que mejor se adhiere a las necesidades del proyecto.

Si se resume en palabras sencillas, una base datos es un repositorio de información organizada o datos estructurados, que comúnmente, tiene un propósito transaccional, de datos sin procesar, esta es una de las primeras diferencias que tiene con un DW, puesto que éste último no tiene a las transacciones como prioridad, sino el análisis de datos, también es normal que las DB se ocupen para albergar principalmente información actual, en cambio un DW, alberga información tanto histórica como actual, un requerimiento necesario para este proyecto, ya que se pretende analizar información escolar de alumnos de semestres distintos, las DB capturan datos de una fuente primaria, mientras que un DW proporciona información de distintas fuentes, una ventaja más, ya que al hacer uso del LMS Moodle, se tienen datos de las bitácoras que éste genera, así como de sus propia base de datos interna, es decir fuentes distintas en información.

El Data Mart tiene mayor similitud a un DW, puesto que tendrá listos datos para su posterior análisis, sin embargo, son un repositorio de datos esenciales, para pequeños grupos específicos, por esto tienen un alcance reducido, y sus datos de almacenamiento provienen de un DW, es decir los Data Marts son fracciones de un DW (Segal, 2021).

Por su parte un Data Lake al igual que un DW puede almacenar y procesar una gran cantidad de datos de fuentes distintas, pero la tecnología utilizada para la manipulación de un Lago de Datos es más compleja y especializada, para aprovechar sus capacidades al máximo. En un DW los almacenes de datos son usados con el fin de generar informes de análisis, para los usuarios, en cambio los Data Lakes regularmente son utilizados para realizar análisis más profundos en tiempo real, que van más allá de sus datos almacenados, todo esto particularmente de la mano de procesos de aprendizaje automático.

Para fines del proyecto, después de realizar el análisis debido, un DW con todas sus ventajas, capacidades, y utilidades, es la herramienta que mejor se ajusta, para el cumplimiento del objetivo principal de este trabajo, realizar consultas históricas, para posteriormente generar modelos de Learning Analytics a partir de informes de análisis generados por los usuarios.

ISSN en trámite

2. DESARROLLO

Para llevar a cabo el proyecto de DW, se consideró como alternativa, desarrollar la metodología Hefesto, (Bernabeu R., 2020), una metodología enfocada totalmente, punto por punto, en el desarrollo de Data Warehouse, desde las bases hasta su implementación como se muestra a continuación (Fig. 1).

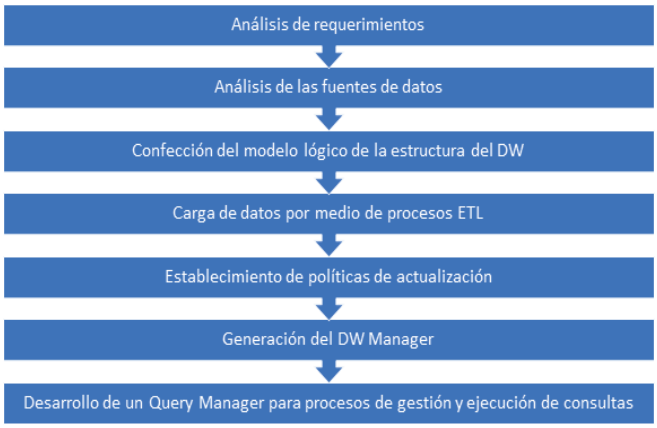


Fig. 1. Representación Metodología Hefesto.

Para visualizar de forma más sencilla el proceso general para desarrollar un DW, se muestra el siguiente prototipo del proyecto (Fig. 2), adaptado a las necesidades de este trabajo, a partir del diagrama original obtenido del artículo titulado Learning Analytics Framework for Adaptive E-learning System to Monitor the Learner's Activities (EL Janati, et al., 2019).

2.1 Análisis de requerimientos

Para dar inicio al desarrollo del proyecto de DW primero se llevó a cabo un análisis de requerimientos. En primera instancia se realizó una investigación sobre como el SARS-CoV-2 (COVID-19), estaba afectando el desempeño escolar estudiantil, esto por medio de los docentes de la institución educativa, las redes sociales propias de la institución, artículos de periódicos digitales, y por voz de los propios alumnos.

Una vez que se estableció cuál era la problemática que se abordaría, se realizaron análisis de documentación existente y vigente, se propuso que necesidades tendrían que cubrirse, que herramientas se utilizarían para cubrirlas satisfactoriamente, se planeo el tiempo en que se desarrollaría el proyecto, se fijaron, objetivos, alcances y las limitaciones.

2.2 Análisis de fuentes de datos

Se realizó un análisis de datos pertenecientes al LMS Moodle, particularmente de grupos de estudiantes, que cursaron la materia de Programación web en semestres distintos. Posteriormente se descargó la bitácora completa generada por el sistema (en un tipo de archivo separado por comas csv); la problemática en este punto era el gran volumen de información (un poco más de cuatro millones de registros aproximadamente), para su manejo óptimo, por lo que se decidió utilizar una herramienta de división de documentos, en este caso, una aplicación de tipo ejecutable (.exe), llamada Large File Splitter, dejando así la bitácora particionada en

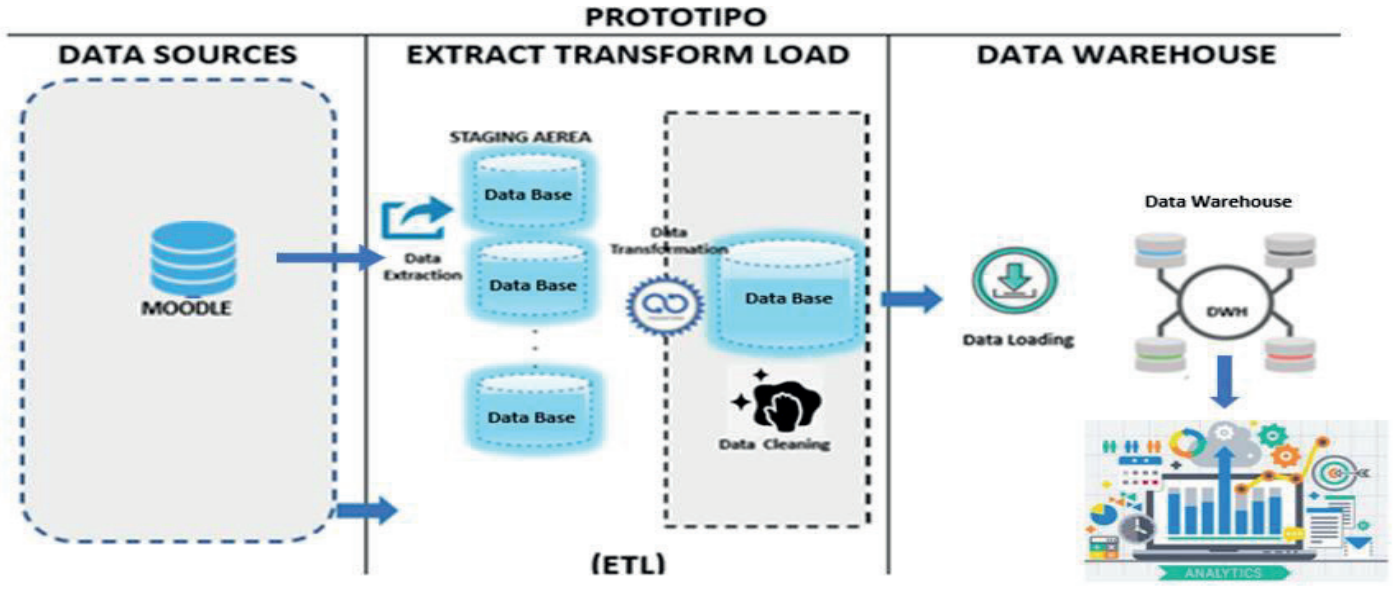


Fig. 2. Prototipo del proyecto de DW.

ISSN en trámite

varios fragmentos de peso menor y más equitativo, para una manipulación más sencilla y una pérdida de datos mínima al ejecutar los archivos de la bitácora. En la Fig. 3 se pueden observar algunos de los registros pertenecientes a la bitácora, separados en categorías, como la hora, el nombre completo del usuario, el usuario afectado, un componente, un nombre de evento, una descripción, el origen y la dirección IP respectivamente, por cada usuario registrado.

	Hora	Nombre completo del usuario	Usuario afectado	Contexto del evento	Componente	Nombre del evento	Descripción	Origen	Dirección IP
2	20/08/20, 13:45	ALINA GUADALUPE MACIAS DORADO	-	Curso: ANALISIS CRITI	Sistema	Curso visto	The user with id '5377' viewed the course with id	web	177.236.40.24
3	20/08/20, 13:45	JUANA SARMIENTO ALVAREZ	-	Curso: Taller Inv I Ago	Sistema	Curso visto	The user with id '3661' viewed the course with id	web	189.237.216.7
4	20/08/20, 13:45	JUANA SARMIENTO ALVAREZ	-	Archivo: Reglas del cu	Sistema	Módulo de curso actualizado	The user with id '3661' updated the 'resource' act	web	189.237.216.7
5	20/08/20, 13:45	ALINA GUADALUPE MACIAS DORADO	-	Curso: ANALISIS CRITI	Sistema	Curso visto	The user with id '5377' viewed the course with id	web	177.236.40.24
6	20/08/20, 13:45	JONATHAN ALEJANDRO GONZALEZ MA	JONATHAN ALEJAND	Curso: 20-2 Investigac	Sistema	Perfil de usuario visto	The user with id '4118' viewed the profile for the	web	177.236.37.119
7	20/08/20, 13:45	JONATHAN ALEJANDRO GONZALEZ MA	-	Sistema	Sistema	El usuario ha ingresado	The user with id '4118' has logged in.	web	177.236.37.119
8	20/08/20, 13:45	ALINA GUADALUPE MACIAS DORADO	-	Curso: PENSAMIENTO	Sistema	Curso visto	The user with id '5377' viewed the course with id	web	177.236.40.24
9	20/08/20, 13:45	ALINA GUADALUPE MACIAS DORADO	-	Curso: PENSAMIENTO	Sistema	Curso actualizado	The user with id '5377' updated the course with id	web	177.236.40.24
10	20/08/20, 13:45	SANDRA ABIGAIL HERNANDEZ TORRES	-	Sistema	Sistema	Usuario ha salido	The user with id '4267' has logged out.	web	189.237.69.24
11	20/08/20, 13:44	JUANA SARMIENTO ALVAREZ	-	Curso: Taller Inv I Ago	Sistema	Curso visto	The user with id '3661' viewed the course with id	web	189.237.216.7
12	20/08/20, 13:44	ANGELA JACKELINE ANDREW MARRUF	-	Portada	Sistema	Curso visto	The user with id '4428' viewed the course with id	web	177.236.15.147
13	20/08/20, 13:44	JUANA GARCIA SEAÑEZ	-	URL: Temarios	URL	Módulo de curso visto	The user with id '3720' viewed the 'url' activity wi	web	189.237.22.43
14	20/08/20, 13:44	JONATHAN ALEJANDRO GONZALEZ MA	-	Curso: 20-2 Investigac	Sistema	Curso visto	The user with id '4118' viewed the course with id	web	177.236.37.119
15	20/08/20, 13:44	JONATHAN ALEJANDRO GONZALEZ MA	JONATHAN ALEJAND	Curso: 20-2 Investigac	Sistema	Miembro de grupo añadido	The user with id '4118' added the user with id '411	web	177.236.37.119

Fig. 3. Bitácora del LMS Moodle como archivo csv.

A continuación, se procedió a cargar los archivos separados por comas, de la bitácora ya dividida, a una base de datos creada previamente con los campos nombrados de la misma forma, que, en la bitácora, todo esto haciendo uso de phpMyAdmin (Fig. 4), con la finalidad de tener almacenada la información para su manipulación posterior.

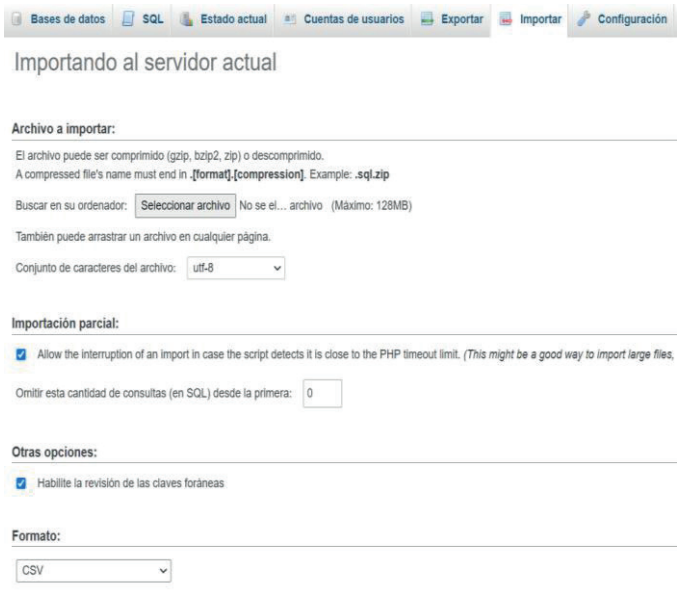


Fig. 4. Carga de archivos csv a phpMyAdmin.

Una vez cargados los archivos en la base de datos, comenzó la limpieza de la información, transformando ésta a formatos únicos dependiendo el campo.

Un ejemplo de cambio de formato, se puede observar en los registros de tipo DATETIME mostrados en la Fig. 5 por ejemplo, haciendo uso de sentencias SQL por medio del sistema de gestión MySQL, incorporado en phpMyAdmin.

```
Conversion del campo hora, tiene el formato de:
"18/08/20, 02:03"

dia/mes/año, hora:minuto

por lo que la sentencia de conversión debe ser:

update table
set hora = STR_TO_DATE(hora,'%d/%m/%Y, %H:%i')
where 1
```

Fig. 5. Ejemplo de sentencia SQL para el cambio de formato de registro.

El proceso de la limpieza de la información es un punto clave dentro del desarrollo del DW, puesto, que como se ha mencionado con anterioridad, al ser fuentes de información distintas, con tipos de datos diferentes, los procesos de carga posteriores, exigirán que la información tenga coherencia, haya sido transformada y sea de relevancia, para el correcto funcionamiento de las consultas históricas, esto es parte del proceso denominado ETL (Extract Transform and Load), o proceso de extracción, transformación y carga.

Por otro lado, en el LMS Moodle se generaron más actividades para la clase de Programación web, como se puede observar en la Fig. 6, que permitieron observar información reciente reflejada en su base datos principal, esto con el propósito de realizar un análisis más profundo sobre la manera, en que se encontraban relacionadas las tablas de esta DB.

La DB de Moodle es una estructura compleja de tablas (Fig. 7) relacionadas, por categorías específicas, se pueden encontrar desde categorías de usuarios, inicios de sesión, cuestionarios, calificaciones, mensajes, foros, grados, roles, grupos, herramientas de trabajo propias de Moodle, eventos,

ISSN en trámite

enrolamientos a cursos, cursos, competencias, respaldos y una de las más importantes, analíticas.

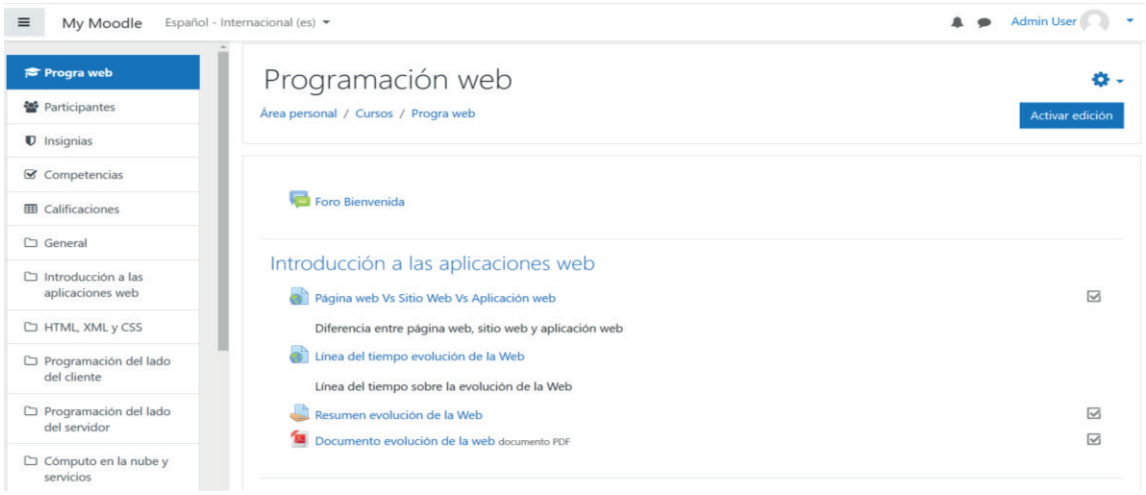


Fig. 6. LMS Moodle Curso de programación web.

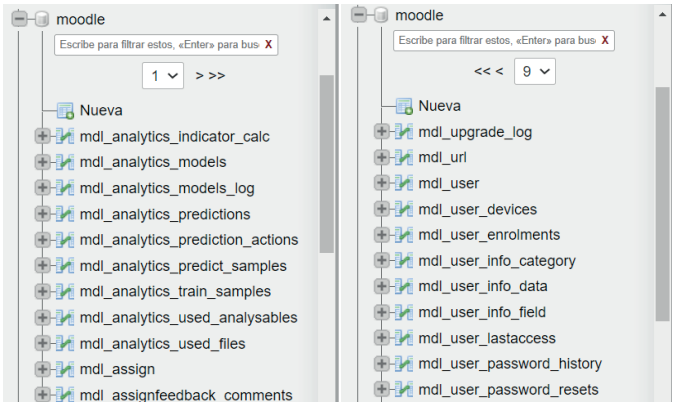


Fig. 7. Tablas de la DB de Moodle.

2.3 Confección del modelo lógico de la estructura del DW

Haciendo uso de toda la información recabada, se procedió a realizar otra de las actividades primordiales del DW, generar el modelo lógico, en este caso, dos modelos de estrella, con los campos más relevantes de las fuentes de información, que el LMS Moodle brindó con anterioridad. En conjunto éstos dos modelos, dieron como resultado un esquema de constelación (Figura8). Este esquema, será la base necesaria tentativamente, para realizar el cubo de procesamiento analítico en línea (OLAP), con el cual se podrá llevar a cabo la implementación final de un DW basto de información. Cabe mencionar que cada modelo de estrella tiene su respectiva tabla de hechos con campos clave; la primera tabla de hechos es la que se muestra en la parte media superior de la Fig. 8, dicha tabla lleva por nombre AlumnosActividades", y se encuentra relacionada a las tablas de dimensiones: Semestres, Materias, Cursos Moodle, Profesores y Alumnos; estas tablas de dimensiones determinan los parámetros de los que dependen los hechos (IBM InfoSphere, 2020). Si cada tabla de dimensión se examina con detenimiento, es posible encontrar que cuentan con sus respectivas llaves primarias, las cuales se verán reflejadas como llaves foráneas en la tabla de hechos a la que se relacionan, así mismo cuentan con sus respectivos campos, de los cuales se extrae la información necesaria para tener datos más detallados por cada registro consultado.

La tabla de hechos por su parte además de las llaves foráneas mencionadas con anterioridad, también cuenta con su respectiva llave primaria, y sus eventos principales, que son los registros que permitirán realizar las consultas históricas con un nivel de detalle más preciso.

El segundo diagrama de estrella que forma parte del esquema de constelación, tiene como tabla de hechos, aquella que se ubica en la parte media inferior de la Fig. 8, y lleva por nombre "CursoMoodleActividades", de igual forma que la primera tabla de hechos, ésta también se relaciona con las mismas tablas de dimensiones, cuenta con sus llaves foráneas, así como son su propia llave primaria y sus eventos principales.

Cabe destacar que el modelo lógico propuesto en este punto, es una primera versión, que integra información de importancia de la bitácora y los datos más relevantes encontrados hasta este momento, en la extensa fuente de información de la DB de Moodle, por medio de ejecución de sentencias SQL, con procesos básicos de extracción y transformación de datos, como los ya mencionados con anterioridad. Es viable aún seguir procesando información, y ahondar en la parte analítica, del LMS Moodle, es decir las tablas que alberga el esquema Analytics de la DB principal, con un mayor nivel de detalle. De ser necesario el modelo lógico podría estar sujeto a cambios, para generar versiones posteriores.

ISSN en trámite

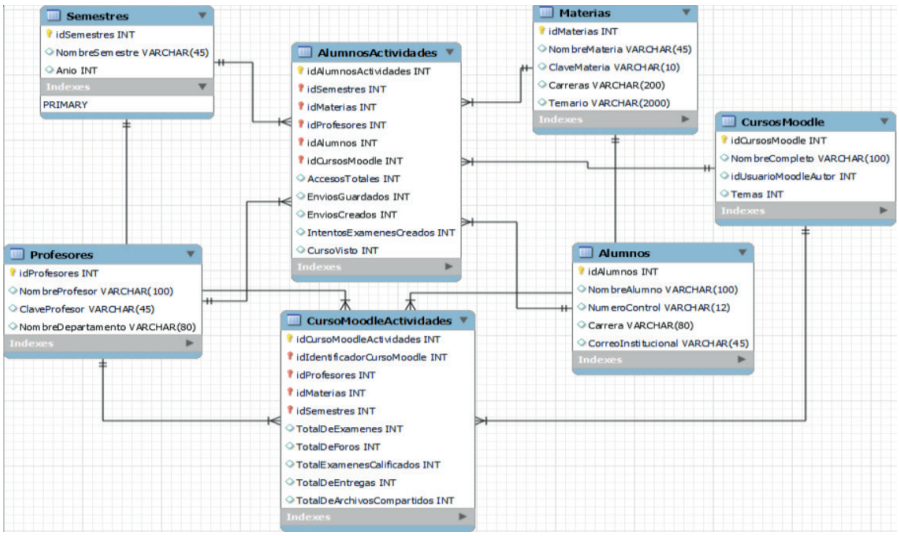


Fig. 8. Esquema de constelación del DW.

3. CONCLUSIONES

Ahora que se ha visto todo lo anterior, cabe mencionar que el proyecto continúa en las últimas fases de desarrollo, de acuerdo a la metodología propuesta inicialmente, el punto actual del DW se sitúa, en la preparación para iniciar la carga de datos procedentes del proceso ETL anteriormente realizado. Los problemas que se han solventado a estas instancias del proyecto, han sido la constante extracción de datos de las fuentes, bitácora y la DB, del LMS Moodle, así como la transformación y procesamiento de los datos en formatos compatibles, ya que esto genera un orden en la información, que permite tener registros históricos de los estudiantes de la institución educativa, registros de suma importancia que reflejan un comportamiento inicial, de los educandos, en torno a su desempeño escolar; esto muestra un resultado positivo del desarrollo del proyecto, pues gracias a la información recabada, se pudo generar el primer modelo lógico de constelación. Aunque se sigue procesando información, el modelo lógico planteado, es confiable para llevar a cabo la generación del DW; lo único que se busca en ahondar con insistencia, en el esquema Analytics de la DB de Moodle, es finalizar con la comprobación, de que se cubrieron hasta los mínimos detalles de extracción de la información relevante, para que al momento de que el DW entre en vigor, se puedan generar modelos de Learning Analytics enriquecidos; por esta razón se mencionaba que puede haber una segunda versión del modelo lógico en caso de ser necesario.

REFERENCIAS

Bernabeu R., D. (2020). *Soluciones Informáticas*. Recuperado el 2021, de Troyanx Soluciones Informáticas: https://troyanx.com/

Cantabella, M., Martínez-España, R., Ayuso, B., Yáñez, J. A., & Muñoz, A. (2019). Analysis of student behavior in learning management systems through a Big Data framework. *Elsevier*, 262-272.

CEUPE. (2021). *CEUPE magazine*. Recuperado el 2021, de https://www.ceupe.com/blog/que-es-el-business-intelligence.html

EL Janati, S., Maach, A., & El Ghanami, D. (2019). Learning Analytics Framework for Adaptive E-learning System to Monitor the Learner's Activities. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 10*(8), 275-284. Obtenido de www.ijacsa.thesai.org

IBM. (2020). *IBM*. Obtenido de IBM: https://www.ibm.com/mx-es/analytics/data-warehouse

IBM InfoSphere. (2020). *IBM Documentation*. Recuperado el 2020, de https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/es/SS9UM9_9.1.2/com.ibm.datatools.dimensional.ui.doc/topics/c_dm_dim_table.html

Microsoft. (2019). *Microsoft Docs*. Recuperado el 20 de Noviembre de 2021, de https://docs.microsoft.com/en-us/azure/architecture/data-guide/relational-data/data-warehousing

Oracle. (2021). *Oracle*. Obtenido de https://www.oracle.com/es/database/what-is-a-data-warehouse/

Segal, M. (2021). *ZUAR*. Recuperado el 2021, de https://www.zuar.com/blog/data-mart-vs-data-warehouse-vs-database-vs-data-lake/

Zambrano Matamala, C., Urrutia Sepúlveda, A., & Varas Contreras, M. (2017). Análisis de rendimiento académico estudiantil usando Data Warehouse Difuso. *Revista chilena de ingeniería, 25*(2), 242-254. Obtenido de https://scielo.conicyt.cl/pdf/ingeniare/v25n2/0718-3305-ingeniare-25-02-00242.pdf#page=6&zoom=auto,-194,158

ISSN en trámite

CREACIÓN DE MÓDULO PARA ERP CON CONEXIÓN A HARDWARE ESPECIALIZADO UTILIZANDO PROTOCOLOS DE COMUNCACIÓN TCP/IP

**Cristóbal Rodríguez Sandoval, Carlos Pérez Corona,
José Crispín Hernández Hernández[1], José Federico Ramírez Cruz,
Eduardo Sánchez Lucero.**

TecNM/Instituto Tecnológico de Apizaco, Apizaco - Calzada Tecnológica s/n. Tzompantepec, Tlaxcala, Mex. C.P. 90300 (crisrodrisando@gmail.com, carlos.pc@apizaco.tecnm.mx, crispin.hh@apizaco.tecnm.mx federico.rc@apizaco.tecnm.mx, eduardo.sl@apizaco.tecnm.mx)

Abstract: La visión de este trabajo se centra en mostrar la importancia de proponer aportaciones que ayuden a la salida del rezago tecnológico a través de lo que es la unión del hardware y software enfocado al Internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés), describiendo los resultados del proyecto del que se habla en este trabajo, el cual está enfocado a crear una conexión entre hardware especializado, que la empresa Microside Technology S.A. de C.V. fabrica para distintos objetivos como son medición de temperatura, humedad, luz, control de maquinaría, etc, y un sistema de Planificación de Recursos Empresariales (ERP, por sus siglas en inglés) utilizando protocolos de comunicación TCP/IP, obteniendo de manera directa información desde los sensores, dando como resultado la obtención de datos importantes en tiempo real útiles para optimización de tiempos.

***Keywords**:* Internet de las cosas, Sistema de Planificación de Recursos Empresariales (ERP), protocolo, TCP/IP, Hardware Especializado, Sensores, Módulo.

1. INTRODUCCIÓN

Este artículo describe el trabajo realizado en la empresa Microside Technology SA de CV, empresa que se ha interesado mucho en apoyar la innovación tecnológica, incursionando en áreas diferentes a su ramo de la electrónica, debido a que es una empresa dedicada al diseño e implementación de hardware especializado para empresas que lo requieran, este proyecto unió este conocimiento en conjunto con las TI (Tecnologías de la Información), un área que se complementa perfectamente.
Microside Technology SA de CV, es una empresa especializada en hardware que tiene el compromiso de ofrecer productos tecnológicos que faciliten la vida y den gran rentabilidad a sus clientes, con lo cual quieren ser conocidos de maneral mundial como empresa líder en tecnologías que genera satisfacción a través del uso de sus productos, y para alcanzar esto, implementan el uso de las tecnologías de vanguardia para que sus clientes cumplan sus metas personales y profesionales, y gracias a esta filosofía, es que han decidido incluir dentro de sus servicios y productos, tecnologías que cuenten con el apoyo de nuestra experiencia que es TI, en una colaboración equilibrada y armonía entre hardware y software. Si a esto le damos la capacidad de tener una identidad en el mundo digital, de sensar el entorno donde existe, conectarse a una red, un nivel de procesamiento autónomo y la forma de comunicarse con otros dispositivos [2], estamos definiendo y enfocando nuestro dispositivo al mundo del Internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés).

El objetivo de este trabajo se centró en plasmar la importancia de proponer aportaciones que ayuden a la salida del rezago tecnológico a través de lo que es la unión del hardware y software enfocado al IOT, más específicamente el proyecto del que se habla en este trabajo trata de crear una conexión entre un sistema de Planificación de Recursos Empresariales (ERP, por sus siglas en inglés) y hardware especializado, que la empresa Microside fabrica para distintos objetivos como son medición de temperatura, humedad, luz, etc, utilizando protocolos de comunicación TCP/IP, obteniendo de manera directa información desde los sensores, sin necesidad de que alguna persona esté registrando manualmente todo, y evitando el uso de dispositivos que sirven como puente (gateway) entre el hardware especializado y el ERP de código abierto.
Un ERP permite a una empresa gestionar tanto recursos materiales como humanos, llevar una administración sobre procesos internos, ventas, inventarios, relación con clientes, contabilidad, entre otros, al igual que planificar con agilidad acciones para el futuro de la empresa [4]. En el desarrollo de este proyecto se utilizó un ERP de código abierto y modular, lo cual permite que todo aquel usuario interesado en desarrollar o implementar una nueva función o proceso de negocio al sistema de interés, sin la necesidad de realizar una requisición a desarrolladores de proyectos, y sobre todo sin pagar por ello. Esto permite que, con solo conectar el hardware apropiado a la red desde un punto de acceso, se podrá comunicar directamente con la base de datos del ERP para comenzar a transmitir, el usuario solo tendrá que consultar los datos que desee desde cualquier dispositivo.

2. ANTECEDENTES

2.1. ERP (Enterprise Resource Planning)

Desde los comienzos del software para manufactura entre los años 60s y 70s, muchas organizaciones utilizaron sistemas simples de inventario conocidos como Sistemas de Planeación y Requisición de Material (Material Requierement Planning

ISSN en trámite

MRP), los cuales permiten hacer un estimado del uso de la materia prima con relación a la producción. Pero fue hasta los años 90s, que después del incidente del Y2K (error del año 2000 o error del milenio), las empresas empezaron a utilizar los sistemas ERP (Sistemas de planificación de recursos empresariales) como su sistema de planificación y administración, permitiéndoles llevar un mejor control de costos y planificar de una manera más eficiente. Un sistema ERP consiste en una base de datos central, un modelo de procesos y un sistema de control central. Con este sistema, múltiples tareas pueden realizarse en paralelo como el manejo financiero, administración de recursos humanos, el manejo de la cadena de suministro entre otros [4]. Todo está integrado en un solo sistema, con el cual se puede acceder a la información desde cualquier parte. Con un sistema ERP el desempeño de una empresa puede mejorar a gran escala por la gran facilidad y accesibilidad a los datos generados para su posterior análisis, dando una mejora sustancial en la planificación a futuro.
Sin embargo, una solución ERP tiene algunos problemas y retos como, la integración tediosa y tardada de diferentes componentes adicionales, el uso de recursos innecesarios en la mayoría de ellos, ya que traen herramientas que son predeterminadas del mismo sistema, pero que el usuario final muy probablemente no utilice y sobre todo los costos elevados por actualización del sistema y de creación e implementación de nuevos componentes que el usuario tiene que solicitar al proveedor.
A consecuencia de esto, se propone una solución con un ERP de código abierto y modular, con todas las características de un ERP comercial, con las ventajas que el usuario puede solicitar solo las herramientas que realmente necesita, como el módulo de contabilidad, el de producción, el CRM (Administrador de relaciones con clientes), el de inventario, entre otros; posteriormente, el usuario final puede agregar más módulos si es que así lo requiere, ya sea solicitándolos al proveedor o descargándolos desde una tienda virtual; o en su caso, algún desarrollador de software puede hacer modificaciones o crear el módulo que requiera el usuario.

2.2. Protocolo TCP/IP

El protocolo TCP/IP encargado de permitir la comunicación entre dos computadoras en internet, estará compuesto por dos partes, TCP (Protocolo de control de transmisión) es la capa que se encarga del empaquetado en pequeñas unidades de la cadena de información (mensaje) que queremos mandar, y la capa IP que es la dirección única a la que se desea mandar la información. [4] De forma sencilla, TCP es como la estación de correos donde se encargan de organizar las cartas y paquetes que una persona quiere enviar a un destinario, y la IP es la dirección física donde vive ese destinatario.

Ahora bien, teniendo lo anterior claro, es necesario mencionar que TCP/IP está compuesto básicamente por dos tipos de protocolos básicos: TCP y UDP. Estos protocolos tienen fundamentalmente la función similar para la transferencia de datos, sin embargo, ambos difieren en cómo, la conexión inicial entre los hosts es establecida.
Para entender de manera rápida el funcionamiento del protocolo TCP, se debe comprender que este protocolo es orientado a conexión o protocolo de confianza, ya que se tiene la certeza de que la información enviada llegará al host destino de manera intacta. La operación básica de este protocolo esta descrita en los siguientes tres pasos [5]:

1. Envío de un paquete sincronizado con un número inicial para secuencia.
El host A quiere establecer una conexión con el Host B. A envía un paquete a B con un bit de sincronización el cual anuncia la nueva conexión y el número inicial de secuencia para permitir el seguimiento de los paquetes.
2. Permitir al host remoto responder con un "Reconocimiento".
El host B responde a la solicitud con un bit de sincronización al igual que con un bit de reconocimiento, paquete que es enviado al host A.
3. Completar negociación enviando un "Reconocimiento final" al host remoto.

En este punto el Host A envía de regreso un paquete final de reconcomiendo y una secuencia de números final que indican que la recepción fue satisfactoria o la conexión esta lista para el flujo de datos. [6]

2.3. Hardware Especializado

Como una pequeña recapitulación de que es hardware, la Real Academia Española [7] define al hardware como el conjunto de los componentes que conforman la parte material (física) de una computadora, a diferencia del software que se refiere a los componentes lógicos (intangibles). Sin embargo, el concepto suele ser entendido de manera más amplia y se utiliza para denominar a todos los componentes físicos de la tecnología, y normalmente se distingue entre hardware básico (los dispositivos necesarios para iniciar el funcionamiento de un ordenador o dispositivo) y complementario (realizan ciertas funciones específicas, como los sensores).

La tecnología de la microelectrónica ha dado un impulso tan espectacular a la arquitectura de los ordenadores que en pocos años ha cambiado varias veces la magnitud de sus prestaciones y su complejidad [8]. Viendo a la microelectrónica en el área industrial, están todas las tarjetas controladoras de maquinaria, encargadas de llevar cada proceso por tiempos específicos, movimientos exactos, todo esto gracias a los microcontroladores y sensores incorporados en las tarjetas antes mencionadas y como la implementada en este proyecto.

La tarjeta que se implementó para este proyecto tiene tres componentes importantes: **el microcontrolador** es la unidad de procesamiento, encargado del control, cálculos, y comunicación con otros componentes de las tarjetas, como los sensores, los cuales son dispositivos capaces de detectar condiciones físicas o químicas que son mejor conocidas como variables de instrumentación, las cuales son convertidas a variables electrónicas para su utilización; por último, se tienen los **actuadores** que tienen la capacidad de convertir energía hidráulica, neumática o eléctrica en la activación de algún proceso. Para el caso del proyecto, se implementó el uso de sensores de luminosidad y temperatura, y relevadores como actuadores para casos específicos de uso.

2.4. Internet de las Cosas (IoT)

IoT se refiere a "una red mundial de objetos interconectados con una dirección única, basada en protocolos de comunicación estándar"[15] cuyo punto de convergencia es

 ISSN en trámite

Internet. La idea básica detrás de esto es la presencia generalizada alrededor de las cosas de las personas, capaz de medir, inferir, comprender e incluso modificar el entorno. IoT se alimenta de los avances recientes de una variedad de dispositivos y tecnologías de comunicación, pero las cosas incluidas en IoT no son solo dispositivos complejos como los teléfonos móviles, sino que también incluyen objetos cotidianos como alimentos, ropa, muebles, papel, puntos de referencia, monumentos, obras de arte, etc. Estos objetos, que actúan como sensores o actuadores, pueden interactuar entre sí para alcanzar un objetivo común. [1]

3. DESARROLLO Y PRUEBAS

Con la información recaba sobre el protocolo TCP/IP, el hardware especializado fabricado en la empresa Microside Technology S.A. de C.V. y el ERP modular de código abierto a utilizar, se procedió al desarrollo del módulo encargado de monitorizar los sensores incorporados en una tarjeta preparada para medir luminosidad, al igual de permitir el control de relevadores que pueden activar otros dispositivos y leds que pueden ser utilizados para mostrar estatus de funcionamiento, entre otras cosas dependiendo de su configuración.
El desarrollo de este proyecto fue dividido en tres etapas:

Etapa 1. Análisis del sistema ERP de código abierto para conocer su funcionamiento, y análisis de módulos para revisión posterior.

Etapa 2. Prueba de concepto. Desarrollo de un programa basada en una arquitectura cliente-servidor, el cual haría la función de emular el envío de datos de la tarjeta al módulo, utilizando el protocolo TCP/IP para crear la comunicación entre ambos.

Etapa 3. Prueba de los programas cliente y servidor para su posterior corrección en caso de ser necesario.

Se hicieron pruebas de sincronización en la que se aplicó un retardo al procesamiento del cliente, ya que, al no aplicarlo, el procesamiento era demasiado rápido, lo cual provocaba un cuello de botella entre el servidor y el cliente.
Como se muestra en la tabla, solo fueron requeridas 5 pruebas para sincronizar la comunicación de acuerdo con la tasa de transferencia de datos del servidor y el tiempo requerido del cliente para procesarlos, dejando 1 segundo exacto para obtener un resultado exitoso.

Tabla 1. Pruebas de sincronización

Pruebas de sincronización			
Numero de prueba	**Tiempo de retardo (segundos)**	**Cantidad de datos recibidos del sensor**	**Resultado**
1	0	100	Fallido
		1000	Fallido
		10000	Fallido
2	0.4	100	Fallido
		1000	Fallido
		10000	Fallido
3	0.6	100	Fallido
		1000	Éxito
		10000	Fallido
4	0.8	100	Éxito
		1000	Éxito
		10000	Fallido
5	1	100	Éxito
		1000	Éxito
		10000	Éxito

Etapa 4. Preparación de módulo para ERP. Modificar el programa cliente para envío y recepción de datos de y hacia la tarjeta con la que se estuvo trabajando.

Etapa 5. Prueba de comunicación (envió y recepción de datos) entre el programa cliente y la tarjeta con sensores para su posterior corrección. (Fig. 1).

Etapa 6. Diseño y programación de la interfaz de usuario del módulo de ERP (Fig. 2) para interacción con el hardware, envío de instrucciones, recepción de datos de los sensores.

Etapa 7. Pruebas finales del módulo de ERP en conjunto con la tarjeta de sensores.

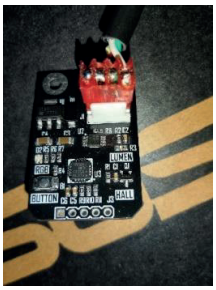


Fig. 1. Tarjeta de Microside



Fig 2. Interfaz de usuario

4. RESULTADOS

Como resultado del desarrollo anterior, se obtuvo un módulo funcional para el sistema ERP que permite interactuar desde la interfaz de usuario con la tarjeta de hardware de Microside, obteniendo y mostrando los datos registrados por los sensores de temperatura y luminosidad de la tarjeta, los cuales se pueden observar en una gráfica que el módulo muestra para el usuario (Fig. 3) y aparte, al ser conectado el módulo al ERP, guarda los datos en el almacenamiento del mismo sistema.
En las primeras pruebas que se realizaron para comprobar la comunicación entre el módulo del sistema ERP y la tarjeta, hubo problemas en la recepción de algunos datos debido a la velocidad con la que la tarjeta enviaba los datos y con la que

ISSN en trámite

el módulo los recibía, por lo que fue necesario implementar un retardo dentro del código del módulo para dar tiempo a que la tarjeta enviara los datos. Después de esta corrección la recepción y envío de datos se dio sin ningún problema, mostrando las variaciones de luminosidad y temperatura que captaban los sensores (Tabla 2).

Tabla 2. Medición registrada por sensores

Sensor de luminosidad	
Segundos	**Luminosidad (lm)**
1	86 lm
2	90 lm
3	80 lm
4	82 lm
5	87 lm
6	96 lm
7	100 lm
8	0 lm
9	0 lm
10	0 lm

Teniando estos datos, el usuario podrá visualizarlos en una gráfica como se visualiza en la Fig. 3, donde el eje vertical muestra el nivel de lumenes (nivel de luz) y en el eje horizontal el tiempo transcurrido entre cada medición. Con esto a nivel industrial, la toma de desiciones es más rápida.

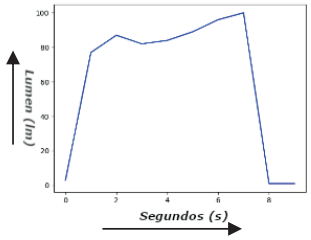


Fig. 3. Gráfica nivel de luz

5. CONCLUSIONES

Como se puede ver, las posibilidades que existen entre el hardware y el software son infinitas, siempre han tenido una convivencia armónica, pero desafortunadamente no se ha explotado demasiado fuera de lo que es solo informática, por eso Microside busca dar el impulso al desarrollo de soluciones que incluyan estas dos áreas, y con este proyecto se demuestra que es posible su desarrollo, para ser incorporadas en distintos rubros de la industria automatizando procesos, acortando así la captura y análisis de datos (Tabla 2), mejorando sus procesos y entrando a la nueva revolución de la industria, la industria 4.0.

6. REFERENCIAS

[1] Botana, N. R., Sabado, Jorge. (1993). LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA EN EL DESARROLLO FUTURO DE AMÉRICA LATINA. *Arbor: Ciencia, pensamiento y cultura, 575,* 21-44.

[2] Agarwal. Anurag., Whitmore, Andrew., Xu, L. D. (2015) The Internet of Things - A survey of topic and trends. *Information Systems Frontiers, 17,* 261-274.

[3] Ahmed, A. A., Ahmed, E. Y. (2013). A framework for ERP System in SME bases on Cloud. *International Journal on Cloud Computing: Services and Architecture (IJCCSA), 3,* 1-14.

[4] Oracle Parkway. (Agosto de 2011). *Guía de administración del sistema: servicios IP.* Oracle Technology Network, https://docs.oracle.com/cd/E24842_01/html/820-2981/index.html

[5] Boquera, M. C. (2003) *Servicios Avanzados de Telecomunicación.* Diaz de Santos.

[6] Rowland, C. H. (1997). Covert channels in the TCP/IP protocol suite. *First Monday, 2,* 5.

[7] Real Academia de la Lengua española (RAE). (2018) *HARDWARE.* https://www.rae.es/dpd/hardware

[8] Vacas, F. S. (2009). *Complejidad y Tecnologías de la Información*. Fundetel.

[9] Botta, A., Donato, W., Persico, V., Pescapé, A. (2015) Integration of cloud computing and Internet of Thing: A survey. *Future Generation Computer Systems, 56, 684-700*.

ISSN en trámite

Identificación de patologías en cultivos empleando aprendizaje profundo

Andros Meraz Hernández*, Andrea Magadán Salazar*, Jorge Alberto Fuentes Pacheco, Raúl Pinto Elías*, Nimrod González Franco*,**

** Tecnológico Nacional de México / CENIDET*
Cuernavaca, Morelos, México.
{m20ce040, andrea.ms, raul.pe, nimrod.gf}@cenidet.tecnm.mx

*** Laboratorio de Visión por computadora*
Centro de Investigación en Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de Morelos
Cuernavaca, Morelos, México.
jorge.fuentes@ueam.mx

Abstract: La identificación de anomalías, de manera temprana, en los cultivos es de suma importancia para evitar pérdidas parciales o totales de los sembradíos. Sin embargo, obstáculos como: la carencia de conocimientos, experiencia y habilidades que algunos campesinos muestran contribuye a una baja producción o pérdidas significativas de cosechas. Los últimos avances en las áreas de inteligencia artificial y aprendizaje profundo han demostrado ser de gran apoyo en el sector agrícola al realizar la detección de enfermedades en diferentes cultivos. Esto es posible gracias al desarrollo de redes neuronales complejas ya que, han permitido que las computadoras sean capaces de reconocer anomalías en las superficies de las hojas. El proyecto presentado tiene como objetivo el identificar enfermedades producidas por virus, bacterias u hongos, en las hojas de plantas de jitomate y maíz. Se utilizaron imágenes del conjunto de imágenes público (*PlantVillage*) y se entrenó una red *MobileNetV2* para el reconocimiento de las patologías. Los resultados del modelo predictivo propuesto, se encuentran a la par de otros trabajos publicados, logrando una exactitud del 99%, al trabajar con cinco clases (dos enfermedades del maíz, una patología del jitomate y dos clases sanas de los cultivos respectivos).

Keywords: identificación, patologías en plantas, análisis de imágenes, aprendizaje profundo.

1. INTRODUCCIÓN

En la agricultura, la detección de enfermedades en los cultivos, en una etapa temprana es de suma importancia. Los virus, hongos y bacterias producen diferentes enfermedades en los sembradíos, los cuales estropean los cultivos y eventualmente repercute en la economía de los productores. La mayoría de los agricultores no son capaces de identificar estos padecimientos, por lo tanto, tienden a confundirlos con algún otro tipo de síntoma que no necesariamente es de origen patológico, esto se debe a la carencia de conocimientos y/o habilidades para reconocer cuando una planta presenta alguno de estos casos.

Los modelos de aprendizaje profundo han demostrado ser altamente eficientes en la detección y clasificación de enfermedades ya que, se ha reportado en la literatura precisiones mayores a 90% por lo tanto, es posible desarrollar sistemas de visión artificial que ayuden a las tareas que pueden ser difíciles para una persona.

El objetivo de este artículo es crear un modelo predictivo confiable y ligero que sea capaz de ser ejecutado en dispositivos móviles puesto que, gracias a los últimos avances es posible desarrollar *Apps* (herramientas) que sean de apoyo y en este caso, ayudar a los agricultores en realizar detecciones de patologías en los cultivos de jitomate y maíz y con ello actuar lo más pronto posible ante la problemática.

El artículo está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se realiza una revisión de trabajos del estado del arte; la sección 3 contiene la metodología seguida en el desarrollo del presente trabajo; en la sección 4 se muestra la experimentación realizada y se discuten los resultados y finalmente, en la sección 5 se dan las conclusiones del trabajo.

2. TRABAJO RELACIONADO

Ocampo y Dadios, (2018) presentan la implementación de una plataforma móvil de red neuronal computacionalmente ligera, que realiza la detección y reconocimiento de enfermedades en plantas. El sistema contempla dos etapas de entrenamiento: el preentrenamiento con el *dataset* de *ImageNet* con una gran variedad de objetos y un re-entrenamiento con un *dataset* que contiene enfermedades de plantas específicas. El banco de imágenes contiene 6,970 imágenes de muestras de enfermedades causadas por hongos y virus en varios cultivos, en seis diferentes clases: cinco categorías para las enfermedades de las plantas y la sexta para la clase “saludable”.

ISSN en trámite

Las imágenes fueron aleatoriamente sometidas a rotaciones y aumentos para crear diferentes vistas de los mismos ejemplares. Cada imagen se redimensiona a 224 x 224 píxeles. El *dataset* fue dividido en tres partes de las cuales el 63% fue destinado al entrenamiento, 16% para la validación y el 21 % para el *testing*. La última capa del clasificador se entrena 4.000 veces y recibe el ajuste de los pesos mientras que las otras capas se entrenan sólo una vez. Este enfoque permite que sea más rápido y factible para las máquinas menos potentes (dispositivos móviles). El artículo reporta una exactitud de 89.0%, con la arquitectura *Mobilenet,* clasificando eficazmente las enfermedades de las plantas; y concluyen que los procesos inferenciales pueden hacerse de forma autónoma en dispositivos móviles que abren más oportunidades para otras aplicaciones.

Laha Ale et al., (2019) utilizan una red convolucional densamente conectada (Densely Connected Convolutional Networks, DenseNet,) basada en la transferencia de aprendizaje para la detección de enfermedades en plantas y con ello evaluar el rendimiento del modelo propuesto. Ellos agregan un aplanado (flatten) y dos capas completamente conectadas con cuatro bloques densos, con un tamaño de entrada 256 × 256 × 3. Como resultado se tiene un total de 7,148,166 parámetros en el modelo de DenseNet121. El total los parámetros del modelo propuesto son menores que los necesarios para otros modelos clásicos de aprendizaje profundo, como ResNet152 (60, 419, 944 parámetros), InceptionV3 (23, 851, 784 parámetros) e InceptionResNetV2 (55, 873, 736 parámetros). Como el modelo es relativamente más pequeño que otras arquitecturas se puede implementar en móviles o en dispositivos potentes del Internet of Things (IoT). Los pesos de DenseNet121 se inicializan con ImageNet. El modelo logra una precisión relativamente alta similar a otras redes más complejas y el modelo converge considerablemente rápido alrededor de 50 épocas. El trabajo presenta una interesante evaluación del modelo ante diferentes resoluciones de imagen, encontrando que, bajas resoluciones comprometen el rendimiento al no tener suficientes características y, por el contrario, la alta resolución, permite contar con más y mejores características, pero aumenta el costo computacional exponencialmente.

El trabajo presentado por Sagar, Dheeba, (2020) tiene como objetivo detectar enfermedades de plantas mediante la transferencia de aprendizaje utilizando cinco arquitecturas diferentes y demostrar cómo influyen los ajustes en los hiperparámetros en cada red. La principal ventaja de la transferencia es evitar el comenzar el proceso de aprendizaje desde cero, puesto que el modelo parte de patrones que ha aprendido al resolver un problema diferente, pero de naturaleza similar al que se busca resolver. Los cinco modelos seleccionados fueron: *Inception v3, InceptionResNet v2 y ResNet50, MobileNet y DenseNet169* con los pesos previamente entrenados para el trabajo propuesto. Se utilizaron imágenes provenientes del *dataset PlantVillage* de diferentes cultivos. Las imágenes pueden contener alguna de las 17 enfermedades básicas, 4 enfermedades bacterianas, 2 enfermedades causadas por moho, 2 enfermedades virales y 1 enfermedad causada por un ácaro. Aplicaron técnicas para el aumento de datos como: recortar, aumentar, rotar y cambio de brillo, para pasar de 1,583 a 4,266 muestras. Se realizó la estandarización de los hiperparámetros en todos los experimentos, de acuerdo con lo siguiente: *Base learning rate: 0.001, Learning rate policy: Step*, *Momentum: 0.9*, *Weight decay: 0.0005*, *Gamma: 0.1*, *Batch size: 32*, *Optimizer: Adam.* La mejor red fue *ResNet50,* la cual alcanzó una exactitud de 98.20% comparada con el resto de modelos generados.

El estudio propuesto por Aravind Krishnaswamy *et al.*, (2018) tiene el objetivo de realizar la detección y clasificación de enfermedades en la planta del jitomate, haciendo el uso de dos modelos de aprendizaje profundo pre-entrenados *AlextNet* y *VGG16*. Estos modelos pre-entrenados fueron modificaciones en su capa de salida respectivamente, donde se tuvo que igualar al número de clases: seis clases de enfermedades y una clase sana. Adicionalmente las capas *softmax* y *fully connected* fueron añadidas a las arquitecturas. La segmentación de imágenes consistió en poner el fondo de la imagen en color negro dejando intacta las hojas. Las imágenes se obtuvieron del *dataset PlantVillage*. Fue necesario aplicar un redimensionamiento con base a las características de la arquitectura, para *AlexNet* fue de 227 x 227 píxeles y para *VGG16* de 224 x 224 píxeles. El número de muestras disponibles en el banco de imágenes en total es de 13,262. Los resultados finales fueron los siguientes: 97.29% para *VGG16* y 97.49% para *AlexNet*. Este último modelo demostró una buena precisión y un tiempo de ejecución menor en comparación con *VGG* 16.

Alexandre Pereira *et al*., (2019) tienen como objetivo crear y entrenar una red *CNN* con la finalidad de detectar hojas enfermas presentes en los cultivos del café causados por un hongo. La arquitectura propuesta de la red *CNN* para este experimento está formada por dos capas de convolución, seguidas por un filtro *non-linearity ReLU* y una capa *max-pooling*. Para complementar el rendimiento de la red, se observó que la estructura de *AlexNet* aplica una normalización de datos después de la capa *max-pooling*, por lo que se decidió aplicar esta normalización a cada salida de las capas *max-pooling*. Para la construcción del *dataset*, se obtuvieron 159 imágenes de hojas del café sobrepuestas en un fondo blanco, las cuales fueron capturadas a través de una cámara digital *Sony Cyber-shot DSC-W210* de *12.1 Megapixel*. La resolución de cada ejemplar es de 2340 × 4160 pixeles. Se requirió el apoyo de un experto para realizar manualmente el etiquetado de la patología correspondiente, acorde las características de las hojas en cada muestra. Las técnicas de aumento de datos que se emplearon para incrementar el número de imágenes fueron: rotaciones, cambios en la escala, recortes, redimensionamiento de 37 x 37 píxeles y 40 x 40 píxeles y, ajustes en el brillo en cada una de las fotografías originales. El tamaño final de *dataset* fue de 51,462 imágenes. Para llevar a cabo las etapas de entrenamiento y validación, se tomaron 4,086 imágenes agrupadas en dos clases: la clase enferma si el ejemplar

ISSN en trámite

presenta al menos el 50% de la superficie con alguna anomalía, de lo contrario es clasificado en la clase normal. De estos mismos ejemplares se tomaron 2,859 para el entrenamiento y 1,227 para la validación. El mejor resultado de precisión que se reporta fue de un 95%.

Serawork Wallelign *et al.*, (2018) desarrollan una red *CNN* que tiene como objetivo realizar la detección y clasificación de enfermedades en los cultivos de soya. El modelo *LeNet* está formada por dos capas de convolución y dos capas de submuestreo seguida por la capa *fully connected MLP*. Para la construcción del *dataset* se obtuvieron las imágenes provenientes del *dataset PlantVillage*, dando un total de 12,673 ejemplares. Las imágenes fueron transformadas a una imagen blanco y negro y ser redimensionadas al tamaño de 128x128 píxeles con la finalidad de evitar sesgos al momento de llevar a cabo el entrenamiento. El *dataset* fue dividido en tres partes: el 70% para el entrenamiento, 10% para la validación y el 20% para las pruebas. El mejor resultado reportado es del 99.32% de precisión demostrando que las técnicas de pre-procesamiento de imágenes ayudaron a la red *CNN* a realizar exitosamente la extracción de características importantes de las imágenes.

Andre da Silva Abade *et al*., (2019) exploran el potencial que tienen las redes *CNN* enfocadas a la identificación de enfermedades. Se evaluaron los modelos: *AlexNet* y *GoogleNet*, entrenados desde cero; y una red tipo *Multichannel CNN (M-CNN)* enfocados para entrenar y evaluar el conjunto público *PlantVillage* el cual contiene contiene 54,306 imágenes de hojas de plantas de 38 diferentes clases. En el modelo propuesto existen dos canales individuales separados, las redes con parámetros compartidos se fusionan en la primera capa totalmente conectada, calculando las características globales mediante la comparación de ambas salidas. Cada canal recibe un diferente tipo de *dataset*, generando tres tipos de versiones. A) Color + escala de grises, B) color + segmentación, C) escala de grises + segmentación. Para la evaluación de los resultados se utilizó *F1-mea* puntaje y precisión general. Para una mejor visualización de ambos modelos con una arquitectura multicanal se nombraron como *M-AlexNet y M-GoogleNet.* La arquitectura multicanal demuestra que las tres versiones del conjunto de datos (color, escala de grises y segmentado) pueden contribuir a mejorar la precisión, agregando información relevante a la red neuronal artificial propuesta.

Dikdik Krisnandi *et al.*, (2019) proponen el uso de redes *CNN* para la detección de enfermedades en plantas de té; específicamente las redes empleadas son: Google*Net*, *Xception* y *Inception-ResNet-v2*. Para la construcción del *dataset* se capturaron 4727 imágenes de hojas de té de los campos en el *Research Institute for Tea and Cinchona, Gambug, West Java, Indonesia*. Se emplearon dos tipos de cámaras digitales y cinco cámaras de teléfonos inteligentes Todas las imágenes se tomaron en el interior y bajo condiciones controlados. El *dataset* contiene 3,479 imágenes de plantas enfermas y 1,248 de sanas. El *dataset* se dividió en tres subconjuntos: entrenamiento, validación y pruebas. Se seleccionó 80% de los datos para el entrenamiento, 10% para la validación y 10% para las pruebas. Los resultados en el experimento muestran que el rendimiento de *Xception* y *Inception-ResNet-v2* es mejor que *GoogleNet*. Sin embargo, el rendimiento puede ser mejorado al agregar más datos de entrenamiento. Se indica que el desempeño tiende a disminuir cuando se usan más etiquetas de clase. Los mejores resultados al usar dos clases de enfermedades logran el 98.09% de precisión. Al utilizar tres clases el porcentaje de exactitud es 90.05 %.

3. METODOLOGÍA PROPUESTA

En esta sección se da a conocer el esquema de solución propuesta la cual, contempla dos etapas: la primera es la adquisición de fotografías y el preprocesamiento de las imágenes. Como segunda etapa, se lleva a cabo el entrenamiento y evaluación del modelo predictivo. Las fases que integran el esquema propuesto de solución para este trabajo se ilustran en la Figura 1.

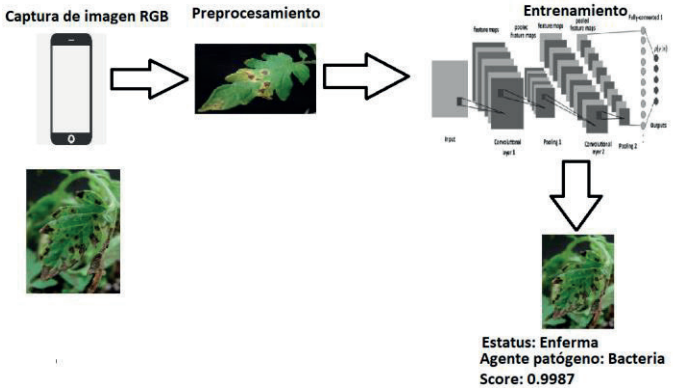


Figura 1. Esquema de solución propuesta.

La primera etapa aplica un pre-procesamiento a las imágenes que integran el banco de imágenes, se realizó una segmentación donde el fondo de la imagen se eliminó asignándole el color negro y dejando solamente las hojas en cada muestra, con la finalidad de eliminar ruido y asegurar que la red neuronal pueda extraer manera más impoluta las características del área de interés (hoja). Como segunda etapa se realizó el proceso de entrenamiento y afinación (*fine tuning*) de la red neuronal en donde se realizaron varios experimentos hasta obtener un modelo predictivo con una tasa de exactitud aceptable, conforme a las curvas de aprendizaje observadas en los experimentos. Una vez obtenido el modelo se realizó la evaluación del modelo con el objetivo de conocer el desempeño del sistema desarrollado.

3.1 El *dataset*

El conjunto de datos es una colección de fotografías que se encuentran clasificadas según su región (origen), especie y estatus (enferma o sana). La categorización es de suma importancia puesto que existe una gran variedad de patologías en las plantas, que pueden ser causadas por virus, hongos y

ISSN en trámite

bacterias. Uno de los *datasets* más utilizado en el área de la detección de enfermedades en cultivos mediante el análisis de imágenes es *PlantVillage* (Plant Village, s.f.). El conjunto de datos de *PlantVillage* aloja un total de 54,303 imágenes (en *RGB*, escala de grises y segmentadas) de hojas sanas y no saludables divididas en 38 categorías por especies y enfermedades. En la Tabla 1 se muestran la selección de los cultivos considerados para este trabajo y disponibles en el *dataset PlantVillage* (Plant Village, s.f.).

En este trabajo se utilizaron dos bancos de imágenes, un conjunto destinado al entrenamiento y el segundo para la etapa de validación. De esta manera se garantiza que los ejemplares no se repiten en ambas particiones. Es importante resaltar que para evaluar la eficacia real del modelo se recomienda que las imágenes sean totalmente diferentes; en caso contrario la red neuronal realizará una predicción engañosa. También es recomendable que las clases se encuentren balanceadas ya que, si no se respeta esto, la red neuronal tomará como más importantes aquellas clases que contengan mayor número de elementos, provocándose un sesgo hacia las clases con más muestras.

Tabla 1. Selección de cultivos.

Cultivo	Patologías	Agente patógeno
Maíz	Ausente	Ausente
Maíz	*Common rust*	Hongo
Maíz	*Northern leaf blight*	Hongo
Jitomate	Ausente	Ausente
Jitomate	*Bacterial spot*	Bacteria

En las Tablas 2 y 3 se muestran las configuraciones para el entrenamiento y validación que se utilizaron a lo largo de la experimentación.

Tabla 2. Partición de datos para el entrenamiento.

Cultivo	Patologías	Núm. de imágenes
Maíz	Ausente	1,161
Maíz	*Common rust*	1,191
Maíz	*Northern leaf blight*	1,168
Jitomate	Ausente	1,591
Jitomate	*Bacterial spot*	1,162

Tabla 3. Partición de datos para la validación.

Cultivo	Patologías	Núm. de imágenes
Maíz	Ausente	1,162
Maíz	*Common rust*	1,322
Maíz	*Northern leaf blight*	1,248
Jitomate	Ausente	1,186
Jitomate	*Bacterial spot*	1,169

3.2 Aumento de datos

El aumento de datos es una técnica que se utiliza para hacer crecer de manera artificial el número de fotografías que se encuentran alojadas en el banco de imágenes. La finalidad de aplicar esta técnica es obtener un *dataset* que pueda representar lo más cercano posible las diferentes condiciones de los especímenes que se encuentran en el mundo real, en otras palabras, se busca obtener una mayor riqueza de ejemplares. En este trabajo las técnicas de *data augmentation* solamente se aplicaron a la partición de entrenamiento para enriquecer la información en dicha etapa. Los cambios considerados son: rotaciones a 45° (*rotation*), acercamiento (*zooming*): 30%, efecto espejo horizontal (*horizontal_flip*) y efecto espejo vertical (*vertical_flip*). Estas técnicas contribuyeron a que la red neuronal obtuviese una curva de aprendizaje óptima.

La selección y configuración de valores de las técnicas de *data augmentation* juega un papel muy importante ya que se debe vigilar que las imágenes generadas realmente representen información real y no se incluya ruido o perspectivas erróneas o que provoquen el problema del sobre entrenamiento (*overfiting);* es decir, que el modelo solamente se especializó (memorizó) el conjunto de imágenes propuesto para el experimento y no es capaz de generalizar (predecir otras fotografías).

3.3 Red neuronal MobilNetV2

MobilNetv2 es una arquitectura de red neuronal diseñada específicamente para los dispositivos móviles de recursos limitados Mark Sandler *et al*., (2019). Para poder llevarse a cabo se utiliza la idea de un bloque utilizado en muchas arquitecturas de redes neuronales: *depthwise separable convolutions*. Esto consiste en reemplazar el operador convolucional por una versión factorizada que lo separa en varias capas. La primera capa, llamada *depthwise convolution*, realiza un filtrado aplicando un único filtro convolucional por canal de entrada, posible gracias a una convolución previa 1x1 Mark Sandler *et al*., (2019). La segunda capa es una convolución 1x1 lineal, llamada *pointwise convolution*, responsable de crear nuevas características a través de la combinación lineal de los canales de entrada. Se justifica la utilización de una convolución lineal ya que experimentalmente la no linealidad afecta a los resultados. Este tipo de convoluciones se denominan como *bottleneck* y se refiere al *ratio* entre el tamaño de la entrada a la convolución y el obtenido como *expansion ratio*. En la Figura 2 se observan los dos bloques utilizados en la red.

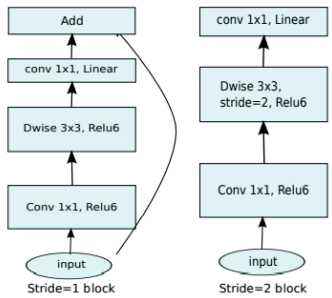


Figura 2. Arquitectura *MobilNetV2* Mark Sandler *et al*., (2019).

 ISSN en trámite

El primero (a la izquierda), muestra el bloque utilizado cuando se conserva el tamaño de entrada y salida de los mapas. Se emplean conexiones residuales con la finalidad de incrementar la habilidad del gradiente para ser propagado a través de múltiples capas Mark Sandler *et al*., (2019). El segundo bloque (a la derecha) ilustra cómo se hace la reducción del tamaño de los mapas al aplicar un *stride* de 2 píxeles. En ambos bloques se utiliza una variante de la *ReLU*, *ReLU6*, debido a su robustez cuando se emplean cálculos de baja precisión. Por último, se reduce el tamaño de los mapas a 1x1 a través de un operador *average pooling* y posteriormente, tras un *reshape*, se lleva a cabo la tarea de clasificación Mark Sandler *et al*., (2019).

3.4 Hiperparámetros

Los hiperparámetros de un modelo son los valores de las configuraciones utilizadas durante el proceso de entrenamiento. Estos valores generalmente no se obtienen de los datos, por lo que suelen ser indicados por el científico de datos; en este caso, se tomaron los valores de referencia de los artículos seleccionados en el estado del arte. Sin embargo, durante el entrenamiento se obtuvieron distintos rendimientos, por lo cual, se experimentaron con varias configuraciones. Los valores finales de los hiperparámetros empleados durante el experimento son:

- Número de clases: 5
- Número de épocas (entrenamiento): 10; Número de épocas (*fine-tuning*): 60
- Función de activación: *softmax*
- *Rate-learning*: 0.0001
- *Batch size*: 16
- Resolución de imágenes: 224 x 224 x 3

3.5 Métricas de evaluación

Las métricas de evaluación permiten medir el desempeño del modelo generado de manera cuantitativa, con el objetivo de conocer realmente qué tan confiable es el producto creado durante el proceso de entrenamiento. Existen varias medidas para realizar esta evaluación, en este trabajo se recurrió las medias clásicas: precisión, exactitud, *recall* y medida *F1*. Las métricas anteriores se calculan en base a la matriz de confusión.

Una alternativa de verificar o medir la bondad del clasificador es la matriz de confusión. Una matriz de confusión permite visualizar mediante una tabla de contingencia la distribución de errores cometidos por un clasificador (Jordi Porta, 2006). La matriz de confusión, para el caso de dos clases, tiene la apariencia que se puede apreciar en la Tabla 4.

Tabla 4. Matriz de confusión

	Clase predicha	
Clase real	Término	No término
Término	**VP**	**FN**
No Término	**FP**	**VN**

Donde:

- **VP (Verdaderos Positivos):** instancias correctamente reconocidas por el sistema.
- **FN (Falsos Negativos):** instancias que son positivas y que el sistema dice que no lo son.
- **FP (Falsos Positivos):** instancias que son negativas pero el sistema dice que no lo es.
- **VN (Verdaderos Negativos):** instancias que son negativas y correctamente reconocidas como tales.

Suponiendo que **N** es el número del conjunto de datos de entrenamiento, **N=VP+FN+FP+VN.**

El número de instancias clasificadas correctamente es la suma de la diagonal de la matriz y el resto están clasificadas de forma incorrecta. A continuación, se presentan cuatro ecuaciones que permiten evaluar el modelo predictivo.

Tasa de aciertos (Exactitud): Porcentaje de ejemplos bien clasificados.

$$Tasa\ de\ acierto = (VP + VN) / N \quad (1)$$

Recall (Cobertura): ¿Están todos los que son?

$$Cobertura = VP / (VP + FN) \quad (2)$$

Precisión: ¿Son todos los que están?

$$Precisión = VP / (VP + FP) \quad (3)$$

Medida F1: La métrica *F1* es la media armónica de la sensibilidad y la precisión. La media armónica se utiliza en lugar de un promedio simple porque castiga los valores extremos y se expresa de la siguiente forma (ver ecuación 4):

$$F1 = 2 * (cobertura * precisión / cobertura + precisión) \quad (4)$$

4. EXPERIMENTACIÓN

La experimentación se integra de dos casos, en el primero se lleva a cabo la etapa de entrenamiento de la red, con el conjunto de imágenes considerado para ese fin y la evaluación del modelo resultante con el conjunto de prueba. El segundo caso tiene como objetivo la mejora del modelo obtenido mediante la función *tuning* presente en las arquitecturas de aprendizaje profundo.

4.1 Entrenamiento

Como primer paso se toma el modelo base original de *MobilNetV2* y se elimina la última capa de la red neuronal para personalizar la capa de salida con base las clases definidas de este trabajo; es decir, que hacen referencia a las patologías y que se definen en la Tabla 5. Posteriormente, se procedió a

ISSN en trámite

congelar los pesos del modelo base original esto, con la finalidad de entrenar solamente la última capa del modelo sin alterar los pesos originales del resto del modelo. En esta fase lo que se busca es generar nuevos pesos a partir del conjunto de imágenes de entrenamiento considerado en el presente trabajo.

Tabla 5. Clases consideradas en el modelo

Valor	Clase
0	*Corn health*
1	*Tomato health*
2	*Common rust* (maíz)
3	*Northern leaf blight (maíz)*
4	*Bacterial sopt* (tomato)

Como se ilustra en la Figura 3, las curvas de aprendizaje muestran que el modelo aprendió favorablemente (no se presentó un sobre entrenamiento) alcanzando un 95.09 % de exactitud con las imágenes de entrenamiento y un 94.92% con el conjunto de validación. Además, cómo se puede observar, el valor de perdida es pequeño en ambos conjuntos.

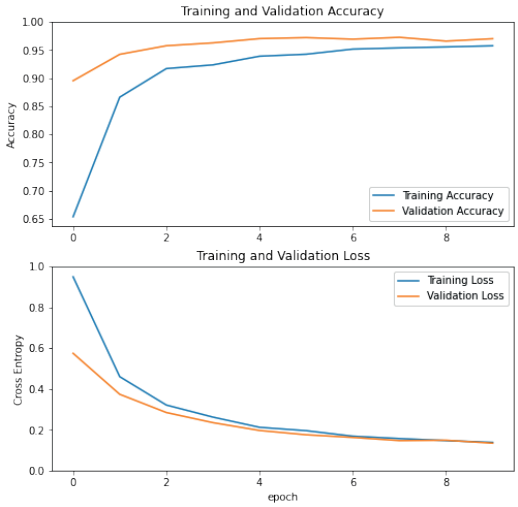


Figura 3. Curvas de aprendizaje I.

4.2 Fine tuning

El *fine tuning* es una técnica que se utiliza en la transferencia de aprendizaje, con el objetivo de mejorar las curvas de aprendizaje del modelo que se obtuvieron en la primera etapa. Para llevar a cabo esta etapa, como primer paso se descongelaron los pesos del modelo original; posteriormente, se lleva a cabo un nuevo entrenamiento, pero los pesos que anteriormente estaban congelados se actualizarán conforme a los pesos que se obtengan en la primera etapa con el conjunto de entrenamiento. De esta manera es como se logran mejorar las curvas de aprendizaje. En la Figura 4 se muestran las curvas de aprendizaje que se obtuvieron en esta segunda etapa.

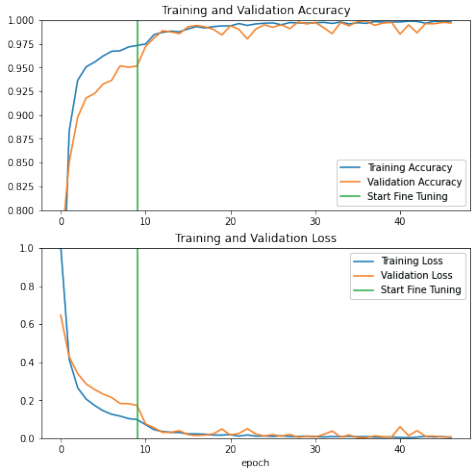


Figura 4. Curvas de aprendizaje con *fine tuning*.

Como se observa en la imagen 4, las curvas de aprendizaje muestran que el modelo mejoró favorablemente su aprendizaje. Finalmente, se realizó un *test* rápido al modelo generado, sin aplicación de métricas, sólo se llamó al método *evaluate()* del modelo, el cual arrojó una precisión de: 0.9991 y una pérdida de: 0.0030.

4.3 Discusión de los resultados

En la Figura 5 se muestra la matriz de confusión del conjunto de validación. En la Tabla 6 se muestran las métricas que se utilizaron para realizar la evaluación del modelo obtenido en donde se observó una exactitud del: 0.9986.

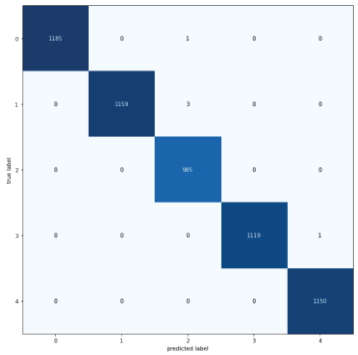


Figura 5. Matriz de confusión.

Tabla 6. Métricas de evaluación.

Clase	Precisión	Recuerdo	Medida F1	Núm. De imágenes
0	0.9958	0.9992	0.9975	1,186
1	1.0000	1.0000	1.0000	1,162
2	0.9990	0.9970	0.9980	985
3	1.0000	0.9964	0.9982	1,120
4	0.9983	1.0000	0.9991	1,150
Exactitud				**Total imágenes**
0.9986				5,603

ISSN en trámite

En la Tabla 7 se comparan los resultados de precisión obtenidos en este trabajo con respecto a los resultados que reportan en el estado del arte. Como se puede observar, los resultados logrados son equiparables a los reportados por otros trabajos

Tabla 7. Comparación de precisión.

Referencia	Exactitud	Red neuronal	Núm. Clases
Ocampo y Dadios, (2018)	89%	*MobilNet*	Cinco
Laha Ale *et al.*, (2019)	89.7%	*DenseNet*	*N/D*
Sagar, Dheeba, (2020)	98.2%	*RestNet50*	Nueve
Aravind Krishnaswamy *et al.*, (2018)	97.47%	*AlexNet*	Seis
Alexandre Pereira *et al.*, (2019)	95%	*CNN*	Una
Serawork Wallelign *et al.*, (2018)	99.32%	*LeNet*	Cuatro
Andre da Silva Abade *et al.*, (2019)	99.59%	*AlexNet*	38
Dikdik Krisnandi *et al.*, (2019)	98.09%	*Inception-ResNet-v2*	Dos
Propuesto	**99%**	***MobilNetV2***	**Cinco**

5. CONCLUSIONES

Como se observa en el análisis del estado del arte, la mayoría de los modelos presentados no se limitan a identificar solamente una enfermedad en un tipo de cultivo en específico, sino que entrenan a la red neuronal para que sea capaz de poder detectar varias enfermedades causadas por diferentes agentes patógenos en uno o varios cultivos.

En este artículo se presentó la metodología seguida en el desarrollo de un sistema para la identificación de cinco enfermedades producidas por bacterias, virus y hongos en maíz y jitomate. La propuesta de solución seguida se basa en una arquitectura de aprendizaje profundo denominada *MobilNetV2*. Para evaluar su desempeño se realizan dos casos de experimentación en los cuáles, se consideran conjuntos disjuntos para la etapa de entrenamiento y validación, factor importante para realmente determinar el porcentaje de aprendizaje de la red.

Debido a los resultados de precisión confiables que brinda esta arquitectura es posible desarrollar aplicaciones de escritorio o aplicaciones móviles, que brinden al usuario final información de interés, lo cual permite al agricultor actuar de manera temprana en dado caso de que, se presente alguna patología pueda aplicar el pesticida y cuidados pertinentes y así evitar una pérdida total de las cosechas.

REFERENCIAS

Abhinav Sagar, Dheeba J. 2020. On Using Transfer Learning For Plant Disease Detection. Vellore Institute of Technology. Vellore Tamil Nadu. India. DOI: https://doi.org/10.1101/2020.05.22.110957

Alexandre Pereira Marcos, Natan Luis Silva Rodovalho, André R. Backes. 2019. Coffee Leaf Rust Detection Using Convolutional Neural Network. IEEE XV Workshop de Visão Computacional (WVC). São Bernardo do Campo, Brazil. DOI: https://doi.org/10.1109/WVC.2019.8876931

Andre da Silva Abade, Ana Paula G. S. de Almeida, Flavio de Barros Vidal. 2019. Plant Diseases Recognition from Digital Images using Multichannel Convolutional Neural Networks. In *Proceedings of the 14th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications - Volume 5: VISAPP,* ISBN 978-989-758-354-4; ISSN 2184-4321, pages 450-458. DOI: 10.5220/0007383904500458

Anton Louise P. de Ocampo and Elmer P. Dadios. 2018. Mobile Platform Implementation of Lightweight Neural Network Model for Plant Disease Detection and Recognition. IEEE 10th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM). DOI: https://doi.org/10.1109/HNICEM.2018.8666365.

Aravind Krishnaswamy Rangarajan, Raja Purushothaman, Aniirudh Ramesh. 2018. Tomato crop disease classification using pre-trained deep learning algorithm. Proceedings of International Conference on Robotics and Smart Manufacturing (RoSMa). DOI: https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.070

Dikdik Krisnandi, Hilman F. Pardede, R. Sandra Yuwana. 2019. Diseases Classification for Tea Plant Using Concatenated Convolution Neural Network. Research Center for Informatics (P2I) - Indonesia Institute of Sciences (LIPI) Bandung 40135, Indonesia. DOI: https://doi.org/10.21512/commit.v13i2.5886

Jordi Porta Zamorano (12 de julio 2006). [Métricas de evaluación]. https://docplayer.es/32519099-Tecnicas-cuantitativas-para-la-extraccion-de-terminos-en-un-corpus.html

Laha Ale, Alaa Sheta, Longzhuang, Ye Wang, Ning Zhang. 2019. Deep Learning based Plant Disease Detection for Smart Agriculture. IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). DOI: https://doi.org/10.1109/GCWkshps45667.2019.9024439.

Mark Sandler, Andrew Howard, Menglong Zhu, Andrey Zhmoginov, Liang-Chieh Chen. 2019 "*MobileNetV2*: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks", Google Inc. https://openaccess.thecvf.com/content_cvpr_2018/papers/Sandler_MobileNetV2_Inverted_Residuals_CVPR_2018_paper.pdf

Plant Village. (s.f.). [Banco de imágenes]. https://plantvillage.psu.edu/

Serawork Wallelign, Mihai Polceanu, Cedric Buche. 2018. Soybean Plant Disease Identification Using Convolutional Neural Network. The Thirty-First International Florida Artificial Intelligence Research Society Conference (FLAIRS-31). DOI: https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01807760

ISSN en trámite

Evaluación de un proceso de inducción emocional utilizando estímulos de productos digitales interactivos

Karen Jannete Jaime-Díaz * **Juan Gabriel González-Serna** *
Nimrod González-Franco * **Dante Mujica-Vargas** *
Olivia Fragoso-Díaz *

* *Tecnológico Nacional de México campus Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos. México. (e-mail: jdk1302@cenidet.edu.mx; gabriel.gs, nimrod.gf, dante.mv, olivia.fd@cenidet.tecnm.mx)*

Resumen: Este trabajo propone un nuevo proceso para la inducción de estados emocionales a través de estímulos visuales basado en una interfaz de usuario interactiva, para la creación de un conjunto de datos de señales fisiológicas emocionales que puedan ser utilizadas para el estudio de la evaluación de la experiencia del usuario. De acuerdo con la investigación la mayoría de los conjuntos de datos existentes fueron generaron por medio de imágenes y videos, los cuales no son útiles para el análisis de emociones en el proceso de evaluación de la experiencia del usuario, adicionalmente los procesos de inducción emocional existentes y utilizados para la creación de dichos conjuntos de datos no son interactivos de forma activa con el usuario; a raíz de esto se propone un nuevo proceso de inducción emocional interactivo que permita la creación de un conjunto de datos de emociones fisiológicas enfocadas a la evaluación de la Experiencia de Usuario.
El objetivo de esta investigación es la creación y evaluación de un proceso de inducción emocional interactivo con el usuario el cual permita la generación de un repositorio de señales fisiológicas enfocadas a la evaluación de la experiencia del usuario.

Keywords: Interacción Humano Computadora, Sensores fisiológicos, Evaluación de la Experiencia de Usuario, Proceso de inducción emocional.

1. INTRODUCCIÓN

La detección de estados emocionales es un área en la que se ha trabajado con mayor constancia en los últimos años, sin embargo, cuando nos enfocamos a la detección de estados emocionales en el área de la evaluación de la experiencia de usuario ocurre lo contrario, el claro ejemplo de esto se observa en los repositorios de datos fisiológicos existentes, por ejemplo en Katsigiannis and Ramzan (2018); Koelstra et al. (2012); Miranda Correa et al. (2018); Savran et al. (2006); Soleymani et al. (2012); Balam Guzman (2015); Jonathan Picard (2002), son muestra de diversos trabajos para la creación de repositorios de datos, en cada trabajo se presenta o describe el proceso de inducción emocional que siguieron, el tipo de estímulo utilizado, las señales recabadas, el modelo o emociones a detectar.

Haciendo el análisis de la literatura de los repositorios existentes se observa que se trabaja al menos con la señal fisiológica de electroencefalograma (EEG), ya que esta señal es la más utilizada para llevar a cabo la clasificación de emociones , ya que es la señal fisiológica que cuenta con un mayor número de características útiles para dicha tarea.

Dentro de los estímulos utilizados para crear este tipo de repositorios predominan los videos de (Koelstra et al., 2012) y en segundo lugar las imágenes afectivas IAPS de (Vila and Sanchez, 2001), sin embargo, dichas imágenes y videos son de carácter social y no son útiles para el análisis de emociones en la evaluación de la experiencia de usuario.

Al realizar pruebas previas con los estímulos de entornos sociales y con los estímulos de productos digitales, se identificó que en muchos casos las emociones obtenidas con estímulos de imágenes o videos generaban una emociones con mayor intensidad que las emociones obtenidas con los estímulos de productos digitales, adicionalmente los usuarios comentaros que cuando se les presentaban únicamente las imágenes de los productos digitales y no tenían una interacción con ella la aparición de alguna emoción era nula o imperceptible; por este motivo surge la necesidad de generar un proceso de inducción emocional

ISSN en trámite

que nos permita crear la interacción del usuario y el estímulo del producto digital seleccionado, lo cual a su vez ayudará a la generación de un repositorio de datos enfocado a la Experiencia de Usuario (UX).

En (Mahesh et al., 2019) se identificaron un conjunto de características necesarias para la creación de los repositorios de estímulos, las cuales son: identificar la población a la que se le realizará la inducción; identificar el tipo de estímulo que se va a utilizar, estos deben ser relevantes para las actividades planeadas; posteriormente la selección de los niveles de inducción y finalmente recabar información personal de los usuarios para identificar como se encuentra antes, durante y después de la prueba.

Tomando en cuenta los repositorios existente, los requerimientos del trabajo y analizando los datos para la creación de repositorios de estímulos y de datos, se identificaron las características necesarias para la generación del proceso de inducción emocional y a su vez la información necesaria para la creación del repositorio de datos; se concluyó que para este trabajo de investigación se requieren como mínimo 14 sujetos de prueba y como máximo 40 (ya que el rango de sujetos de prueba utilizados en la literatura van de 10 a 40), los estímulos son de acuerdo con lo que se requiere investigar (para este caso se utilizaran páginas web las cuales estén clasificadas de acuerdo con un buen o mal diseño con las heurísticas de Jacob Nielsen), las señales fisiológicas que se obtendrán son electroencefalograma (EEG), electrocardiograma (ECG), respuesta galvánica en piel (GRS) y las emociones a trabajar serán por medio de niveles de valencia, activación y dominio; a continuación, se describe el proceso que se generó para la inducción de estados emocionales.

2. PROCEDIMIENTOS Y MATERIALES

En la actualidad existen diversos procesos de inducción emocional como Arana-Llanes et al. (2015); Claudia et al. (2013); Emotiv Sitio Oficial (2017); Madera-carrillo et al. (2015); Mavridou et al. (2017); Vila and Sanchez (2001), en los cuales nos muestran diversas técnicas para realizar la inducción, sin embargo, estos procesos de inducción no son interactivos con los estímulos, a continuación, se describe la técnica utilizada para realizar este proceso interactivo.

2.1 Instrumentos para la adquisición de señales biométricas

Para la generación del repositorio de señales fisiológicas se obtuvieron registros de la actividad cerebral (EEG), cardiaca (ECG) y electrodérmica (GSR), adicionalmente de obtuvo información de seguimiento ocular.

Los instrumentos de evaluación utilizados son el PCU_CB, el cual es un cuestionario que se enfoca en conocer las características del usuario; PCU_Consentimiento, el cual avala que el usuario está de acuerdo en utilizar dispositivos biométricos, realizar las pruebas de inducción y que la información recabada será utilizada para estudios de evaluación; PCWTA_ACW, el cual describe las actividades que realizará el usuario durante la inducción; PEE_Emocional, que está conformado por los cuestionarios SAM y PANAS.

2.2 Participantes

Se aplicaron pruebas a 14 personas con un rango de edad de entre 15 y 50 años, que tuvieran un nivel educativo mayor o igual a preparatoria y que tuvieran noción del uso de páginas web, la participación fue voluntaria y no existió remuneración económica. A los participantes se les informó de las características del experimento: la duración y de las actividades que realizarían durante este; adicionalmente firmaron un consentimiento para la realización del experimento y el estudio de los datos obtenidos. Para realizar el proceso de inducción emocional se le indicó al usuario que debía de disponer de 50 min y en total se realizarían 4 sesiones en diferentes días.

2.3 Estímulos

Los estímulos que se aplicaron a los usuarios para realizar el proceso de inducción se dividen en productos digitales que tuvieran un buen o mal diseño.

Para poder identificar y definir que los productos a utilizar tuvieran un buen o mal diseño se les realizó un análisis previo, en este se evaluaron los productos digitales por medio de las diez heurísticas de usabilidad de Jacob Nielsen. La evaluación por medio de estas heurísticas es un método utilizado para encontrar y evaluar problemas de usabilidad en el diseño de interfaces y se basa en la observación e interacción con la interfaz, adicionalmente se comentan los aspectos buenos y malos encontrados en la interfaz entre los evaluadores, una vez recabada toda la información se procede a validar y definir cuales interfaces cuentan con un buen o mal diseño.

En Nielsen (1994) se recomienda que dicho proceso de evaluación sea realizado por al menos tres evaluadores de manera independiente y ellos deberán tomar las notas pertinentes para su posterior análisis en conjunto con el resto de los evaluadores. Para este trabajo se utilizó la asistencia de cinco evaluadores, los cuales realizaron la evaluación heurística de cada producto seleccionado, tomaron notas e intercambiaron comentarios y anotaciones obtenidas para obtener la clasificación de acuerdo al diseño de cada uno de ellos.

2.4 Inducción de estados emocionales

Para realizar el diseño de la metodología de inducción de estados emocionales con productos digitales interactivos con el usuario se tomó como base la metodología desarrollada anteriormente por Soriano Terrazas (2018), esta utilizaba un proceso de inducción con realidad virtual inmersiva y estímulos de imágenes, audios y videos; sin embargo, metodología no permitía la interacción con el

ISSN en trámite

usuario de manera activa por tanto fue modificada y adaptada a lo que se requería para este trabajo.

El proceso necesario para llevar a cabo la inducción y la recolección de los datos fisiológicos de los usuarios y está conformada por tres etapas principales, las cuales se describen a continuación.

Etapa 1 Preparación: Esta etapa se conforma por 4 fases (Figura 1) en la primera se realiza el perfilamiento de los sujetos de prueba, este se realiza por medio de diversos instrumentos y cuestionario; al finalizar el perfilamiento se procede a explicarles el proceso de como se llevará a cabo la inducción.

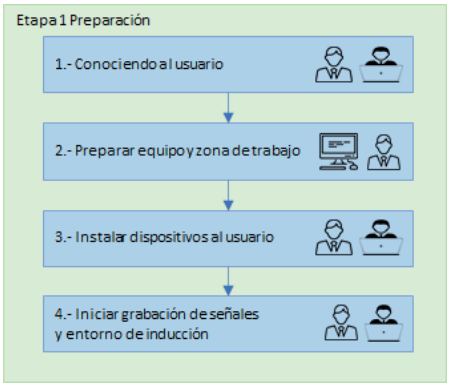


Figura 1. Etapa 1 preparación para el proceso de inducción

En la segunda fase se realiza la preparación del equipo y la zona de trabajo, en esta se valida el funcionamiento de los sistemas, equipo y sensores a utilizar, así como las condiciones ergonómicas y de más factores descritos en el documento de preparación.

En la tercera fase se realiza la instalación de los sensores y se debe verificar la comodidad del usuario al tener colocados los sensores; una vez que se ha validado toda la información y condiciones del entorno se procede a iniciar la grabación de la sesión y el entorno de inducción.

Etapa 2 Inducción: La segunda etapa se enfoca en la exposición del usuario a estímulos interactivos específicos para la evaluación de la UX y describe el proceso que se lleva a cabo para la inducción de estados emocionales.

Esta etapa está conformada por 5 actividades las cuales se pueden observar en Figura 2: durante estas actividades la interacción se da entre el usuario y el sistema, este último es el encargado de proporcionar las instrucciones a seguir por parte del usuario durante la inducción.

Etapa 3 Finalización: La última etapa está conformada por 4 fases (Figura 3), las primeras dos fases se enfocan en informar al usuario que ha finalizado el proceso de inducción y se procede a finalizar el entorno de inducción y el entorno de grabación de las señales.

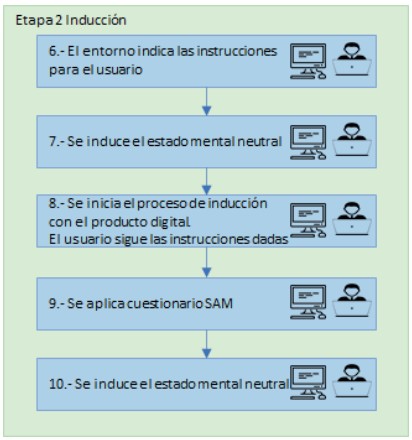


Figura 2. Etapa 2 proceso de inducción

En la tercera fase el evaluador procede a retirar los sensores biométricos y el gorro Emotiv Epoc Flex, en caso de que haga falta desinstalar algún dispositivo el usuario deberá comentarlo al evaluador para que este proceda a retirarlo y queden todos los sensores completamente retirados, en la cuarta y última fase se procede a aplicar los cuestionarios de estados mentales, en esta fase el evaluador debe aplicar y explicar al usuario de que trata el cuestionario PANAS, una vez llenado el cuestionario el evaluador debe de validar que el usuario se encuentre en un estado emocional neutral o positivo, de lo contrario debe aplicar un proceso de inducción para colocarlo en dicho estado.

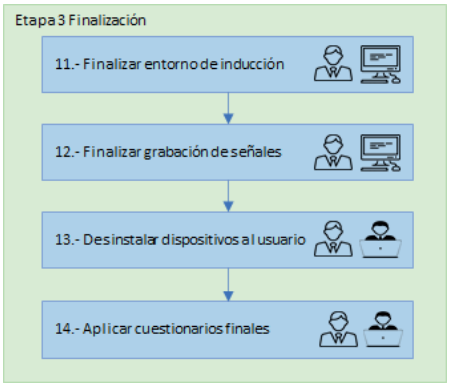


Figura 3. Etapa 3 finalización del proceso de inducción

2.5 Inducción de estados emocionales

Para poder realizar este proceso de inducción se desarrolló una aplicación web, la cual es la encargada de administrar los estímulos que se le presentarán a los usuarios para la interacción; adicionalmente para la recopilación de los datos fisiológicos se utilizó la herramienta UXLab, la cual permite recabar y sincronizar la información de las señales generadas por el usuario durante la evaluación.

En la primera sección del sistema el entorno da la bienvenida al usuario, posteriormente el sistema se enfoca en

ISSN en trámite

dar las instrucciones necesarias al usuario para iniciar el proceso de inducción en esta seccion el sistema coloca al ususario en un estado neutral y se realiza por medio de una línea base, donde el usuario debe realizar las actividades que el sistema le va indicando, este proceso tiene una duración de dos minutos; en la Figura 4 se muestran las pantallas correspondientes a la actividad.

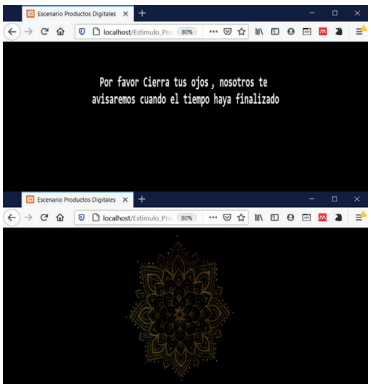


Figura 4. Pantallas inducción estado neutral

Una vez transcurrido ese tiempo se iniciará la exposición del usuario con los estímulos seleccionados y debe comenzar a realizar las actividades planteadas previamente, la actividad tiene una duración de 10 min por estímulo y por cada sesión se revisan 2 estímulos que tengan la misma clasificación, en la Figura 5 se muestra un ejemplo de ellas.

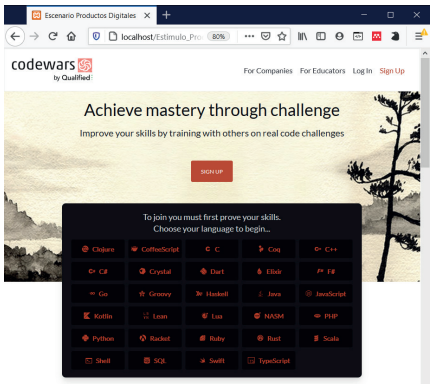


Figura 5. Ejemplo estímulo interactivo página codewars.com

Entre cada página web se realiza el llenado del cuestionario SAM y posterior al llenado el sistema inicia nuevamente el proceso de inducción a un estado neutral para el nuevo estímulo.

Para realizar la evaluación de los resultados obtenidos del proceso de inducción creado se utilizaron diversos métodos estadísticos que se describen a continuación.

2.6 Métodos estadísticos

En esta sección, se describe de manera general el proceso del enfoque experimental de Wohlin para ciencias computacionales, el cual es utilizado para explorar las relaciones obtenidas entre las variables y los datos recabados durante el proceso de inducción; los datos utilizados para ello fueron los cuestionarios de conociendo al usuario y SAM.

Coeficiente alfa de Cronbach De acuerdo con Cronbach (1951) este es un coeficiente que sirve para medir la fiabilidad de los datos a trabajar, el cual consiste en la media de las correlaciones entre las variables de la escala y se calcula a partir de las varianzas de las variables, en (1) se muestra la ecuación, donde K hace referencia al número de ítems es decir el número de páginas evaluadas, ΣVi es la suma de las varianzas de cada ítem y Vt es la varianza del total.

$$\alpha = \frac{K}{K-1}\left[1 - \frac{\Sigma Vi}{Vt}\right] \tag{1}$$

De acuerdo con (Mahesh et al., 2019) los resultados obtenidos se interpretan del siguiente modo: si el alfa resultante es menor a 0.2 es un resultado muy bajo, si el alfa es de 0.2 – 0.4 es un resultado bajo, en ambos casos es indicativo que se debe replantear el experimento, si el alfa resultante se encuentra entre 0.4 – 0.6 es un resultado moderado y queda a consideración del evaluador si replantea o no el experimento, si el alfa se encuentra entre 0.6 – 0.8 es un resultado bueno y si el alfa es mayor a 0.8 es un resultado alto, en ambos casos es indicativo de que las pruebas son confiables.

Normalidad: De acuerdo con Ost et al. (2000) la normalidad es utilizada para determinar si un conjunto de datos está bien modelado por una distribución normal, esta se realiza por medio de la prueba de saphiro, la cual cuenta con dos hipótesis (2) y un nivel de significancia de alfa de 0.05; para ser aceptada o rechazada una hipótesis se evalúa el p-value resultante, si este es menor al alfa la H0 es aceptada, de lo contrario se acepta la H1.

H0: La muestra proviene de una distribución normal.
H1: La muestra no proviene de una distribución normal. (2)

F-test: De acuerdo con Ost et al. (2000) la prueba F es utilizada para comprobar el supuesto de homogeneidad de varianzas o supuesto de homocedasticidad, contrasta la hipótesis nula de que dos poblaciones normales tienen la misma varianza y se aplica a poblaciones que tienen una distribución normal. Para esta prueba se tienen dos hipótesis (3) y un nivel de significancia de alfa de 0.05; para aceptar o rechazar una hipótesis se evalúa el p-value resultante; si es menor al alfa la H0 es rechazada y se acepta la H1.

ISSN en trámite

H0: La muestra no encontró diferencias significativas entre las varianzas.
H1: La muestra encontró diferencias significativas entre las varianzas. (3)

T-test: De acuerdo con Ost et al. (2000) la prueba T es utilizada para identificar si la variable tomada es significativa para el estudio que se realiza; para la prueba se tienen dos hipótesis (4) y un nivel de significancia para el alfa de 0.05; para aceptar o rechazar una hipótesis se evalúa el p-value resultante; si es menor al alfa la H0 es rechazada y se acepta la H1.

H0: No hay diferencia entre las medias poblacionales.
H1: Si hay diferencia entre las medias poblacionales. (4)

Pearson's X^2: De acuerdo con Ost et al. (2000) la X^2 de Pearson se aplica sobre dos variables para identificar si dos características son independientes o tienen una asociación; para ello se tienen dos hipótesis (5) y un nivel de significancia para el alfa de 0.05; para aceptar o rechazar una hipótesis se evalúa el p-value resultante; si es menor al alfa la H0 es rechazada y se acepta la H1.

H0: Las variables son independientes.
H1: Las variables son dependientes. (5)

Prueba de rachas: De acuerdo con Ost et al. (2000) la prueba de rachas se aplica para identificar si la variable tomada fue generada de manera aleatoria. Para aplicar esta prueba se tienen dos hipótesis (6) y un nivel de significancia para el alfa de 0.05, para aceptar o rechazar una hipótesis se evalúa el p-value resultante; si es mayor al alfa la H0 es aceptada, de lo contrario se acepta la H1.

H0: La muestra es aleatoria.
H1: La muestra no es aleatoria. (6)

Los resultados obtenidos de este proceso de inducción por todos los usuarios fueron 333 archivos (de señales fisiológicas EEG, ECG y GSR), adicionalmente se recabó información de seguimiento ocular, video de la pantalla y cámara web; además se cuenta con los datos registrados por los usuarios en los cuestionarios de conociendo al usuario, SAM y PANAS.

Para realizar el proceso del enfoque experimental de Wohlin fue necesario identificar la meta o alcance, las ideas a corroborar, definir los datos de estudio, variables de estudio, la selección de los sujetos de prueba y la descripción de la data set con el que se trabaja.

La meta para esta parte del trabajo fue analizar los datos registrados por los sujetos de prueba en los cuestionarios aplicados durante la evaluación de las páginas web, con el propósito de identificar si influye el grupo generacional, el sexo o el expertis en la valencia, activación y dominio que experimentan los usuarios durante la evaluación.

Las ideas a comprobar de la información recabada son las siguientes:

- El diseño de la página web impacta en los niveles de valencia, activación y dominio de los sujetos de prueba.
- El expertis del sujeto de prueba impacta en sus niveles de valencia, activación y dominio.
- El sexo del sujeto de prueba impacta en sus niveles de valencia, activación y dominio.
- El grupo generacional al que pertenece el sujeto de prueba impacta en sus niveles de valencia, activación y dominio.
- Existe una correlación entre valencia y activación .
- Existe una correlación entre valencia y dominio.
- Existe una correlación entre activación y dominio .

3. CONCLUSIONES

Después de realizar el análisis estadístico de las ideas planteadas utilizando los datos de los cuestionarios SAM y conociendo al usuario (recabados del proceso de inducción), se llegó a la conclusión de que los resultados para la variable valencia que registran los usuarios tienen una dependencia directa con el diseño que presenta la página web, adicionalmente, se identificó que las variables activación y dominio registradas tienen una dependencia directa con el grupo generacional que lo está evaluando, en la figura 6 se puede analizar de manera más clara la relación que existe entre las variables valencia, activación y dominio, donde se observa que mientras aumenta la valencia aumenta el dominio, y cuando la activación aumenta el dominio disminuye.

En conclusión, se cumplió el objetivo de crear un proceso de inducción emocional que contara con las características necesarias para permitir la interacción activa de los usuarios con los productos digitales web y de este modo lograr inducirlos a diferentes estados emocionales; adicionalmente, se logró generar un repositorio de datos de señales fisiológicas y biométricas que permitirá realizar el estudio de emociones enfocadas e la evaluación de la UX.

4. TRABAJO FUTURO

El trabajo futuro de este proyecto es la identificación de estados emocionales, para ello es necesaria la implementación de un algoritmo de redes neuronales que nos permita realizar la clasificación de estados emocionales a partir de las señales fisiológicas recabadas con esta experimentación, ya que como se mencionó anteriormente no se cuenta con repositorios de señales fisiológicas enfocados a la UX.

Para lograr este nuevo objetivo, será necesario realizar el análisis de algoritmos de clasificación con redes neuronales y la selección de aquellos que de acuerdo con la literatura obtengan los mejores resultados a la hora de realizar la clasificación de estados emocionales por medio de

ISSN en trámite

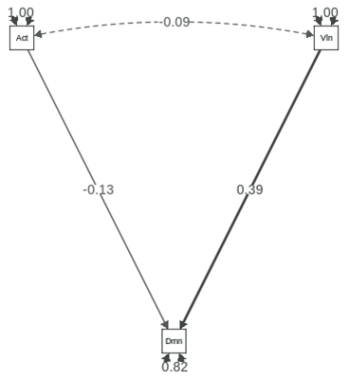


Figura 6. Representación de correlación

señales fisiológicas, una vez obtenida dicha información será necesario adaptarla o modificarla para que trabaje con los datos generados en este trabajo.

REFERENCIAS

Arana-Llanes, J.Y., Rendon-Miranda, J.C., Gonzalez-Franco, N., Gonzalez-Serna, G., and Lopez-Sanchez, M. (2015). ExplotacioN De Estados Cognitivos En Entornos E-Learning a Partir De Bci No Invasivas. September, 1–6.

Balam Guzman, L.A. (2015). *Modelo semantico para la gestion de tecnicas de HCI mediante el monitoreo de actividad bioelectrica (EEG) para caracterizar estados mentales y su relacion con cambios en el contexto del usuario*. Ph.D. thesis, Centro Nacional de Investigacion y Desarrollo Tecnologico.

Claudia, A., Escobar, E., Isabel, M., Cañizo, L., and Aranalde, J.M. (2013). " La induccion de emociones a traves de ciertas escenas cinematograficas en estudiantes mexicanos de preparatoria ". Technical report, Academia de ciencias de morelos.

Cronbach, L.J. (1951). Coefficient alpha and the internal structure of tests. *Psychometrika*, 16(3), 297–334. doi: https://doi.org/10.1007/BF02310555.

Emotiv Sitio Oficial (2017). Emotiv. URL `https://www.emotiv.com/epoc/`.

Jonathan Picard, R..W..K. (2002). Computers that recognise and respond to user emotion: theoretical and practical implications. *Interacting with computers*.

Katsigiannis, S. and Ramzan, N. (2018). Dreamer: A database for emotion recognition through eeg and ecg signals from wireless low-cost off-the-shelf devices. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 22(1), 98–107. doi:10.1109/JBHI.2017.2688239.

Koelstra, S., Patras, Ioannis, C., Nijholt, A., Soleymani, M., Pun, T., Lee, J.S., Yazdani, A., and Ebrahimi, T. (2012). DEAP: A database for emotion analysis; Using physiological signals. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 3(1), 18–31. doi:10.1109/T-AFFC.2011.15.

Madera-carrillo, H., Zarabozo, D., Ruiz-diaz, M., and Berriel-saez, P. (2015). El Sistema Internacional de Imagenes Afectivas (IAPS) en poblacion mexicana. Technical report.

Mahesh, B., Prassler, E., Hassan, T., and Garbas, J.U. (2019). Requirements for a Reference Dataset for Multimodal Human Stress Detection. *2019 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops, PerCom Workshops 2019*, 492–498. doi:10.1109/PERCOMW.2019.8730884.

Mavridou, I., McGhee, J.T., Hamedi, M., Fatoorechi, M., Cleal, A., Ballaguer-Balester, E., Seiss, E., Cox, G., and Nduka, C. (2017). FACETEQ interface demo for emotion expression in VR. *Proceedings - IEEE Virtual Reality*, 441–442. doi:10.1109/VR.2017.7892369.

Miranda Correa, J.A., Abadi, M.K., Sebe, N., and Patras, I. (2018). AMIGOS: A Dataset for Affect, Personality and Mood Research on Individuals and Groups. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 3045(i), 1–14. doi:10.1109/TAFFC.2018.2884461.

Nielsen, J. (1994). Usability inspection methods. *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, 1994-April, 413–414. doi:10.1145/259963.260531.

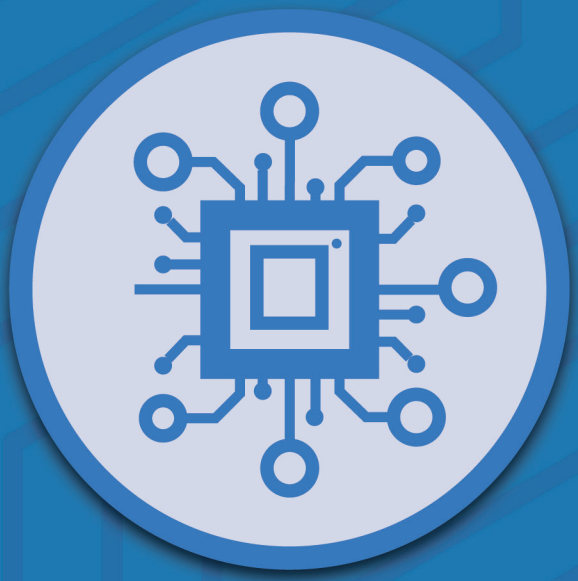
Ost, M.H., Orn, B.J., and Wohlin, C. (2000). Using Students as Subjects — A Comparative Study of Students and Professionals in Lead-Time Impact Assessment. 214, 201–214.

Savran, A., Ciftci, K., Chanel, G., Mota, J.C., Viet, L.H., Sankur, B., Akarun, L., Caplier, A., and Rombaut, M. (2006). Emotion Detection in the Loop from Brain Signals and Facial Images. *eNTERFACE*, 06(January), 69–80.

Soleymani, M., Lichtenauer, J., Pun, T., and Pantic, M. (2012). A multimodal database for affect recognition and implicit tagging. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 3(1), 42–55. doi:10.1109/T-AFFC.2011.25.

Soriano Terrazas, J. (2018). *Metodologia para caracterizar e inducir estados cognitivos y emocionales mediante realidad virtual inmersiva*. Ph.D. thesis, Centro Nacional de Investigacion y Desarrollo Tecnologico.

Vila, J. and Sanchez, M. (2001). El Sistema Internacional de Imagenes Afectivas (IAPS): Adaptacion española. Segunda parte. *Revista de psicologia general y aplicada*, (March 2015). doi:233721592.



INGENIERÍA ELECTRÓNICA

cenidet®
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

ISSN en trámite

Control basado en observador de la concentración de glucosa en pacientes con Diabetes Mellitus Tipo 1

Alonso-Bastida Alexis * **Adam-Medina Manuel** *
Posada-Gómez Rubén ** **Salazar-Piña Azucena** ***

* *Departamento de Ingeniería Electrónica, TecNM/CENIDET, Cuernavaca, Morelos, México.*
** *TecNM/CRODE, Orizaba, Veracruz, México.*
*** *Facultad de Nutrición, UAEM, Cuernavaca, Morelos, México.*

Resumen
En el presente trabajo se desarrolla una alternativa de solución para la regulación de la concentración de glucosa en sangre en pacientes con diabetes mellitus tipo 1. Dicha alternativa es solventada por dos casos de estudio en simulación, en los cuales se demuestra primeramente la necesidad de generar alternativas de control para regular los niveles de glucosa en sangre en pacientes con diabetes mellitus tipo 1 y se desarrolla una alternativa de control predictivo por modelo de referencia discreto en conjunto con un filtro de Kalman extendido, el cual es utilizado para la estimación y filtrado de los estados del sistema que alimentan al controlador. Con base a los resultados gráficos y numéricos de las casos de estudio generados se logra obtener una solución de control la cual garantiza el bienestar del paciente al mantener la mayor parte del tiempo los niveles de concentración de glucosa en sangre en una zona segura lejos de condiciones de hiper e hipoglucemia, evitando en su totalidad episodios de hipoglucemia y minimizando el tiempo de hiperglucemias derivadas de ingestas alimenticias bajo las condiciones de simulación planteadas.

Keywords: Control predictivo; Diabetes *Mellitus*; Filtro de Kalman Extendido & Homeostasis de la glucosa.

1. INTRODUCCIÓN

Con el paso del tiempo, el aumento en los casos de problemas metabólicos en la sociedad cada día es más frecuente. Esto en gran medida es producto de una amplia diversidad de causas como pueden ser aquellas de tipo genéticas (Reyes Sanamé et al., 2016), una mayor esperanza de vida en las personas (Yanase et al., 2017), entornos ambientales y factores facilitadores como hábitos sedentarios (Kim, 2018), deficiencia en la dieta alimenticia (Li et al., 2017), obesidad (ncd, 2017), tabaquismo, consumo de alcohol y entorno social (Bertoglia et al., 2017). Debido a esta clase de padecimientos metabólicos, la sociedad tiene un mayor riesgo de generar enfermedades cardiovasculares e hipertensión (Uloko et al., 2018), por tal motivo es de suma importancia generar alternativas de prevención y solución de estos padecimientos.

Debido a que el número de padecimientos metabólicos es demasiado extenso, nos enfocamos en un problema particular que es el caso de las personas con diabetes mellitus tipo 1 (T1DM). La diabetes mellitus es un conjunto de enfermedades metabólicas con la principal característica de presencia de hiperglucemia derivada de una deficiencia en la secreción de la insulina (Hayes Dorado, 2008). Existen una gran variedad de tipologías de esta enfermedad, entre ellas las principales son la diabetes tipo 1, tipo 2 (T2DM) y gestacional. La diabetes tipo 1 generalmente se da a temprana edad y es resultado de la destrucción de las células beta mediada inmunológicamente (Barreiro et al., 2014; Orrego et al., 1991). Las personas que padecen T1DM son insulinodependientes debido a que requieren de administración exógena de insulina para controlarla adecuadamente los niveles de glucosa en sangre.

Dadas las condiciones insulinodependientes de los pacientes con T1DM, es sumamente necesario tener un control adecuado en las infusiones de insulina exógena que se suministran a lo largo del día, ya que de ello dependerá la aparición de condiciones como la hiperglucemia e hipoglucemia. Existen dos camino a seguir para llevar el control de la infusión de insulina, en la primera el control es llevado únicamente por la persona, en la cual por medio de plumas de insulina y generalmente antes de cada alimento se suministra una cantidad especifica de insulina. La otra alternativa se realiza por medio de una

ISSN en trámite

bomba de insulina (también llamada páncreas artificial), en la cual por medio de un control automático en conjunto con la monitorización de la persona se suministra de manera automática insulina cuando los niveles de glucosa se encuentran en zonas de hiperglucemia.

En el área de control automático existen una gran cantidad de trabajos enfocados en el control de los niveles de glucosa con base a sistemas de páncreas artificiales, los cuales van desde controladores tradicionales como es el caso del control Proporcional Integral Derivativo (PID), ejemplo de ello se presenta en Barnes and Jones (2019), donde se utiliza un controlador PID clásico aplicando a una nueva técnica de infusión de insulina (infusión de insulina intraperitoneal), mejorando la gestión de la glucosa al disminuir los periodos en hiperglucemia y hipoglucemia. En Paiva et al. (2020) se desarrolla un control PID de orden fraccionario para regular las concentraciones glucosa en el organismo, con base a las características fraccionarias del controlador se logra mejorar la regulación de la glucosa, pero como consecuencia se genera una mayor demanda de insulina suministrada.

De la misma manera han surgido técnicas de control predictivo como es el caso de Aradóttir et al. (2019), donde se desarrolla una metodología de Control Predictivo por Modelo de referencia (MPC) para regular los niveles de glucosa en pacientes con T2DM, tomando en cuenta la acción de insulinas de lenta absorción, con respecto a la ingesta de carbohidratos de rápida absorción, evitando episodios de hipoglucemia previniendo a largo plazo renopatías. Abuin et al. (2020) presenta un MPC pulsátil estable, el cual esta basado en la manera en que un páncreas sano segrega la insulina (cada 5-10 min), con lo cual dicho controlador emula de manera más fidedigna la dinámica del páncreas.

Por parte de las metodologías de control no lineal, en Ahmad et al. (2019) se desarrolla un controlador no lineal adaptable considerando incertidumbre paramétrica, así como ruido en la medición de la glucosa, reduciendo así los sobretiros generados a causa de la regulación de la glucosa.

Derivado de lo anteriormente expuesto, existe una problemática general, la cual es mantener los niveles de glucosa en sangre en una zona segura que se encuentre fuera de valores de hiper e hipoglucemia. Desde el punto de vista del control automático existe una gran cantidad de alternativas de solución para esta problemática, por lo cual el objetivo principal de este trabajo es generar una alternativa del control de la glucosa en pacientes con T1DM basado en un controlador predictivo por modelo de referencia discreto (DMPC) en conjunto de un filtro de Kalman extendido (EKF), con el cual se considere disponible solamente la medición de la concentración de glucosa bajo ruido en dicha medición, tratando de mantener los niveles de concentración de glucosa en sangre el menor tiempo posible fuera de condiciones de hiper e hipoglucemia.

1.1 Organización del documento

El documento está compuesto por una sección de Materiales y métodos, en donde se desarrolla un planteamiento de la metodología a desarrollar, conceptos generales del tema y el desarrollo matemático propuesto. Posteriormente en la sección de Resultados se ilustran los gráficos y resultados numéricos obtenidos, para con ello generar un análisis de los resultados en la sección de Discusión y por último se presentan las conclusiones del trabajo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Modelado de la homeostasis de la glucosa

Hoy en día existe una gran variedad de representaciones matemáticas de la homeostasis de la glucosa tanto para personas sanas como para pacientes con T1DM. En este caso de estudio se utilizaron dos representaciones matemáticas basadas en el enfoque de Bergman para representar la homeostasis de la glucosa en personas sanas y pacientes con T1DM.

Representación matemática de una persona sana

La representación de la homeostasis de la glucosa en un paciente sano esta dada por el modelo presentado en Orozco-López et al. (2018), el cual está compuesto por un conjunto de tres ecuaciones diferenciales en las que se modela la dinámica de la insulina (1), el efecto de la insulina en la glucosa (2) y la concentración de glucosa en plasma (3).

$$\frac{dI(t)}{dt} = -\eta(I(t) - I_b) - \gamma(G(t) - h)t; \quad (1)$$

$$\frac{dX(t)}{dt} = -p_2X(t) + p_3(I(t) - I_b); \quad (2)$$

$$\frac{dG(t)}{dt} = -p_1(G(t) - G_b) - X(t)G(t) + d(t). \quad (3)$$

El subíndice b, denota las concentraciones basales del parámetro analizado en el modelado. En el caso de la dinámica de la concentración de la glucosa (3), se toma en cuenta una perturbación variante en el tiempo definida como $d(t)$, la cual para este caso particular es considerada como el efecto de la ingesta alimenticia. La descripción del resto de parámetros del modelo son definidos más adelante.

Representación matemática de un paciente con T1DM

Siguiendo con el hilo conductor de la representación matemática de la homeostasis de la glucosa, toca el turno de definir dinámica de la homeostasis de la glucosa en pacientes con T1DM, la cual está definida por (4-6) basado en el trabajo propuesto por Flores-Martínez et al. (2019). El cual aborda de manera análoga las variables de estado del sistema considerando la concentración de

ISSN en trámite

Cuadro 1. **Descripción de los parámetros de los modelos matemáticos presentados.**

Símbolo	Unidades	Descripción
p_1	(1/min)	Constante de velocidad independiente de la insulina.
p_2	(1/min)	Ritmo de disminución de la capacidad de captación de glucosa de los tejidos.
p_3	$\frac{(\mu U/mL)}{min^2}$	Aumento de la dependencia a la insulina.
η	(1/min)	Tasa de decaimiento de primer orden de la insulina en sangre
h	(mg/dL)	Umbral de glucosa por encima del cual las células beta liberan insulina
γ	$\frac{\mu U/ml}{min^2\ (mg/dL)}$	Tasa de liberación de insulina de las células beta pancreáticas
V_I	dL	Volumen de distribución de la insulina
U_I	(mU/dL)	Infusión de insulina exógena
I	(μU/mL)	Concentración de insulina
X	(1/min)	Efecto de la insulina en la glucosa
G	mg/dL	Concentración de glucosa en plasma
Subíndices		
b	-	Valor Basal
d	-	Paciente Diabético

Nota: El valor numérico de cada uno de los parámetros se puede encontrar en Flores-Martínez et al. (2019) y Orozco-López et al. (2018).

Insulina (4), efecto de la insulina en la glucosa (5) y la concentración de la glucosa (6).

$$\frac{dI_d(t)}{dt} = \eta_d(I_d(t) - I_{db}) + \frac{U_I(t)}{V_I}; \quad (4)$$

$$\frac{dX_d(t)}{dt} = -p_{d2}X_d(t) + p_{d3}I_d(t); \quad (5)$$

$$\frac{dG_d(t)}{dt} = -p_{d1}G_d(t) - X_d(t)(G_d(t) - G_{db}) + d(t). \quad (6)$$

Donde el subíndice d, se utiliza para denotar que es un paciente con T1DM. Como se puede apreciar las diferencias entre modelos es mínima, al considerarse en el caso de un paciente con T1DM la adición del efecto de la infusión de insulina exógena ($U_I(t)$)

La Tabla 1, presenta la nomenclatura de las variables y parámetros definidos por los modelos matemáticos utilizados.

2.2 Discretización del sistema

Debido a que la representación del sistema se encuentra en tiempo continuo, primeramente se procedió a colocarlo en una representación de espacio de estados, para posteriormente linealizar el sistema con base a sus puntos de equilibrio. Una vez linealizado el sistema se procedió a discretizar el sistema con base a la herramienta de MatLab® "*Retenedor de orden cero*", considerando un tiempo de muestreo de 0.03min.

2.3 Conceptos generales del control predictivo

El control predictivo por modelo de referencia es una técnica de control óptima, de la cual su objetivo principal es calcular la trayectoria futura de la variable manipulada para optimizar el comportamiento futuro de la salida del sistema (Wang, 2009). El desarrollo del DMPC está dado por el siguiente conjunto de ecuaciones (7- 11), el cual es descrito a mayor detalle en (Wang, 2009).

Asumiendo que se cuenta con un sistema discreto de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= A_m x_k + B_m u_k; \\ y_k &= C_m x_k. \end{aligned} \quad (7)$$

Es posible generar un espacio de estados con integrador de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + B\Delta u(k) \\ y(k) &= Cx(k). \end{aligned} \quad (8)$$

Donde:

$$x(k+1) = \left[\Delta x(k+1)\ \ y(k+1)\right]^T;$$

$$A = \begin{bmatrix} A_m & 0_m^T \\ C_m A_m & 1 \end{bmatrix};$$

$$B = \left[B_m\ \ C_m B_m\right]^T;$$

$$C_m = \left[0_m\ \ 1\right].$$

0_m es un vector de ceros de dimensiones apropiadas, Δ denota los incrementos en las variables x y u, el conjunto de (A, B, C) es también llamado espacio de estados aumentado y es utilizado para el diseño del control predictivo.

Considerando que el objetivo del controlador es que salida predicha se acerque lo más posible a la señal de referencia, es necesario encontrar el vector óptimo de ΔU, de tal manera que una función de error entre el punto de ajuste y la salida predicha sea minimizada (Wang, 2009). Se asume un vector de *set-point* de la siguiente forma:

$$R_s^T = [1\ 1\ ...\ 1]\, r(k);$$

la dimensión del vector de unos es igual al horizonte de predicción (N_p), una vez definido el vector *set-point* se define la función costo del objetivo de control:

$$J = (R_s - Y)(R_s - Y) + \Delta U^T \bar{R} \Delta U; \quad (9)$$

donde $\bar{R}$ es una matriz diagonal con dimensión igual al horizonte de control (N_c), $\bar{R} = r_w I_{N_c \times N_c}$, r_w es un parámetro de ajuste y $Y = Fx(k) + \Phi\Delta U$.

$$F = \left[CA\ \ CA^2\ \ CA^3\ \ ...\ \ CA^{N_p}\right]^T;$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} CB & 0 & 0\ ... & 0 \\ CAB & CB & 0\ ... & 0 \\ \vdots & & & \\ CA^{N_P-1}B & CA^{N_P-2}B & ... & CA^{N_P-N_C}B \end{bmatrix}.$$

ISSN en trámite

Derivando la función costo obtenemos la solución óptima de la señal de control:

$$\Delta U = (\Phi^T\Phi + \bar{R})^{-1}\Phi^T(R_s - Fx(k)). \quad (10)$$

Tomando en cuenta el principio de horizonte en retroceso (*Receding horizon*), dicha expresión también puede ser vista de la siguiente manera:

$$\Delta u(k) = [1\ 0\ ...\ 0]\,(\Phi^T\Phi + \bar{R})^{-1}\Phi^T(R_s - Fx(k));$$
$$\Delta u(k) = K_y r(k) - K_{mpc}x(k). \quad (11)$$

Donde K_y es la ganancia referente a la variación en el punto de referencia, de la cual el horizonte de referencia es el primer elemento de:

$$(\Phi^T\Phi + \bar{R})^{-1}\Phi^T R_s$$

Y K_{mpc} es la primer fila de:

$$(\Phi^T\Phi + \bar{R})^{-1}\Phi^T F.$$

2.4 Conceptos generales del filtro de Kalman Extendido

El filtro de Kalman extendido es un algoritmo recursivo utilizado para la estimación de estados y parámetros bajo condiciones de ruido en las mediciones en sistemas no lineales (Simon, 2006).

El desarrollo del EKF está dado por un sistema no lineal de la forma:

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k) + w_k; \quad (12)$$
$$y_k = g(x_k, u_k) + v_k.$$

donde x es el vector de los estados del sistema, y es el vector de las salidas del sistema, $f(.)$ y $g(.)$ son funciones no lineales del sistema y w así como v son los el ruido en la medición de estados y salidas del sistema.

Con base a (12) procede a la etapa de predicción del EKF, donde basado en la evaluación de los jacobianos del sistema (13), se genera una estimación a *priori* de los estados del sistema (14) y el error de covarianza (15).

$$A_k = \frac{\partial f(x_k, u_k)}{\partial_X}; \quad (13)$$

$$\hat{x}_k^- = f(\hat{x}_{k-1}^-, u_k); \quad (14)$$

$$P_k^- = A_k P_{k-1} A_k^T + Q. \quad (15)$$

Posteriormente en la etapa de corrección se calcula la ganancia de Kalman (16), la cual será utilizada para la actualización de la estimación de los estados a *posteriori* (17) y el error de covarianza (18).

$$K_k = P_k C^T (CPC^T + R)^{-1}; \quad (16)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(y_k - C\hat{x}_{k-1}); \quad (17)$$

$$P_k = (I - K_k C)P_k^-. \quad (18)$$

donde C es un vector que define las salidas del sistema e I es una matriz identidad de dimensiones apropiadas, Q y R son matrices de ruido en la medición de los estados y salidas. De acuerdo a las ecuaciones del EKF presentadas, el proceso iterativo del algoritmo será desarrollado desde una muestra de tiempo inicial hasta una final definida por el final del proceso.

2.5 Control predictivo basado en observador

Debido a que en el control predictivo basado en modelo es necesario tener disponibles las mediciones de todos los estados (Wang, 2009), es que en la gran mayoría de los procesos donde se aplica este tipo de control es necesario utilizar estimadores de estado para generar datos sobre las mediciones de los estados no medibles.

Tomando en cuenta que la representación del control solo sufre un ligero cambio al sustituir los valores de las mediciones de los estados por las estimaciones del EKF, en Fig. 1, se presenta el esquema a bloques del controlador MPC con la adición del EKF.

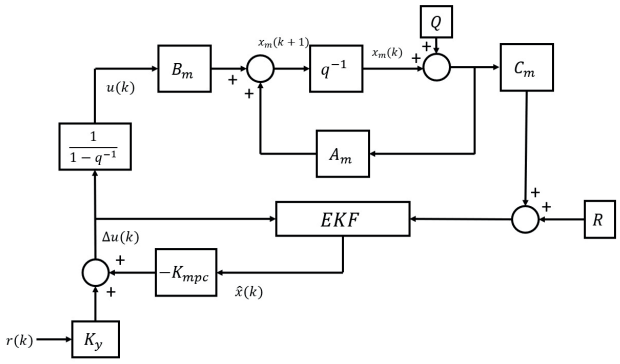


Figura 1. Diagrama a bloques del Controlador DMPC con EKF propuesto

3. RESULTADOS

En esta sección se plantean dos casos de estudio particulares, el primer caso está destinado a contrastar las dinámicas de la homeostasis de la glucosa en un paciente con T1DM y una persona sana; posteriormente en el segundo caso se desarrolla una prueba del control de la concentración de glucosa en sangre (BGC) en un paciente con T1DM el cual cuenta con un sistema de control automático de infusión de insulina. Ambos caso serán explicados a detalla posteriormente.

3.1 Caso 1: Contraste de la homeostasis de la glucosa en una persona sana y un paciente con T1DM

El presente caso es una prueba en simulación que consta de un total de 2h, en el cual por medio de los modelos matemáticos presentados anteriormente se genera la respuesta dinámica de la homeostasis de la glucosa en una persona sana y un paciente con T1DM ante una ingesta alimentaria de 10g de glucosa (color naranja). La Figura 2, ilustra el resultado gráfico de *Caso 1*, en color azul muestra la dinámica de la BGC en una persona sana y en verde la del paciente con T1DM. Se inicia desde un punto inicial de 100 mg/dL en ambos casos, donde existe una diferencia marcada en dicha concentración, ya que en el paciente con T1DM la BGC tiende a encontrarse en un

ISSN en trámite

valor de 120 mg/dL, mientras en la persona en 70 mg/dL. Al presentarse una ingesta alimenticia en ambos caso la BGC tiende a aumentar y disminuir a lo largo del tiempo de manera análoga tendiendo a regresar a los niveles de 120 y 70 mg/dL respectivamente.

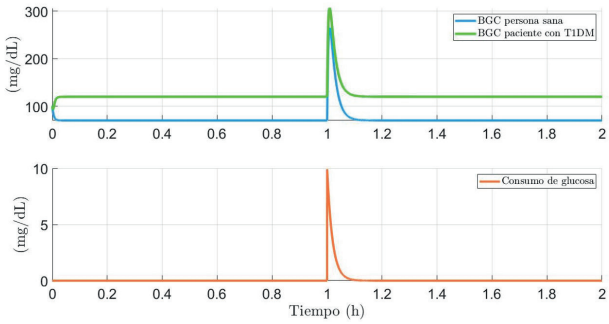


Figura 2. Dinámica de la homeostasis de la glucosa en una persona sana y un paciente con T1DM

Debido a que los niveles BGC en un paciente con T1DM difieren en gran medida de los de una persona sana, en consecuencia el paciente tiende a encontrarse en periodos de hiperglucemia más prolongados. Por esta razón es que existe la necesidad de tener un control de la BGC con ayuda de infusiones de insulina exógena en pacientes con T1DM, ya que se busca disminuir dichos episodios prolongados de hiperglucemia y prevenir hipoglucemias en caso de una suministración elevada de insulina.

3.2 Caso 2: Homeostasis de la glucosa en un paciente con T1DM con la adición de un DMPC con EKF

Para este caso, se desarrolla una prueba en simulación de regulación de BGC en un paciente con T1DM a lo largo de un periodo de 24h. En esta simulación se considera un sistema de infusión de insulina automático, en el cual sólo se encuentra disponible la medición de la concentración de glucosa "$G(t)$" en presencia de ruido blanco y la concentración de Insulina "$I(t)$" en conjunto con el efecto de la insulina en la glucosa "$X(t)$" son estados estimados del sistema; el controlador utilizado es un DMPC lineal en conjunto con un EKF encargado de estimar y filtrar los estados del sistema. El controlador es calculado con base a un horizonte de predicción de 80 y un horizonte de control de 40, la referencia es de 90 mg/dL, restringiendo la infusión de insulina a 80 mU/dL considerando que la saturación del actuador es de 100 mU/dL, el tiempo de discretización utilizado es de 0.1 min. En la simulación se consideran tres ingestas de glucosa, la primera ingesta tiene un valor de 15g y es presentada 7h después de iniciada la simulación, la segunda ingesta es realizada a las 12h con un valor de 20g y por último a las 17h se genera la tercera ingesta de 10g de glucosa.

La Fig. 3, presenta los resultados gráficos de la regulación de BGC con respecto al controlador DMPC con EKF. En ella se muestran dos gráficos; el primero de ellos muestra la dinámica de BGC (color verde, medición disponible del sistema), la estimación de la señal filtrada con el EKF (color rojo) y por último en azul y negro de muestran las cotas de la hiperglucemia e hipoglucemia. El segundo gráfico muestra la dinámica de la infusión de la insulina exógena (definida en color naranja). Inmediatamente de cada ingesta los niveles de BGC aumentan hasta llegar a valores por encima de la cota de hiperglucemia (mayor a 180 mg/dL), con lo cual la demanda de insulina exógena aumenta hasta 80 mU/dL debido a la restricción propuesta en la estrategia de control y deciende a valores cercanos a 15 mU/dL con la finalidad de mantener los niveles de BGC en 90 mg/dL que es una zona segura fuera de hiper e hipoglucemias.

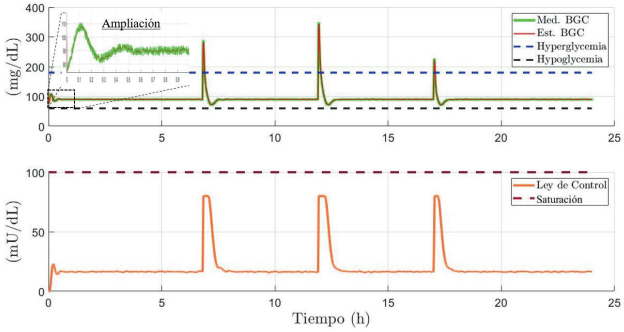


Figura 3. Regulación de la BGC con respecto a un controlador DMPC con EKF

4. DISCUSIÓN

Con base a los resultados generados de ambos casos de estudio propuestos, primeramente en el *Caso 1*, es posible contemplar los efectos de la ingesta alimenticia en los niveles de BGC tanto en personas sana y pacientes con T1DM, la cual genera episodios de hiperglucemia a corto plazo. Debido a la discrepancia que existe entre la dinámica de BGC en pacientes con T1DM y personas sanas, además de los tiempos prolongados de hiperglucemia en pacientes con T1DM, es necesario tener un control de dicha variable para asegurar que el paciente se encuentre en una zona segura (90 mg/dL) fuera de hiper e hipoglucemias.

En *Caso 2*, con la finalidad de generar una alternativa de control se desarrolló una estrategia de control de BGC para un paciente con T1DM. Debido a que sólo se cuenta con la medición de la BGC con la adición de ruido blanco y que el control DMPC necesita tener disponibles las mediciones de todos los estados del sistema, es necesario la implementación de un estimador de estados. El EKF es una alternativa que soluciona la problemática de estimación en presencia de ruido en la mediciones (ver zona de Ampliación en Figura 3), con el cual es posible mejorar el desempeño de controlador al aportarle al controlador un conjunto de señales filtradas, evitando así una gestión inadecuada de la infusión de insulina producto de ruido en las mediciones.

ISSN en trámite

Gracias a que en el DMPC es posible colocar restricciones en actuadores, fue posible generar una solución subóptima en la cual se evita saturar a los actuadores del sistema, trabajando a un 80 % de la capacidad nominal. El desempeño con base a error medio cuadrático tuvo un valor de 18.46 mg/dL, el cual es el producto de la diferencia entre la señal de referencia (90 mg/dL) y la salida del sistema (BGC), garantizando así el bienestar del paciente.

Con respecto al desempeño obtenido de la técnica de control se llega a una solución subóptima de la problemática de regulación de BGC en pacientes con T1DM, al asegurar que los niveles de BGC se mantengan la mayor parte del tiempo en una zona segura y evitando en su totalidad episodios de hipoglucemias. La razón de llamarle una solución subóptima es debido al hecho de que existen una gran cantidad de factores que aún se pueden considerar a la hora del desarrollo del controlador, que resultan ser una ventana de oportunidades para investigaciones futuras.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó una alternativa para el problema de regulación de BGC en pacientes con T1DM, simulando dos casos de estudio, en el primero de ellos contrastando las diferencias entre la BGC en personas sanas y pacientes con T1DM, demostrando desde el punto de vista matemático la necesidad de llevar un control de BGC en los pacientes con T1DM. En el segundo caso se desarrolla el controlador DMPC en conjunto con un EKF, con base a los resultados generados se consigue desarrollar una solución subóptima del problema de regulación existente, la cual puede ser mejorable al tomar en cuenta una mayor cantidad de restricciones a la hora de desarrollar la estrategia de control, dejando la puerta abierta para futuras investigaciones en el área. En general el problema de regulación de BGC en pacientes con T1DM es solucionado, garantizando de esta forma una mejora en la calidad de vida del paciente al evitar episodios de hipoglucemia y minimizando el tiempo de episodios de hiperglucemia bajo las condiciones propuestas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue desarrollado con base al apoyo recibido por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y el Tecnológico Nacional de México (TecNM).

REFERENCIAS

(2017). Trends in obesity and diabetes across africa from 1980 to 2014: an analysis of pooled population-based studies. *International journal of epidemiology*, 46(5), 1421–1432.

Abuin, P., Rivadeneira, P.S., Ferramosca, A., and González, A.H. (2020). Artificial pancreas under stable pulsatile mpc: Improving the closed-loop performance. *Journal of Process Control*, 92, 246–260.

Ahmad, I., Munir, F., and Munir, M.F. (2019). An adaptive backstepping based non-linear controller for artificial pancreas in type 1 diabetes patients. *Biomedical Signal Processing and Control*, 47, 49–56.

Aradóttir, T.B., Boiroux, D., Bengtsson, H., Kildegaard, J., Jensen, M.L., Jørgensen, J.B., and Poulsen, N.K. (2019). Model predictive control for dose guidance in long acting insulin treatment of type 2 diabetes. *IFAC Journal of Systems and Control*, 9, 100067.

Barnes, A.J. and Jones, R.W. (2019). Pid-based glucose control using intra-peritoneal insulin infusion: an in silico study. In *2019 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 1057–1062. IEEE.

Barreiro, S.C., Rigual, M.R., Lozano, G.B., Siguero, J.L., Pelegrín, B.G., Val, M.R., and Dea, M.C. (2014). Epidemiología de la diabetes mellitus tipo 1 en menores de 15 años en españa. In *Anales de pediatría*, volume 81, 189–e1. Elsevier.

Bertoglia, M.P., Gormaz, J.G., Libuy, M., Sanhueza, D., Gajardo, A., Srur, A., Wallbaum, M., and Erazo, M. (2017). The population impact of obesity, sedentary lifestyle, and tobacco and alcohol consumption on the prevalence of type 2 diabetes: Analysis of a health population survey in chile, 2010. *PloS one*, 12(5), e0178092.

Flores-Martínez, M.A., Osorio-Gordillo, G.L., Vargas-Méndez, R.A., and Reyes-Reyes, J. (2019). Fuzzy functional observer for the control of the glucose-insulin system. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 37(4), 5085–5096.

Hayes Dorado, J.P. (2008). Diabetes mellitus tipo 1. *Revista de la Sociedad Boliviana de Pediatría*, 47(2), 90–96.

Kim, S.Y. (2018). Sedentary lifestyle and cardiovascular health. *Korean journal of family medicine*, 39(1), 1.

Li, Y., Wang, D.D., Ley, S.H., Vasanti, M., Howard, A.G., He, Y., and Hu, F.B. (2017). Time trends of dietary and lifestyle factors and their potential impact on diabetes burden in china. *Diabetes care*, 40(12), 1685–1694.

Orozco-López, J.O., Castañeda, C.E., Rodríguez-Herrero, A., García-Sáez, G., and Hernando, E. (2018). Linear time-varying luenberger observer applied to diabetes. *IEEE Access*, 6, 23612–23625.

Orrego, A., Borrero, J., Restrepo, J., and Velez, H. (1991). *Fundamentos de medicina: Endocrinología*. Corporación para investigaciones biologicas.

Paiva, H.M., Keller, W.S., and da Cunha, L.G.R. (2020). Blood-glucose regulation using fractional-order pid control. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 31(1), 1–9.

Reyes Sanamé, F.A., Pérez Álvarez, M.L., Alfonso Figueredo, E., Ramírez Estupiñan, M., and Jiménez Rizo, Y. (2016). Tratamiento actual de la diabetes mellitus tipo 2. *Correo científico médico*, 20(1), 98–121.

Simon, D. (2006). *Optimal State Estimation Kalman, H, and Nonlinear Approaches*. John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

Uloko, A.E., Musa, B.M., Ramalan, M.A., Gezawa, I.D., Puepet, F.H., Uloko, A.T., Borodo, M.M., and Sada,

ISSN en trámite

K.B. (2018). Prevalence and risk factors for diabetes mellitus in nigeria: a systematic review and meta-analysis. *Diabetes Therapy*, 9(3), 1307–1316.

Wang, L. (2009). *Model predictive control system design and implementation using MATLAB®*. Springer Science & Business Media.

Yanase, T., Yanagita, I., Muta, K., and Nawata, H. (2017). Frailty in elderly diabetes patients. *Endocrine journal*, EJ17–0390.

ISSN en trámite

Comparación de algoritmos de consenso para demostrar la eficacia de un protocolo de control basado en observador para resolver rendezvous en sistemas multiagentes estocásticos.

[1]*J. Posada Gómez,* [2]*J. A. Vazquez Trejo,* [3]*M. Adam Medina,* [4]*R. Posada Gómez*
Departamento de Ingeniería Electrónica, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico,Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos.
m20ce022@cenidet.tecnm.mx

Área de participación: *Ingeniería Electrónica*

Resumen:
Este artículo presenta la comparación de tres protocolos de consenso para demostrar la eficacia de un control basado en consenso con apoyo de observadores ante un sistema de multi-agentes sujeto a ruido de medición en la entrada para resolver el problema de encuentro. Se realiza la comparación del protocolo de consenso más simple con un protocolo de consenso activado por eventos y un protocolo de consenso basado en observadores con el enfoque líder-seguidor. El sistema de doble integrador se utiliza para realizar algunos ejemplos de simulación y así mostrar la efectividad del esquema de control propuesto, esto teniendo en cuenta que el sistema se encuentra bajo perturbaciones de ruido de medición.

Palabras clave: *Rendezvous, Consenso, Doble integrador, Estocástico.*

Abstract:
This article presents the comparison of three consensus protocols to demonstrate the efficacy of a consensus-based control with observer support against a multi-agent system subject to input measurement noise to solve the encounter problem. The simplest consensus protocol is compared with a feedback gain consensus protocol and an observer-based consensus protocol with the leader-follower approach. The double integrator system is used to perform some simulation examples and thus show the effectiveness of the proposed control scheme, this taking into account that the system is under measurement noise disturbances.

Keywords: *Rendezvous, Consensus, Double integrator, Stochastic.*

Introducción

Un concepto que cobra importancia recientemente es el uso de sistemas capaces de reconocer su entorno e interactuar en ellos, estos sistemas conocidos como agentes realizan determinadas tareas con la intención de facilitar el trabajo humano, ya que los avances tecnológicos han incrementado la complejidad en las tareas que se desarrollan para el beneficio del ser humano. Los trabajos que realizan los agentes son multidisciplinarios, desempeñándose en diferentes campos de acción [4], esto es particularmente crítico en las actividades militares, aunque de igual manera en diversas actividades civiles donde se requiere disminuir los costos de mano de obra y aumentar la eficiencia.

Los sistemas multi-agentes cuentan con protocolos de comunicación por el cual mediante un algoritmo de cooperación se coordinan para desempeñar diversas tareas [3]. Estos protocolos son importantes porque los sistemas multi-agentes están constituidos por numerosos sistemas individuales y estos protocolos fijan las reglas estándar para transmitir información entre dos o más agentes.

El mayor obstáculo que afrontan los sistemas multiagentes, es la cooperación de cada agente para cumplir un objetivo global, como coincidir en un punto en el espacio. Ya que en un sistema multiagente el fenómeno estocástico es inevitable, lo cual hace que los agentes tengan un comportamiento aleatorio [5].

Existen varios objetivos de control cuando se habla de sistemas multi-agentes, pero los más estudiados en la literatura son *flocking* [18], control de formación [2] y *rendezvous* (encuentro) [9].

En este trabajo, se abordará la comparación de dos protocolos de consenso con el protocolo de control basado en observadores para un sistema de multi-agentes con el enfoque de líder-seguidor sujeto a ruido estocástico para

 ISSN en trámite

problemas de *rendezvous* (encuentros) [13], que consiste en que agentes se comuniquen con agentes vecinos y por medio de estrategias de control, se obtenga el encuentro en un lugar determinado no especificado [1].

El problema cuando se considera un protocolo de consenso con el enfoque líder-seguidor, es que los agentes deben llegar a la convergencia ya sea con agente líder físico o virtual. Para llegar a dicha convergencia, se puede manipular al sistema multi-agente sólo controlando al agente líder [15].

Los protocolos a considerar como punto de comparación son, el protocolo de consenso más sencillo que se puede encontrar en la literatura [17] y un protocolo de consenso para sistemas multi-agentes activado por eventos [16].

Metodología

Planteamiento del problema

Considere el siguiente sistema multiagente representado en espacio de estados por un doble integrador:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= Ax_i(t) + Bu_i(t) + D_u d_{1_i}(t), \\ y_i(t) &= Cx_i(t) \quad \forall i = 1, 2, 3, ..., N, \end{aligned} \tag{1}$$

donde: $x_i(t) \in \mathbb{R}^{n_x}$ es el vector de estados, $u_i(t) \in \mathbb{R}^{n_u}$ es el vector de entradas, $y_i(t) \in \mathbb{R}^{n_y}$ es el vector de salidas medibles, $d_{1_i}(t) \in \mathbb{R}^{n_u}$ es el ruido de medición en la entrada tomado de [8], A, B, C y D_u son matrices conocidas de dimensiones apropiadas respectivamente.

Las siguientes suposiciones se mantienen para el desarrollo del control:

- (A,B) es controlable.
- (A,C) es observable.
- El grafo está fuertemente conectado.

El control líder-seguidor basado en observador está dado por el siguiente protocolo de consenso:

$$\begin{aligned} u_i(t) &= K_c \xi_i(t) + u_r(t), \\ \xi_i(t) &= \left[\sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{i,j} \left(\hat{x}_i(t) - \hat{x}_j(t) \right) + \alpha_i \left(\hat{x}_i(t) - x_r(t) \right) \right], \end{aligned} \tag{2}$$

donde $K_c \in \mathbb{R}^{n_u \times n_x}$ es la ganancia de control robusto a las entradas estocásticas por ser diseñada, α_i es la adyacencia del líder y el agente i, donde $\alpha_i > 0$ si existe una adyacencia con el líder, y $\alpha_i = 0$ si no existe. $\hat{x}_i(t) \in \mathbb{R}^{n_x}$ es el vector estimado de estados del agente j relacionado al agente i, $\mathcal{N}_i$ es el subconjunto de agentes j relacionados al agente i.

Debido a que el vector de estados no siempre se encuentra disponible, se propone el siguiente observador:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_i(t) &= A\hat{x}_i(t) + Bu_i(t) + L_o(y_i - \hat{y}_i) \\ \hat{y}_i(t) &= C\hat{x}_i(t) \end{aligned} \tag{3}$$

donde $\hat{x}_i(t) \in \mathbb{R}^{n_x}$ es el vector de estados estimados, $\hat{y}_i(t) \in \mathbb{R}^{n_y}$ es el vector de salidas estimadas del observador y la matriz $L_o \in \mathbb{R}^{n_x \times n_y}$ es la ganancia del observador a ser diseñada.

Se dice que el sistema multiagente descrito por (1) alcanza el objetivo del consenso si el siguiente límite se satisface

$$\lim_{t \to \infty} \|x_i(t) - x_j(t)\| \to 0, \quad \forall i = 1, 2, .., N. \tag{4}$$

donde $x_i(t)$ es la posición espacial del agente en actual análisis y $x_j(t)$ son las posiciones espaciales de los agentes vecinos.

El objetivo principal de los agentes con el enfoque líder-seguidor es que todos los agentes converjan a las trayectorias descritas por el siguiente agente líder:

$$\dot{x}_r(t) = Ax_r(t) + Bu_r(t) \tag{5}$$

donde $x_r(t) \in \mathbb{R}^{n_x}$ es el vector de estados del agente líder y $u_r(t) \in \mathbb{R}^{n_u}$ es el vector de entradas del agente líder. Se define al error de sincronización entre el agente líder y los seguidores como:

$$\delta_i(t) = x_i(t) - x_r(t) \tag{6}$$

por lo que las dinámicas del error de sincronización se calculan de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \dot{\delta}_i(t) &= \dot{x}_i(t) - \dot{x}_r(t) \\ &= A\delta_i(t) + BK_c \left[\sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{i,j} \left(\hat{x}_i - \hat{x}_j \right) + \alpha_i \left(\hat{x}_i - x_r \right) \right] \\ &\quad + D_u d_{1_i}(t) \end{aligned} \tag{7}$$

Luego, se obtiene las dinámicas del error de estimación:

$$\begin{aligned} \dot{e}_i &= x_i - \hat{x}_i \\ \dot{e}_i &= Ax_i(t) + Bu_i(t) + D_u d_{u_i}(t) - A\hat{x}_i(t) - Bu_i(t) \\ &= (A - L_o C)e_i(t) + D_u d_{1_i}(t) - L_o D_y d_{2_i}(t) \end{aligned} \tag{8}$$

Con base al error de estimación , se puede obtener $\hat{x}_i(t)$ el cual está definido como:

$$\hat{x}_i = x_i - e_i \tag{9}$$

Se definen los vectores δ, e, d_1, d_2 y Δ, y queda:

 ISSN en trámite

$$\begin{aligned}\delta &= [\delta_1^T, \delta_2^T, \delta_3^T, ..., \delta_N^T]^T \\ e &= [e_1^T, e_2^T, e_3^T, ..., e_N^T]^T \\ d_1 &= [d_{11}^T, d_{12}^T, d_{13}^T, ..., d_{1N}^T]^T \\ d_2 &= [d_{21}^T, d_{22}^T, d_{13}^T, ..., d_{2N}^T]^T \\ \Delta &= diag(\alpha_1, \alpha_2, .., \alpha_N)\end{aligned} \tag{10}$$

Entonces se obtiene que $\bar{\mathcal{L}} = \mathcal{L} + \Delta$. Posteriormente, se reescribe la dinámica del error de sincronización utilizando el producto *kronecker*:

$$\begin{aligned}\dot{\delta} &= (I_N \otimes A)\delta + (\bar{\mathcal{L}} \otimes BKc)(\delta - e) + (I_N \otimes D_u)d_1 \\ \dot{e} &= (I_N \otimes (A - L_oC))e + (I_N \otimes D_u)d_1 - (I_N \otimes L_oD_y)d_2\end{aligned} \tag{11}$$

Si nosotros definimos $z = [\delta^T, e^T]^T$ y $d = [d_1^T, d_2^T]^T$, se puede reescribir la ecuación (11) en representación matricial como:

$$\dot{z} = \tilde{A}z + \tilde{D}d \tag{12}$$

donde las matrices $\tilde{A}$ y $\tilde{D}$ están dados como:

$$\begin{aligned}\tilde{A} &= \begin{bmatrix} I_N \otimes A + \bar{\mathcal{L}} \otimes BK_c & -\bar{\mathcal{L}} \otimes BK_c \\ 0 & I_N \otimes (A - L_oC) \end{bmatrix} \\ \tilde{D} &= \begin{bmatrix} I_N \otimes D_u & 0 \\ I_N \otimes D_u & -(I_N \otimes L_oD_y) \end{bmatrix}\end{aligned} \tag{13}$$

Se calcula una función de Lyapunov para poder dar solución al sistema dado por (12)

$$\mathcal{V}_1 = z^T diag(I_N \otimes P_1, I_N \otimes P_2)z \quad P_1, P_2 > 0 \tag{14}$$

donde la función de Lyapunov (14), debe de cumplir las siguientes condiciones:

$$\begin{aligned}\dot{\mathcal{V}} < 0 \quad \forall z \neq 0 \\ \mathcal{V} > 0\end{aligned} \tag{15}$$

Se realiza una descomposición tal que $\mathcal{S} = T\bar{\mathcal{L}}T^{-1}$ y $\mathcal{S} = diag(\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_N)$ pueda realizar un cambio de coordenadas como a continuación:

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= (T^{-1} \otimes I_N)z_1 \\ \varphi_2 &= (T^{-1} \otimes I_N)z_2 \\ w_1 &= (T^{-1} \otimes I_N)d_1 \\ w_2 &= (T^{-1} \otimes I_N)d_2\end{aligned} \tag{16}$$

Utilizando la propiedad simétrica de las matrices, la cual dice que $Q + Q^T = 2Q$ y $He\{Q\} := Q + Q^T$.

Se propone la siguiente función de optimización para minimizar el efecto del ruido de medición y la entrada estocástica.

$$J_1 = \int_0^\infty (\phi_{1i}^T\phi_{1i} + \phi_{2i}^T\phi_{2i} - \gamma^2\phi_{3i}^T\phi_{3i} - \gamma^2\phi_{4i}^T\phi_{4i})dt, \tag{17}$$

donde $\phi_{3i} \in L_2[0, \infty)$ y $\phi_{4i} \in L_2[0, \infty)$. La función de optimización (17) se reduce a la siguiente expresión:

$$J_r \leq \int_0^\infty (\phi_i^T \Omega_i \phi_i) \tag{18}$$

donde Ω_i es una matriz que cumple con la siguiente propiedad $\Omega_i < 0, \forall i = 1, 2, ..., N$. Se procede a encontrar las condiciones LMIs de Ω_i, por lo que se pre y post multiplica por $diag(\bar{P}_1, I, I, I)$, donde $\bar{P}_1 = P_1^{-1}$. Para reducir términos, se dice que $Q_{1i} = He\{(A + \lambda_i BK_c)\}\bar{P}_1 + \bar{P}_1\bar{P}_1$ y $Q_2 = He\{P_2(A - L_oC)\} + I$, por lo que la matriz queda de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} Q_{1i} & -\lambda_i BK_c & D_u & 0 \\ * & Q_2 & P_2D_u & -P_2L_oD_y \\ * & * & -\gamma^2 I & 0 \\ * & * & * & -\gamma^2 I \end{bmatrix} < 0; \tag{19}$$

Se reescribe la matriz (19) y se aplica la relación de Young en la ecuación, lo cual queda:

$$\begin{aligned}&\begin{bmatrix} Q_{1i} & 0 & D_u & 0 \\ * & Q_2 & P_2D_u & -P_2L_oD_y \\ * & * & -\gamma^2 I & 0 \\ * & * & * & -\gamma^2 I \end{bmatrix} + \mu \begin{bmatrix} -\lambda_i BK_c \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ &(\bar{P}_1 \begin{bmatrix} -\lambda_i (BK_c)^T & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}) \\ &+ \mu^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ I \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \bar{P}_1^{-1} \begin{bmatrix} 0 & I & 0 & 0 \end{bmatrix} < 0\end{aligned} \tag{20}$$

Se resuelve la ecuación (20) aplicando el complemento de Schur y se reducen términos diciendo que $Nc = Kc\bar{P}_1$, $Mo = P_2L_o$, $\mathcal{Q}_{1i} = He\{A\bar{P}_1 + \lambda_i BN_c)\} + \bar{P}_1\bar{P}_1$ y $\mathcal{Q}_2 = He\{P_2A - MoC)\} + I$. Se vuelve a aplicar el complemento de Schur para obtener la LMI final:

$$\begin{bmatrix} \mathcal{Q}_{1i} & 0 & D_u & 0 & -\lambda_i BNc & 0 & \bar{P}_1 \\ * & \mathcal{Q}_2 & P_2D_u & -M_oD_y & 0 & I & 0 \\ * & * & -\gamma^2 I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & -\gamma^2 I & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & -\mu^{-1}\bar{P}_1 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & -\mu\bar{P}_1 & 0 \\ * & * & * & * & * & * & -I \end{bmatrix} < 0; \tag{21}$$

Comparación de Protocolos

Para el siguiente ejemplo numérico, se considera un grupo de 4 aeronaves representados por un sistema doble integrador, las cuales son guiadas por un agente líder

ISSN en trámite

virtual. Se utilizó una topología de comunicación fuertemente conectada entre los agentes, el cual es descrito en la siguiente Figura (1):

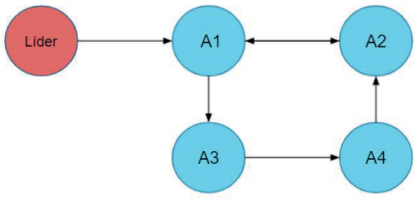


Figura 1: Topología de comunicación fuertemente conectada.

Las condiciones iniciales que presentan los agentes, son las siguientes: $x_1 = [0,0,0,0,0,1]^T$, $x_2 = [1,1,0,0,0,2]^T$, $x_3 = [2,2,0,0,0,4]^T$ y $x_4 = [3,3,0,0,0,3]^T$; donde las condiciones iniciales del agente líder son $x_L = [2,0,0,0,0,2]$. Para evitar colisión entre los agentes, se propone una formación de un cuadrado, la cual está dada por la siguiente matriz: $h_1 = [0,0,0,0,0,0]^T$, $h_2 = [1,0,0,0,0,0]^T$, $h_3 = [1,1,0,0,0,0]^T$ y $h_4 = [0,1,0,0,0,0]^T$. Para resolver la LMI se tomaron unos valores de $\mu = 0.01$ y $\gamma = 1000$.

Por motivos prácticos, para simular la perturbación como perturbación en la entrada se propuso un ruido de medición de valores aleatorios [8].

En la Figura (2) se muestra la formación realizada por los agentes y el seguimiento hacia el líder.

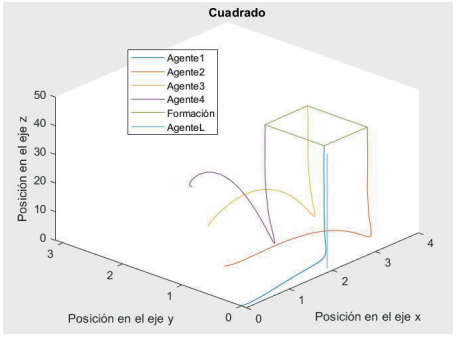


Figura 2: Formación realizada por los agentes y seguimiento hacía el líder.

En la Figura (3) se aprecia el consenso de los agentes en el eje x de las velocidades.

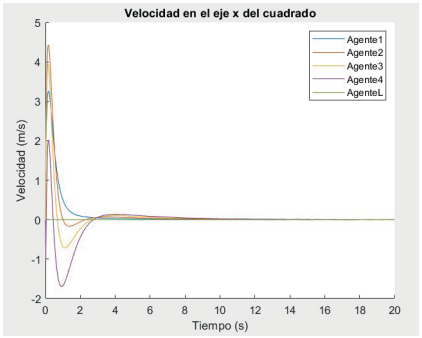


Figura 3: Consenso en el eje x de las velociades del protocolo de consenso basado en observador

En la Figura (4) se aprecia el consenso de los agentes en el eje y de las velocidades, realizando así de esta manera *rendezvous* o encuentro, ya que cumple con la propiedad descrita en (4).

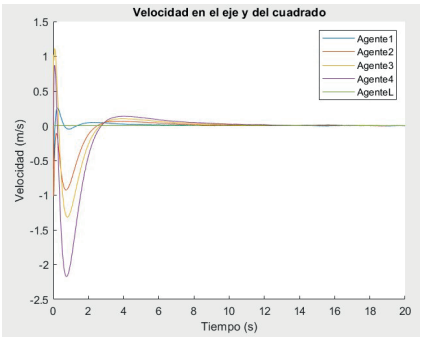


Figura 4: Consenso en el eje y de las velociades del protocolo de consenso basado en observador

Para dar certidumbre a nuestros resultados, se realiza la comparación del resultado obtenido con el protocolo de consenso basado en observador, con el protocolo de consenso más sencillo tomado de [17], el cual está descrito a continuación:

$$u_i(t) = -\sum_{j\in\mathcal{N}_i} a_{i,j}\left(x_i(t) - h_i - (x_j(t) - h_j)\right), \quad \forall i = 1,2,3,...,N, \tag{22}$$

En la Figura (5) se muestra la formación realizada por el protocolo de consenso sencillo, ante un ruido de medición en la entrada de valores aleatorios, también se observa como las velocidades llegan al consenso pero tienen un crecimiento desmesurado con el tiempo, por lo cual no cumplen con el objetivo de *rendezvous* satisfactoriamente.

ISSN en trámite

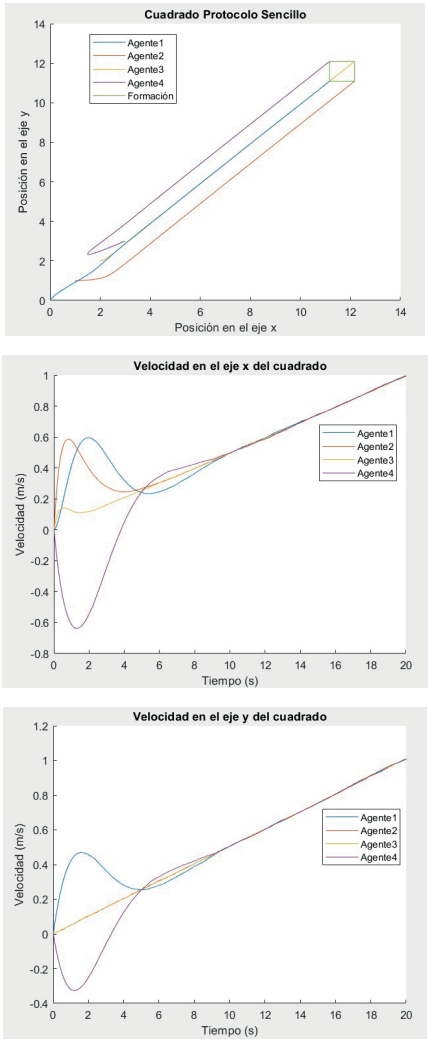


Figura 5: Consenso de los agentes mediante el protocolo de consenso sencillo

Como último paso, se realiza la comparación con el protocolo de activado por eventos tomado de [16], el cual está descrito por:

$$u_i(t) = -\sum_{j\in\mathcal{N}_i}\left(p_i(t) - p_j(t) - C(h_i - h_j)\right) - \sum_{j\in\mathcal{N}_i}\left(v_i(t) - v_j\right), \quad \forall i = 1,2,3,...,N, \tag{23}$$

donde $p_i(t)$, $p_j(t)$, $v_i(t)$ y $v_j(t)$ son las posiciones y velocidades de los agentes i, j respectivamente.

En la Figura (6), se observa la formación realizada por los agentes mediante este protocolo de consenso activado por eventos sometido a ruido de medición en la entrada de valores aleatorios. En la Figura se muestra que los agentes cumplen el objetivo descrito por (4), pero llegando al consenso en un largo periodo de tiempo a comparación de la dinámica del protocolo de consenso propuesto, por lo cual este protocolo de consenso no tiene la dinámica más óptima.

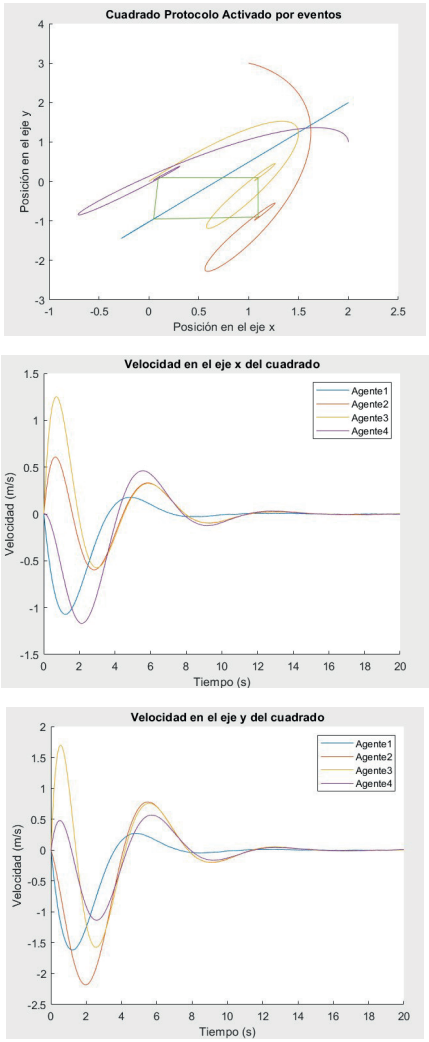


Figura 6: Consenso de los agentes mediante el protocolo de consenso activado por eventos

Conclusiones

En este artículo se ha presentado un modelo de control basado en observador para un sistema multi-agente estocástico que resuelva el problema de *rendezvous* sujeto a ruido de medición. Se ha realizado la comparación de la teoría de control desarrollada, con otros protocolos de consenso, demostrando así que el modelo propuesto hace que los agentes vecinos sigan la trayectoria del agente líder en un corto periodo de (10 seg.), a pesar de estar sometidos a ruido de medición. Mientras que el protocolo sencillo llegó al consenso en el mismo lapso de tiempo, no paró de tener un crecimiento desmesurado al paso de este, por lo cual no cumple con el objetivo descrito en (4). El protocolo de consenso activado por eventos si cumple con el objetivo de consenso descrito anteriormente, pero la desventaja a comparación del protocolo propuesto,

ISSN en trámite

este llega en un mayar lapso de tiempo, siendo este de 16 seg. La ventaja de reducir estos tiempos es que poniendo un contexto físico, esto significa el correcto cumplimiento de las misiones asignadas. Los resultados mostrados en simulación, visualizan un correcto funcionamiento del controlador propuesto garantizando así el consenso de los agentes y resolviendo el problema de *rendezvous* satisfactoriamente.

Referencias

[1] Ribeiro, R., Silvestre, D., and Silvestre, C. (2020, September). A rendezvous algorithm for multi-agent systems in disconnected network topologies. In 2020 28th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED) (pp. 592-597). IEEE..

[2] J. A. V. Trejo, D. Rotondo, M. A. Medina and D. Theilliol, Robust observer-based leader-following consensus for a class of nonlinear multi-agent systems: application to UAV formation control,"2021 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2021, pp. 1565-1572, doi:10.1109/ICUAS51884.2021.9476860..

[3] Kantamneni, A., Brown, L. E., Parker, G., and Weaver, W. W. (2015). Survey of multi-agent systems for microgrid control. Engineering applications of artificial intelligence, 45, 192-203.

[4] Li, Z., and Duan, Z. (2017). Cooperative control of multi-agent systems: a consensus region approach. CRC Press.

[5] Ma, L., Wang, Z., Han, Q.-L., and Liu, Y. (2017). Consensus control of stochastic multi-agent systems: A survey. Science China Information Sciences, 60(12), 120201. https://doi.org/10.1007/s11432-017-9169-4

[6] Sun, Z., Zhang, G., Lu, Y., and Zhang, W. (2018). Leader-follower formation control of underactuated surface vehicles based on sliding mode control and parameter estimation. ISA Transactions, 72, 15-24. https://doi.org/10.1016/j.isatra.2017.11.008

[7] Zhou, J., Sang, C., Li, X., Fang, M., and Wang, Z. (2018). $\mathscr{H}_\infty$ consensus for nonlinear stochastic multi-agent systems with time delay. Applied Mathematics and Computation, 325, 41-58.

[8] Scheres, K. J., Postoyan, R., Heemels, W. P. M. H. (2020, December). Event-triggered control in presence of measurement noise: A space-regularization approach. In 2020 59th IEEE Conference on Decision and Control (CDC) (pp. 6234-6239). IEEE..

[9] Dong, Y., Su, Y., Liu, Y., and Xu, S. (2018). An internal model approach for multi-agent rendezvous and connectivity preservation with nonlinear dynamics. Automatica, 89, 300-307.

[10] Zhang, X., Gao, J., Zhang, W., Zeng, T., and Ye, L. (2019). Distributed Formation Control for Multiple Quadrotor Based on Multi-Agent Theory and Disturbance Observer. Mathematical Problems in Engineering, 2019, 1-11. https://doi.org/10.1155/2019/7234969

[11] You, X., Hua, C. C., Yu, H. N., and Guan, X. P. (2019). Leader-following consensus for high-order stochastic multi-agent systems via dynamic output feedback control. Automatica, 107, 418-424.

[12] Tan, Y., Fei, S., Liu, J., and Zhang, D. (2019). Asynchronous adaptive event-triggered tracking control for multi-agent systems with stochastic actuator faults. Applied Mathematics and Computation, 355, 482-496.

[13] Trejo, J. A. V., Theilliol, D., Adam Medina, M., Beltrán, C. G., and Witczak, M. (2020). Leader-following formation control for networked multi-agent systems under communication faults/failures. In Advances in Diagnostics of Processes and Systems (pp. 45-57). Springer, Cham.

[14] Trejo, J. A. V., Rotondo, D., Adam Medina, M., and Theilliol, D. (2020, September). Observer-based event-triggered model reference control for multi-agent systems. In 2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS) (pp. 421-428). IEEE.

[15] Trejo, J. A. V., D., Adam Medina, M., Trejo, J. A. V., Beltrán, C. D. G., and Morales, J. G. (2021). Robust Observer-based Leader-Following Consensus for Multi-agent Systems. IEEE Latin America Transactions, 19(11), 1949-1958.

[16] J. Guerrero-Castellanos, A. Vega-Alonzo, N. Marchand, S. Durand, J. Linares-Flores, and G. Mino-Aguilar, “Real-time event-based forma-tion control of a group of vtol-uavs,” 2017 3rd International Conference on Event-Based Control, Communication and Signal Processing.

[17] J. A. Vazquez Trejo. (2020) Control de formación distribuido para una flotilla de vehículos autónomos basado en sistemas multi-agentes. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.

[18]V. D. Blondel, J. M. Hendrickx, A. Olshevsky and J. N. Tsitsiklis, Çonvergence in Multiagent Coordination, Consensus, and Flocking,"Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, 2005, pp. 2996-3000, doi: 10.1109/CDC.2005.1582620.

ISSN en trámite

Desarrollo experimental de un dispositivo de atención médica para adultos mayores

Alfredo Sebastián Fuentes Ríos, Yordy Ariel Moo Canul, Néstor Gabriel Palomec Santos, Luis Alberto Cuevas Carrillo, Griselda Jaime Guerrero

Estudiantes adscritos al Tecnológico Nacional de México / IT Querétaro,
División de Estudios Profesionales, Av. Tecnológico s/n, Centro, 76000 Santiago de Querétaro, Qro.
{l18170642, l18530620, l18530628, l18170620, l18140887}@queretaro.tecnm.mx

Resumen: En el siguiente artículo se presenta una solución a un problema cotidiano en los adultos mayores: el seguimiento de un plan de medicación, mediante el desarrollo de un asistente médico para brindar atención al usuario en tareas como la dosificación de medicamentos a horarios preestablecidos, entre otras funciones como una alarma de axulio. El dispositivo se basa en tecnología de reconocimiento facial y lógica combinacional para realizar las actividades correspondientes según el usuario. Para la programación de las instrucciones y el ensamble de dispositivos periféricos se utiliza la tarjeta de desarrollo Raspberry Pi 4, haciendo uso del lenguaje de programación Python por medio de Thonny IDE. Con el sistema planteado, se busca que el usuario pueda desarrollarse independientemente y requerir menos atención de una persona física.

Palabras clave: Asistente médico, reconocimiento facial, Raspberry Pi.

1. INTRODUCCIÓN

Las distintas necesidades de la vida diaria dificultan estar al pendiente de los seres queridos, sobre todo a los adultos mayores, quienes en ocasiones requieren de atención especial, con lo que existe una necesidad de contratar a terceras personas para el cuidado del familiar.

La organización mundial de la salud recalca que “la población mundial está envejeciendo rápidamente. Entre 2015 y 2050 la proporción de la población mundial mayor de 60 años se multiplicará a casi al doble, pasando del 12% al 22%” (OMS, 2017). Actualmente “en Querétaro la población de 50 a 100 años es de 216 mil hombres y 250 mil mujeres” (INEGI,2020). Por lo que el asistente médico electrónico es un dispositivo con mucho potencial de crecimiento.

Los adultos mayores tienden a necesitar de cuidados extras a la hora de cuidar su salud, la OMS (2017) informó que: “La salud mental de los adultos mayores se puede mejorar mediante la promoción de hábitos activos y saludables. También depende en gran medida de estrategias conducentes a que los ancianos cuenten con los recursos necesarios para satisfacer sus necesidades básicas”.

A continuación, en la tabla 1. se muestra la magnitud de los habitantes en Querétaro que tienen alguna limitación o discapacidad, cuyo rango de edad va de los 50 a los 79 años:

Tabla 1. Población con limitación o discapacidad en Querétaro (INEGI, 2020).

Entidad federativa	Grupo quinquenal de edad	Población con limitación	Población con discapacidad
		Total	Total
Querétaro	50 a 54 años	23 749	6 385
	55 a 59 años	21 743	6 796
	60 a 64 años	21 385	7 957
	65 a 69 años	17 713	7 899
	70 a 74 años	14 080	7 534
	75 a 79 años	10 207	7 127

Actualmente, la dosificación de medicamentos en tiempo y forma es de vital importancia para que los tratamientos clínicos sean exitosos. “La ingesta a destiempo de medicamentos puede conllevar a enfermedades más graves, como es el caso de las personas que padecen de diabetes y epilepsia” (Varas, 2021).

Actualmente existen tecnologías que mejoran las condiciones de consumo de medicamentos, utilizando sistemas de temporización con alarma para llamar la atención del usuario cuando sea la hora de recibir la dosis. tal es el caso del “Dispensador Automático De Pastillas Medtime”, desarrollado por E-pill, el cual cuenta con un recipiente etiquetado en el cual se colocan los medicamentos y un sistema de temporización que indica cuando es hora de consumo.

ISSN en trámite

Otros sistemas complejos cuentan con sistemas de dosificación en horarios establecidos para el usuario que ayuda a cumplir con planes de medicación determinados. como el dispositivo "CompuMed" desarrollado por e-Pill, comprendidos por un sistema robusto y de precio poco accesible que ayuda a cumplir con planes de medicación determinados.

De la misma manera existen dispositivos enfocados como organizadores inteligentes, como es el caso del organizador Inteligente AVEDISTANTE, el cual se trata de una caja organizadora con alarma y temporizador, al igual que el dispositivo organizador "Ezy Dose". Este tipo de modelos cuentan con precio accesible, pero carece de funcionalidades avanzadas.

Con base a la información recabada, se puede llegar a la conclusión que existe tecnología capaz de administrar de manera eficaz los horarios de consumo de medicamentos y hasta dispensar cuando es debido, sin embargo, al agregar funcionalidades, los sistemas incrementan enormemente el precio y dejan de ser un producto accesible a todo público, además de que solamente se limitan a un usuario. El desarrollo del asistente médico propuesto en este documento implica la posibilidad de administrar varios usuarios y dispensar automáticamente según el registro en base de datos, además de que el precio será accesible y la utilización será sencilla de aprender.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Tecnología de reconocimiento facial

La tecnología de reconocimiento facial comenzó mediante el enfoque de "encontrar la ubicación de características distintivas de la imagen, como los ojos, la nariz y la boca, y medir las distancias entre estas ubicaciones de características" (Zselsiki, 2010). Sin embargo, en los enfoques más recientes, Zselsiski (2010) menciona que el proceso consiste en: "comparar imágenes en gris proyectadas en subespacios de dimensiones inferiores llamadas eigenfaces y modelar conjuntamente variaciones de forma y apariencia (mientras se descuentan las variaciones de pose) utilizando modelos de apariencia activa".

Aplicar dicha tecnología es posible a raíz del desarrollo de sensores e instrumentos que permiten obtener información acondicionada del entorno para aplicaciones específicas. Es el caso de la cámara digital, la cual permite capturar un instante de la realidad con base a lo que dice Szeliski (2010): "La luz que incide sobre un sensor de imágenes es captada por un área de detección activa, integrada por la duración de la exposición (velocidad de disparo), y luego pasa a un conjunto de amplificadores de detección. Los sensores más utilizados por este tipo de cámaras son los dispositivos de carga acoplada (CCD) y los de óxido de metal complementario sobre silicio (CMOS). Una vez capturada la imagen por el sensor y aplicada una ganancia, se utiliza la conversión ADC para obtener un arreglo de datos digitales. Yang, Kriegman y Ahuja proporcionaron en el año 2002 un estudio más completo de trabajos de este tipo. Dichos trabajos coinciden en que "antes de aplicar el reconocimiento facial en una imagen en general, primero deben encontrarse los rostros para así conocer sus dimensiones y su ubicación" (Szeliski, 2010).

2.2 Técnicas de reconocimiento facial

Eigenfaces

Las componentes principales en una imagen de entrada al procesamiento de reconocimiento facial reciben el nombre de eigenfaces, características como los ojos, labios, nariz y la distancia entre estos.

Dicho procesamiento comienza por la etapa de entrenamiento, donde se tiene un subconjunto de imágenes (con mismas dimensiones) de diferentes personas con variación en los gestos, posturas, condiciones de luz, entre otros factores.

Teniendo el subconjunto de imágenes, se procede a convertir cada imagen en una matriz de n x n pixeles, donde cada pixel toma un valor entre 0 y 255, que hace referencia al color que es transformada en un vector de n^2 x 1. Se calcula el valor promedio del rostro (promedio de todas las matrices) que permite calcular los vectores normalizados (resta de cada vector con el valor promedio). De esta manera, es posible calcular eigenvectors (matriz de dimensión n^2 x n^2) resultado de la matriz de covarianza.

El cálculo de los eigenvectors requiere un amplio uso de memoria para almacenar estos valores, por ello se emplea una SVD (descomposición en valores singulares) que reduce la matriz a M x M (con M igual al número de imágenes en entrenamiento), además descompone la matriz en un producto de tres matrices, una de ellas pose los eigenvectors y otra los eigenvalues.

Hecho lo anterior, se seleccionan los n vectores con valores propios de mayor valor para así calcular los vectores propios de la matriz de covariancia y con ello encontrar los eigenfaces, que permiten formar los nuevos rostros.

El objetivo es determinar mediante la fórmula de la distancia euclidiana qué imagen del conjunto de entrenamiento se parece más a la imagen de entrada y será aquella que posea la menor distancia.

Local Binary Pattern

El patrón binario local es un operador que etiqueta los pixeles de una imagen por thresholding o umbral, pasando de una imagen en grises a una imagen binaria. Posee la ventaja de no ser afectado considerablemente ante los cambios de luz.

ISSN en trámite

Este algoritmo trabaja con la comparación de los pixeles vecinos respecto a un pixel central, siendo 8 los pixeles a comparar en una cuadriculan de 3 x 3. El pixel de la vecindad tomara el valor de 1 si es mayor al pixel central, de lo contrario tomara el valor de 0.

Para comparar dos imágenes es necesario comparar los histogramas de cada una de ellas mediante la siguiente fórmula:

$$f(G,H) = \frac{\sum_1^{256} \min(G_i, H_i)}{n}$$

Donde: G, H son los histogramas de dos imágenes creadas por la técnica de vecindad. Gi, Hi es el número de valores iguales en los histogramas respectivamente. N es el número de pixeles.

Fisherfaces

Esta técnica crea tantas clases como imágenes de entrenamiento de un mismo individuo existan, se calculan dos matrices, la matriz de dispersión entre clases y la matriz de dispersión dentro de clases, las cuales permiten obtener una matriz de proyección donde cada columna será la base de un nuevo sub-espacio, denominado fisherfaces.

Las fisherfaces también permiten la reconstrucción de la imagen y por ello también se utiliza la comparación de imágenes mediante la distancia euclidiana.

2.3 Tarjetas de Desarrollo

Las tarjetas para desarrollo de proyectos facilitan la parte de ensamble de dispositivos periféricos, se trata de microcontroladores que han sido acondicionados para poder disponer de sus entradas y salidas, de tal manera que permitan conectar rápidamente actuadores y sensores, para así configurarlos a través de código de alto nivel e interfaces sencillas de utilizar.

Se presentan algunas tarjetas de desarrollo utilizadas de manera global:

- **Arduino:** Utilizando microcontroladores tipo Atmel AVR, el hardware Arduino presenta todos sus pines de conexión de una manera sencilla de utilizar. Se implementa el hardware fundamental la comunicación serie. El mayor potencial de esta tarjeta de desarrollo con Atmel recae en el software, esto se debe a que Arduino se describe mejor como plataforma de desarrollo basada en una placa electrónica de hardware libre. El IDE de Arduino proporciona innumerables librerías prediseñadas para el control de sensores y actuadores con solamente unas líneas de código. Arduino es libre y extensible, con lo que cualquiera que desee ampliar y mejorar el diseño hardware de las placas como el entorno de desarrollo (Arduino, 2021).
- **Raspberry Pi:** Además de ser una tarjeta de desarrollo, Raspberry Pi (3) se trata de básicamente una computadora personal la cual posee un chipset Broadcom BCM2835, con un procesador central (CPU) ARM1176JZF-S a 700 MHz, además de un procesador gráfico (GPU) VideoCore IV, RAM de 512 MB, y todas las salidas comunes de PC, como video HDMI, USB, audio estéreo, Ethernet, así como lectores de tarjeta SD. El entorno de programación para configurar los pines de propósito general de la Raspberry está inmerso en su propio sistema operativo Raspbian, utilizando Thonny IDE de Python se configuran sensores y actuadores de una manera rápida y sencilla debido a la gran cantidad de librerías que desarrolla la comunidad (Raspberry Pi, 2021).

2.4 Utilización de Raspberry

Para el desarrollo de un asistente médico, se requiere una tarjeta la cual sea capaz de manipular tanto sensores simples, así como dispositivos avanzados como cámaras web, esto a razón de que es necesario visualizar la identidad del usuario para ejecutar instrucciones de dispensado y cálculo de horarios de medicación, además se precisa de un entorno de programación eficiente y rápido para que el desarrollo sea acelerado.

La tarjeta de desarrollo Raspberry pi 3B cuenta con características relevantes las cuales son:

- Eficiencia energética: además de disponer de sus pines de entrada y salida, tiene la posibilidad de funcionar como un ordenador de escritorio sin la necesidad de sistemas de enfriamiento, con velocidades de procesamiento similares a Intel Celeron a 1.6 GHz.
- Disponibilidad de puertos USB: aunado a la capacidad de funcionar como una computadora de escritorio, el disponer de puertos USB simplifica la utilización de dispositivos como cámaras sin la necesidad de utilizar los pines de salida generales, incrementando las capacidades de desarrollo.
- Entorno de Programación: la interfaz para desarrollar proyectos se encuentra inmersa en el propio sistema operativo de la tarjeta, con lo que se facilitan los tiempos de pruebas y no se requiere disponer de ordenadores adicionales para desarrollar el asistente médico.
- Libertad: basa su diseño tanto en la implementación de hardware como de software libre.
- Adaptabilidad: se comunica con periféricos de salida como monitores, obteniendo interfaces de usuario completas y avanzadas (entrada táctil).

Factores como el uso del Internet de las cosas (IoT) vuelve aún más acertado basar el diseño principal en esta tarjeta, de tal manera que los dispositivos como sistemas de alarma para monitorear la salud del usuario con base hardware como oxímetros y baumanómetros se vea rápidamente interpretada por

ISSN en trámite

los encargados de la salud de los adultos mayores para tomar medidas necesarias en tiempo y forma para así asegurar la integridad del usuario.

3. METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN

La metodología del sistema se basa en tres pilares fundamentales, en donde, el primer pilar se encarga de cumplir y establecer los requerimientos previos para la inicialización del sistema. El segundo pilar tiene la tarea de realizar el bucle repetitivo con el cual se analizan los eventos, dentro del cual se encuentra el tercer pilar que consiste en la identificación del usuario mediante reconocimiento facial para el control de los periféricos.

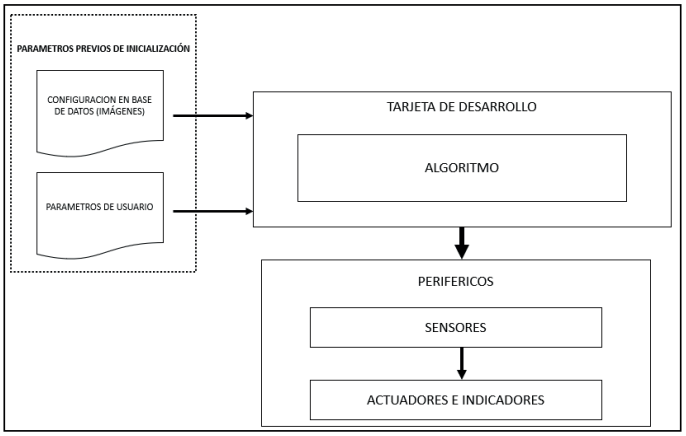


Figura 1. Metodología de solución.

El sistema en desarrollo se basa en una Raspberry Pi 3B que se centra en la programación con Python, utilizando el entorno de desarrollo integrado de Thonny IDE el cual se encuentra preinstalado en el sistema operativo Raspberry Pi OS (32 bits). Con lo anterior, se pudo desarrollar la programación del sistema el cual dispone de una previa base de datos en formato XML con la información vectorizada de las imágenes de los usuarios registrados para interactuar con el sistema. Una vez definido el rango de usuarios, se configura un sistema de alarma que en base a la librería "Time", con la cual se adquiere la hora local y se notifica a los usuarios a horas preestablecida de cuándo ellos deben mostrarse frente al dispositivo para poder activar la cámara web del sistema, con lo cual inicializa el fragmento de código dedicado al reconocimiento facial haciendo uso de elementos proporcionados por la librería "OpenCv", en donde, en función del usuario identificado por el sistema, se efectúa el dispensado de la pastilla correspondiente.

El mecanismo de dispensado se logra al hacer girar un motor a pasos que a su vez tiene acoplado un cilindro esférico (similar a un engrane) en el cual están contenidas las píldoras que serán proporcionadas al usuario. Al rotar dicho elemento, por efecto de gravedad, cae la píldora mediante una rampa guiada.

3.1 Hardware

Los elementos de hardware principales implementados para realizar las pruebas del algoritmo son los siguientes:

- Raspberry Pi 3B
- MicroSD de 32 Gb
- Cámara web 720p USB
- Motor a pasos 28BYJ-48 con driver ULN2003
- Pantalla LCD 16x2 HD44780
- Ntag213 RFID 13.56 MHz

3.2 Software

Para desarrollar el algoritmo del sistema fue necesario utilizar el sistema operativo de Raspbian Pi OS de 32 bits (Raspian en versión anteriores) en la Raspberry Pi 3B junto a los elementos de software siguientes:

- **Python 3.4** fue el lenguaje base para el desarrollo de los códigos de programación.
- **OpenCV** biblioteca de código abierto bajo licencia BSD enfocada a aplicaciones como el reconocimiento de objetos, detección de movimiento, entre otros.
- **Librería time** este módulo "permite integrar a la programación funciones relacionadas con el tiempo, por ejemplo, la adquisición del tiempo local del dispositivo" (Python, 2021).
- **ArvhivoUsuarios.XML** contiene la información vectorizada de las imágenes de los usuarios que serán reconocidos por el sistema.

4. ALGORITMO SOLUCIÓN

La lógica del sistema desarrollado se rige bajo el siguiente diagrama de flujo y consta de las siguientes etapas.

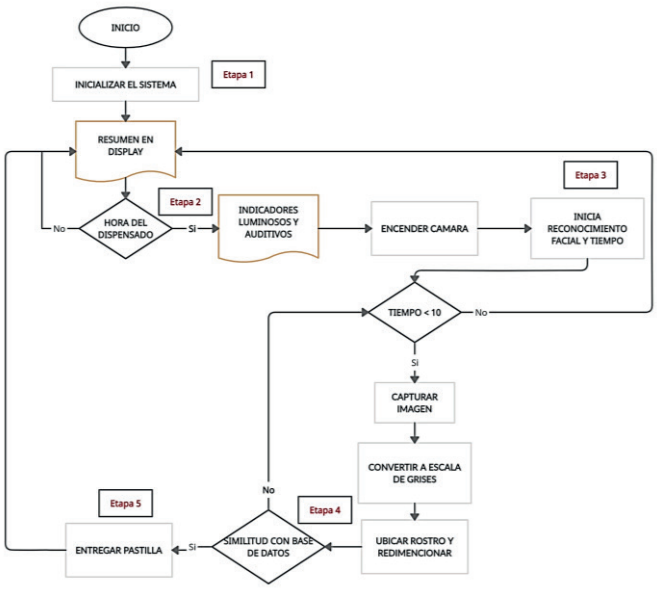


Figura 2. Algoritmo solución.

ISSN en trámite

1. *Inicialización del sistema*. Se carga la base de datos en el código fuente, se establecen los datos del usuario y el régimen de medicación para cada usuario.
2. *Chequeo de dispensado.* Con base a la hora local y el régimen de medicación, se realiza una comprobación constante para iniciar el proceso de dispensado o de lo contrario seguir mostrando la información relevante en el LCD.
3. *Reconocimiento facial*. Si es la hora indicada, se establecerá un intervalo de tiempo para que el usuario sea identificado frente a la cámara.
4. *Usuario encontrado.* Al identificar al usuario mediante el reconocimiento facial se anexará en su historial que hizo la ingesta, de lo contrario se marcará en su historial una ausencia.
5. *Dispensado.* Se produce el ángulo correspondiente de los motores para realizar el dispensado.

5. PROTOTIPO SOLUCIÓN

Se diseñó un armazón para incorporar todos los elementos de hardware mediante el software de modelado 3D "SolidWorks". Las dimensiones del dispositivo son de 12.5 cm (frontal) x 8.7 cm (lateral) x 10.5 cm (ancho).



Figura 3. Modelado 3D del dispositivo propuesto.

La parte frontal del dispositivo se conforma por la cámara web, debajo de ella el LCD que proporciona información relevante, además, los leds indicadores que resumen el estado actual del sistema y la puerta en la cual es expulsada la píldora.

En la parte lateral derecha se integró un ventilador que ayuda a regular la temperatura interna del dispositivo para asegurar que los componentes electrónicos trabajen en su rango de temperatura y a su vez permite tener niveles bajos de humedad para la conservación apropiada de la píldora. Por la otra lateral, se tiene una etiqueta con un chip NFC pegado a la pared preprogramado para que el usuario con acercar su dispositivo móvil pueda realizar una llamada de emergencia al contacto guardado.

Por la parte superior del dispositivo, se tiene un pulsador que permite generar una alarma de auxilio mediante altavoces en caso de ser presionado para así notificar apoyo en su entorno.

Una vez modelado el diseño como prototipo de la solución, se procedió a su impresión con material PLA blanco fluorescente para poder ser identificado aún con ausencia de luz como se muestra en la Figura 4. Dentro del armazón, se encuentra el hardware con las conexiones mostradas en la figura 5.



Figura 4. Dispositivo propuesto.

Los requerimientos se pueden designar a través de la configuración manual en una base de datos que se encarga de las necesidades del usuario. Mediante acceso al código fuente, se puede designar lapsos de tiempo para realizar el dispensado según sea la dosis que el usuario debe ingerir.

Toda la información añadida en la base de datos será una indicación previa del médico de cabecera, para con ello llevar un control más exacto del tratamiento. Así, el prototipo busca poder mantener al paciente en tiempo y forma respecto a la dosis del tratamiento, a la par de ayudar a la familia a reducir el trabajo del monitoreo de la ingesta de los medicamentos, como certeza de que el usuario se esté medicando a tiempo, ya que, por motivos de seguridad el reconocimiento facial sirve como llave única para realizar el dispensado.

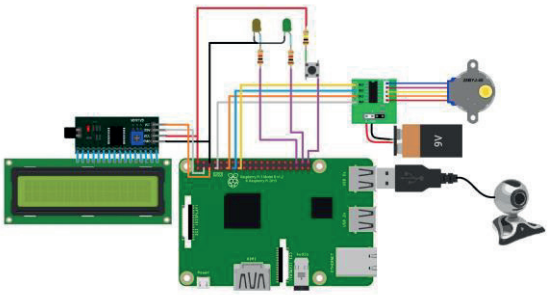


Figura 5. Diagrama de conexiones internas del prototipo.

5.1 Resultados

Se realizaron pruebas al dispositivo en un entorno controlado (centro de salud) para recabar datos de diferentes usuarios (155 usuarios) donde se tienen catalogado al 25.2% como adultos mayores (mayores a 50 años) y el 74.8% próximos a convertirse en adultos mayores.

De la población analizada, el 80% indica que el uso del dispositivo facilitaría el proceso de medicación dado que afirmaron que se encuentran bajo un régimen de dosificación con horario prescrito que contempla 1-2 píldoras (40%), 2-4(40%) y

ISSN en trámite

más de 4 píldoras (20%). Además, el 71% enfatiza el uso del dispositivo, dado que cuenta con algún familiar que pudiera aprovechar la tecnología desarrollada a raíz de que el 94.8% de la población hace mención de alguna vez haber olvidado medicarse ellos mismos o algún familiar.

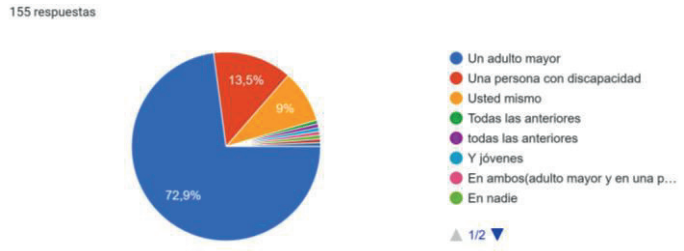


Figura 6. Relación de respuesta: ¿En quién pensaste cuando interactuaste con el asistente medico?

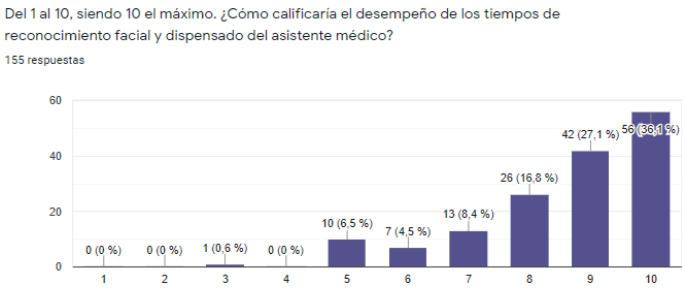


Figura 7. Relación de la experiencia del usuario con el dispositivo.

6. CONCLUSIONES

El incremento de la población adulta en los últimos años se encuentra con un aumento considerable como afirma la OMS, por ello es relevante el desarrollo de soluciones tecnológicas que permitan a este grupo de personas poder realizar actividades cotidianas con autonomía. La tecnología propuesta en este documento favorece la inclusión tecnológica.

Los resultados obtenidos con el dispositivo propuesto permiten realizar el entrenamiento de la técnica de Eigenfaces en un tiempo promedio de 69.77 segundos, la detección del usuario se logra en un tiempo promedio de 1.80 segundos y el proceso de dispensado una vez identificado el usuario se realiza en 5.71 segundos. Lo anterior, para una base de datos de tres usuarios.

El dispositivo propuesto mejoraría su funcionalidad y practicidad al integrar una pantalla táctil en la cual se muestre una interfaz gráfica en la que el usuario pueda interactuar de forma más sencilla, así como implementar sensores que permitan conocer sus signos vitales como la temperatura, la frecuencia cardiaca y el nivel de oxigenación en la sangre para realizar un historial de dichos datos y poder ser compartida con un médico de cabecera, aunado a que el asistente médico propuesto realiza el seguimiento continuo en la medicación para aquellas personas o adultos mayores que requieren una asistencia adicional. La implementación inmediata y apoyo conjunto al personal médico ayudará a la mejora rápida y sencilla de los pacientes en cuestión.

La funcionalidad a detalle del dispositivo se puede observar en el enlace del video titulado “Desarrollo experimental de un dispositivo de atención médica para adultos mayores” (noviembre, 2021).

REFERENCIAS

Arduino. (2021). What is Arduino?. Recuperado el 4 de octubre de 2021, de https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction/

Carreira Martínez, S., Herrera Sánchez-Maroto, M., Sáenz De Santamaría Sáez De Santamaría , M., Suárez Luque, B., González Gómez, M., & Varas Doval, R. (2021). Desarrollo de elementos facilitadores para la implantación del servicio de dispensación de medicamentos de estrecho margen terapéutico por la red de formadores colegiales. *Ars Pharmaceutica*, 96-97.

Esp32. (2017). The internet of things with ESP32. Recuperado el 4 de octubre de 2021, de http://esp32.net/

Espinoza Olguin, D.E. & Jorquera Guillen, P.I. (2015). Reconocimiento Facial. Valparaiso,Chile. Facultad de ingeniería informática.

INEGI (2020). Censo de población y vivienda: Información de México para Niños. Recuperado el 3 de Octubre de 2020 de http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/queret/poblacion/default.aspx?tema

INEGI(2020). Población con limitación o discapacidad por entidad federativa y grupo quinquenal de edad según sexo, 2020. Recuperado el 3 de Octubre de 2021 de Censo de Población y Vivienda 2020.

OMS.(2017, Diciembre). La salud mental y los adultos mayores. Recuperado el 3 de octubre de 2021, de https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/la-salud-mental-y-los-adultos-mayores

Particle, I. (2021). IoT Hardware. Recuperado el 4 de octubre de 2021, de https://www.particle.io/

Python. (2021). Tiempo de acceso y conversions. Recuperado el 1 de octubre, de https://docs.python.org/3/library/time.html

Raspberry. (septiembre, 2021). Raspberry Pi 4. Recuperado el 5 de octubre de 2021, de https://www.raspberrypi.org/

Repositorio Académico PDY. (noviembre, 2021). Desarrollo experimental de un dispositivo de atención médica para adultos mayores. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=DZ31Dz9nJGA

Zselsiski, R. 2010. Computer Vision: Algorithms and Applications. Springer.

ISSN en trámite

Control basado en observador de entrada desconocida para controlar una estructura tipo edificio

A. Espinoza-Molina * **F. Ramírez-Rasgado** ***
O. Hernández-González ** **C.M. Astorga-Zaragoza** ***
G. Valencia-Palomo * **M.E. Guerrero-Sánchez** **

* *Tecnológico Nacional de México (TecNM), Campus Hermosillo México, C.P. 83170 (e-mail: m14331177@hermosillo.tecnm.mx)*
** *CONACYT-TecNM, Hermosillo México, C.P. 83170*
*** *Tecnológico Nacional de México campus CENIDET, Cuernavaca México, C.P. 62490 (e-mail: d19ce042@cenidet.tecnm.mx)*

Resumen: Este trabajo presenta un control PD basado en un observador de entrada desconocida para controlar el desplazamiento de una estructura tipo edificio. El sistema en lazo cerrado se basa en un control proporcional-derivativo, con el objetivo de reducir los efectos producidos por señales inciertas y mantener el mínimo de desplazamiento. La señal de entrada desconocida es la señal sísmica, la cual se estima por medio de una aproximación a una serie de Fourier, bajo el enfoque de un observador espectral. El enfoque propuesto se valida en una estructura tipo edificio de dos pisos, la cual es afectada por una señal sísmica desconocida.

Keywords: Señales sísmicas, Incertidumbre, Observadores para sistemas lineales.

1. INTRODUCTION

El incremento urbano en las ciudades se ha vuelto un problema de interés en los últimos años, ya que los lugares habitables son escasos. Dicho problema se soluciona con la construcción de estructuras tipo edificio con múltiples pisos. Sin embargo, esta singularidad los hace susceptibles a sufrir degradaciones en los elementos que los constituyen cuando sufren alteraciones en su estado, las cuales generalmente son causadas por fenómenos naturales, siendo principalmente los sismos los causantes de mayor daño en estas estructuras, por lo que se requiere estabilizar el sistema (Morales Valdez et al., 2019; Ramírez-Rasgado et al., 2020).

Existen trabajos actuales que abordan esta problemática, en Enríquez-Zárate et al. (2020) se diseñó un controlador predictivo basado en modelo (MPC) y en funciones de Laguerre para el control de vibraciones haciendo pruebas en una estructura tipo edificio de tres niveles con un absorbedor de vibraciones pasivo. En Nayek et al. (2019) se propone una metodología que utiliza modelos de fuerza latente de proceso gaussiano para abordar el problema en un entorno estocástico. De la misma manera, en Morales-Valdez et al. (2018) se diseñó un observador adaptable basado en las medidas de aceleración permitiendo la estimación de desplazamientos y velocidades. Por consiguiente, en Morales-Valdez et al. (2020) se buscó precisar la ubicación del daño utilizando una combinación de diferentes métodos para su detección implementando un sistema con robustez frente al ruido de medición y las perturbaciones constantes. El problema de ruido produce incertidumbre en la medición lo que afecta negativamente la certeza de este tipo de análisis, por ello existen diversos artículos que buscan abordar esta problemática como en Erazo and Hernandez (2014), donde se propone el diseño de dos observadores para estimar los estados en lugares arbitrarios de la estructura de interés: uno utilizando una estructura tipo Luenberger y el otro de tipo filtro de Kalman. Para el diseño se considera el modelo de elementos finitos y que las mediciones presentan ruido. Por otra parte, en Dertimanis et al. (2019) se propone un marco de filtrado bayesiano sucesivo para abordar el problema de estimación conjunta de los parámetros de estado de entrada, donde se asumen las excitaciones estructurales desconocidas. Una extensión de la aplicación de este tipo de análisis se muestra en Lourens et al. (2012), donde se propone un análisis a vigas de voladizo utilizadas para puentes peatonales.

En este artículo, se extienden los trabajos de Morales-Valdez et al. (2018); Erazo and Hernandez (2014); en los que trabajan bajo el enfoque de estimación de parámetros y estados en tiempo real para una estructura tipo edificio. Se consideran como mediciones de salida las aceleraciones provenientes de la señal sísmica y las variables del vector de estado. Además, utilizando el observador espectral sugerido en Torres et al. (2018), para la reconstrucción de una señal desconocida, nos permite diseñar un control proporcional-derivativo (PD) basado en un observador

ISSN en trámite

espectral para la reducción de las vibraciones en presencia de una señal desconocida.
La aportación de este artículo es presentar una solución para reducir los desplazamientos de una estructura tipo edificio ocasionados por una señal sísmica desconocida. Se considera un escenario real, en el cual, se asume que solo están disponibles las mediciones de las aceleraciones de los pisos de la estructura tipo edificio (Sección 2). La principal contribución de este artículo es el diseño de un control PD basado en un observador espectral para reconstruir una entrada desconocida. El observador logra estimar el vector de estado y la señal sísmica desconocida presente en el sistema. La señal desconocida se logra estimar por medio de una aproximación a una serie de Fourier. Con esto se reduce el error de observación del observador y se mejora la rapidez de convergencia del control basado en observador (Sección 3). Una vez diseñado el observador de entrada desconocida se propone la ley de control para el sistema estructural para reducir los desplazamientos ocasionados por la señal sísmica desconocida. El esquema de control es evaluado en simulación considerando una estructura tipo edificio de 2 pisos ante la presencia del sismo escalado de México en 1985 (Sección 4). Por último, se presenta la conclusión (Sección 5).

2. MODELADO DE ESTRUCTURA TIPO EDIFICIO

El acelerado crecimiento de la población ha provocado medidas de reconstrucción urbana en vertical con el objetivo de explotar los espacios de las grandes urbes. Los movimientos tectónicos generan sismos de diferentes magnitudes y tiempos de duración, se han registrado afectaciones de este fenómeno natural en grandes ciudades. Por lo que, se ha trabajado en minimizar el impacto de estos fenómenos naturales. Existen diversas investigaciones como la propuesta en Rodriguez-Torres et al. (2020), donde se considera una estructura tipo edificio con n-pisos, representada en la Fig. 1, la cual está montada sobre una mesa vibratoria con capacidad para generar señales sísmicas en el eje horizontal.

El modelo matemático para este sistema se presenta a continuación:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0_{n\times n} & I_{n\times n} \\ -M^{-1}K_s & -M^{-1}C_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0_{n\times 1} \\ l \end{bmatrix} \ddot{x}_g \\ \\ y = \begin{bmatrix} -M^{-1}K_s & -M^{-1}C_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \end{cases} \tag{1}$$

siendo x_1 y x_2 las posiciones y velocidades de cada uno de los pisos, respectivamente; n el número de pisos de la estructura; y son la medición de las aceleraciones de cada uno de los pisos; M, C_s y K_s son las matrices de constantes conocidas de masa, amortiguamiento y rigidez, respectivamente, definidas como:

$$M = diag\left[m_1 \;\; m_2 \;\; \cdots \;\; m_n\right] > 0 \tag{2}$$

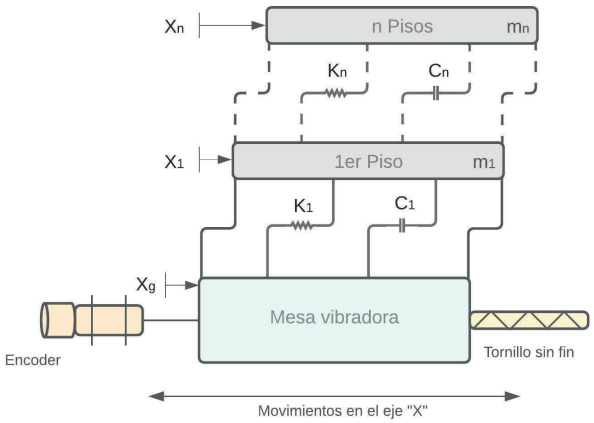


Figura 1. Diagrama de una estructura tipo edificio de n pisos.

$$C_s = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & \cdots & 0 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & \cdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \cdots & c_{n-1} + c_n & -c_n \\ 0 & 0 & \cdots & -c_n & c_n \end{bmatrix} \geq 0 \tag{3}$$

$$K_s = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & \cdots & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & \cdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \cdots & k_{n-1} + k_n & -k_n \\ 0 & 0 & \cdots & -k_n & k_n \end{bmatrix} \geq 0 \tag{4}$$

donde m_i, c_i y k_i para $i = 1, 2, ..., n$, son la masa, constante de amortiguador y resorte entre los pisos, las que definen características de la estructura del edificio; el vector l permite distribuir la señal escalar $\ddot{x}_g$ que representa la incertidumbre en cualquier nivel del vector y físicamente representa la señal sísmica:

$$l = [1, 1, 1, \cdots, 1]^T \in R^{n\times 1} \tag{5}$$

El vector de estado está definido por la posición y velocidad de cada uno de los niveles de la estructura representado por $x = [x_1, \quad x_2]^T$, quedando el modelo de la siguiente manera:

$$\begin{cases} \dot{x} = \begin{bmatrix} 0_{n\times n} & I_{n\times n} \\ -M^{-1}K_s & -M^{-1}C_s \end{bmatrix} x - \begin{bmatrix} 0_{n\times 1} \\ l \end{bmatrix} \ddot{x}_g \\ \\ y = \begin{bmatrix} -M^{-1}K_s & -M^{-1}C_s \end{bmatrix} x \end{cases} \tag{6}$$

El sistema de la estructura tipo edificio (6) se puede representar de la forma general siguiente:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + D\ddot{x}_g \\ y = Cx \end{cases} \tag{7}$$

con las siguientes matrices:

ISSN en trámite

$$A = \begin{bmatrix} 0_{n\times n} & I_{n\times n} \\ -M^{-1}K_{kps} & -M^{-1}C_{kds} \end{bmatrix},$$
$$D = \begin{bmatrix} 0_{n\times 1} \\ l \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} -M^{-1}K_{kds} & -M^{-1}C_{kds} \end{bmatrix},$$

donde x es el estado; y la salida medible; A y C son las matrices de estado y de salida respectivamente, siendo el par (A, C) observable; D es la matriz de incertidumbre del sistema y $\ddot{x}_g \in \mathbb{R}$ es la entrada desconocida de la fuerza externa, que se asume que es una función acotada.
Con la finalidad de proponer un sistema de control para el sistema de la forma (7), se reescribe el sistema en lazo cerrado de la estructura tipo edificio de la forma siguiente:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + D\ddot{x}_g \\ y = Cx \end{cases} \tag{8}$$

donde la señal de control es u y la matriz B es de la forma:

$$B = \begin{bmatrix} 0_{n\times 2} \\ lM^{-1}\Gamma \end{bmatrix} \tag{9}$$

donde $\Gamma = diag\,[0, 0, \cdots, 1] \in R^{n\times n}$.
La ley de control utilizada es un control PD, la cual tiene como objetivo alcanzar una posición deseada $x_d = 0$, es decir, $x_d = x_1 = 0$ esto implica que $\dot{x}_d = x_2 = 0$, lo que se refleja en mantener sin movimiento la estructura tipo edificio. Por lo tanto la señal de control u puede ser calculada de la forma

$$u = -k_p x_1 - k_d x_2 \tag{10}$$

siendo k_p y k_d las ganancias proporcional y derivativa del control PD, respectivamente.

3. DISEÑO DEL OBSERVADOR

En este trabajo se diseñará un observador de entrada desconocida para reconstruir todas las variables de estado y la señal de entrada desconocida con la finalidad de obtener un control de la estructura tipo edificio con el menor desplazamiento posible. Por ello en esta sección, se presenta el diseño del observador de entrada desconocida, el cual permitirá alcanzar esta disminución del error en el desplazamiento de la estructura.
El observador de entrada desconocida propuesto estimará el vector de estado y una señal de entrada desconocida, dicha señal desconocida se puede aproximar mediante una serie de Fourier, donde el primer elemento de la serie de Fourier representa la señal a reconstruir y el resto de la serie representan sus N-derivada. Por lo tanto, la señal se expresa como:

$$\delta(t) = \sum_{i=1}^{k} a_i \cos(i\omega t) + b_i \sin(i\omega t). \tag{11}$$

donde a_i y b_i son los coeficientes de la serie y ω es la frecuencia angular fundamental de la señal desconocida a reconstruir.
Si el orden de la serie de Fourier es $k = 1$, tenemos que formular un sistema dinámico con $N = 2$ estados, cada uno para recuperar cada coeficiente (a_1 y b_1). Así, los dos primeros estados son la serie de Fourier y su primera derivada.

$$\begin{aligned} v_1(t) &= \delta(t) = a_1 \cos(\omega t) + b_1 \sin(\omega t), \\ v_2(t) &= \dot{\delta}(t) = \omega a_1 \cos(\omega t) + b_1 \sin(\omega t). \end{aligned} \tag{12}$$

donde v_i son los estados del sistema sintético. En consecuencia, el sistema dinámico que resulta del cambio de coordenadas es:

$$\begin{aligned} \dot{v}_1(t) &= v_2(t), \\ \dot{v}_2(t) &= -\omega^2 v_1(t). \end{aligned} \tag{13}$$

el cual es básicamente el modelo dinámico de un oscilador armónico.
Para el diseño del observador de entrada propuesto se considera el caso simple de $k = 1$, con dos estados $N = 2$, por lo tanto el estado del sistema de la señal a reconstruir expresado en (13), se puede reescribir de la siguiente forma:

$$\dot{v} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega^2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = A_\omega v \tag{14}$$

donde el nuevo estado de la señal a reconstruir se constituye como $v = [v_1 \quad v_2]^T$, siendo v_1 la señal a reconstruir y v_2 su derivada; ω es la frecuencia fundamental; la matriz A_ω esta dada por:

$$A_\omega = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega^2 & 0 \end{bmatrix}$$

Ahora, es posible diseñar un observador para esta dinámica que representa la señal a reconstruir.

3.1 Observador de entrada desconocida para una estructura tipo edificio

Considerando el modelo del sistema de la estructura tipo edificio en (8) y el modelo de la señal a reconstruir en (14), se puede proponer un nuevo sistema que incluye el estado original de la estructura y la señal a reconstruir, que en este caso es la señal sísmica, la cual normalmente no es medible. Por lo tanto el nuevo sistema queda de la forma siguiente:

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = \bar{A}z(t) + \bar{B}u \\ \bar{y}(t) = \bar{C}z(t) \end{cases} \tag{15}$$

donde el nuevo estado aumentado es $z = [x \quad v]^T$, siendo x las posiciones y velocidades de cada uno de los niveles de la estructura tipo edificio y v la señal de entrada desconocida a reconstruir y su derivada. Por lo tanto, se considera que la señal desconocida a reconstruir es la señal sísmica del sistema de la estructura $\ddot{x}_g$, así que se define $v_1 = \ddot{x}_g$ y $v_2 = \dot{v}_1$. Así que las matrices del nuevo sistema extendido son las siguientes:

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} A & D \\ 0_{2\times n} & A_\omega \end{bmatrix}, \quad \bar{D} = [D \quad 0_{n\times 1}], \quad B = \begin{bmatrix} B \\ 0_{2\times 2} \end{bmatrix} \tag{16}$$

y la matriz de salida queda: $\bar{C} = [C \quad 0_{n\times 1}]$.
Ahora, es posible diseñar un observador para el nuevo sistema (15), debido a que el sistema es observable, es decir, el par $(\bar{A}, \bar{C})$ es observable, así que el observador espectral propuesto es:

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}}(t) = \bar{A}\hat{z}(t) + \bar{B}u + K(\bar{y}(t) - \bar{C}\hat{z}(t)), \\ \hat{\bar{y}}(t) = \bar{C}\hat{z}(t) \end{cases} \tag{17}$$

ISSN en trámite

donde K es la ganancia del observador que asegura la convergencia del nuevo estado si $\bar{A} - K\bar{C}$ es Hurwitz.
Con lo anterior es posible proponer el siguiente teorema:

***Teorema** 1.* Si el par $\{\bar{A}, \bar{C}\}$ es observable, entonces para cualquier polinomio

$$\varphi_n(s) = \lambda_1 + \lambda_2 s + \cdots \lambda_n s^{n-1} + s^n \tag{18}$$

con coeficientes reales λ_i, $s \in \mathbb{C}$, existe una matriz $K \in \mathbb{R}^{n\times p}$ tal que $\varphi_n(s)$ es un polinomio característico de la matriz $A_L = \bar{A} - K\bar{C}$, es decir, $\|(sI_n - A_L)\| = \varphi_n(s)$.

Prueba:
Para probar la estabilidad del sistema del observador propuesto (17), se define el error como $e = \hat{z} - z$, esto se describe como:

$$\dot{e} = (\bar{A} - K\bar{C})e = A_L e \tag{19}$$

dado que el par $(\bar{A}, \bar{C})$ es observable, el espectro de la matriz A_L está totalmente definido por la elección de la matriz K. En consecuencia, el observador propuesto resuelve el problema de reconstrucción del vector z exponencialmente con cualquier condición que satisfaga la ubicación polos dados por los coeficientes reales λ_i del polinomio característico del sistema del observador propuesto dado en el Teorema 1.

***Remarca** 1.* Otra manera de calcular la ganancia K del observador, que interviene en el término de corrección de la ecuación (17), puede calcularse como $K = S^{-1}\bar{C}^T$, donde S es la solución única de la siguiente ecuación algebraica de Lyapunov:

$$-\lambda S - \bar{A}^T S - S\bar{A} + \bar{C}^T\bar{C} = 0 \tag{20}$$

donde λ es un parámetro que puede utilizarse para afinar la tasa de convergencia del observador.

4. RESULTADOS

Para validar el desempeño del control basado en un observador espectral, diseñado para una estructura tipo edificio con una señal de entrada desconocida inducida por una aceleración sísmica, se analizó el caso particular de una estructura tipo edificio de dos pisos ($n = 2$), teniendo como variables medibles las aceleraciones de los pisos y como variables no medibles las posiciones y velocidades de los pisos. Para este caso se utilizaron datos reales de aceleración como entrada desconocida, es decir, datos del sismo. Dichos datos son proporcionados por la Secretaria de Comunicación y Transporte y corresponden a los registros del sismo detectado en México en 1985. Los datos del sismo son adquiridos a $1ms$, dicho tiempo de muestreo es utilizado en nuestra simulación para obtener un desempeño real. Los valores de las masas, las constantes de resorte y amortiguador de cada piso se muestran en la Tabla 1 (Morales-Valdez et al. (2018)).

Sustituyendo los valores dados en la tabla, en (2)-(4), se obtiene:

$$M = \begin{bmatrix} 3.17 & 0 \\ 0 & 4.609 \end{bmatrix}, \quad K_s = \begin{bmatrix} 16731.462 & -7531.628 \\ -7531.628 & 7531.628 \end{bmatrix},$$
$$C_s = \begin{bmatrix} 14.222 & -6.834 \\ -6.834 & 6.834 \end{bmatrix}, A_\omega = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$$

Tabla 1. Parámetros del sistema.

Término	Valor	Término	Valor
m_1	3.17 kg	c_2	6.834 Ns/m
k_1	9199.834 N/m	k_d	510.57
c_1	7.388 Ns/m	k_p	1924.4
m_2	4.609 kg	β	0.0001
k_2	7.388 N/m	ω	1

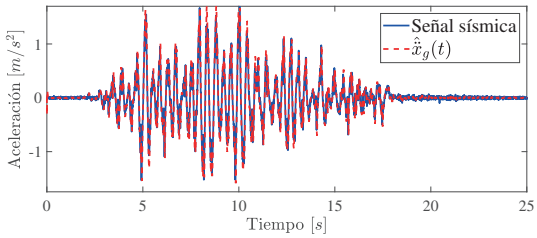


Figura 2. Estimación de la señal sísmica.

Los valores de la ley de control son: $k_p = 1924.4$ y $k_d = 510.57$ propuestos en Rodriguez-Torres et al. (2020). Estos valores hacen que el controlador reduzca considerablemente los desplazamientos de la estructura. Las condiciones iniciales del sistema original son $z(0) = [0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]^T$ y del observador $\hat{z}(0) = 5\times10^{-5}[1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0]^T$. De acuerdo al Teorema 1, los polos deseados son $\lambda = [-75\ -80\ -85\ -90\ -100\ -100]$. La matriz de ganancia del observador es:

$$L = \begin{bmatrix} -0.197 & -0.286 \\ -0.197 & -0.484 \\ -58.211 & -86.109 \\ -59.191 & -103.438 \\ -7412.7 & -10799.9 \\ -339054 & -495351 \end{bmatrix}$$

En las Figs. 3-4 se muestra la estimación del vector de estado del sistema por medio del observador. En la Fig. 3 se muestra la estimación de la posición del primer y segundo piso, respectivamente. Se ilustra que incluso en presencia de una señal sísmica desconocida, que perturba al sistema original, los desplazamientos presentados por ambos pisos son mínimos, demostrando que el control PD logra su objetivo. En la Fig. 4 se muestra la velocidad del primer y del segundo piso respectivamente. En la Fig. 2 se muestra la señal sísmica desconocida reconstruida por medio del observador propuesto. Esta señal es completamente desconocida por el observador, sin embargo, debido al diseño propuesto se logra estimarla, con el fin de reducir el error de estimación y con ello, que el control basado en observador alcance un mejor desempeño. El error de observación se define como $\tilde{z} = z - \hat{z}$. En la Fig. 5 se aprecia la norma del error entre el vector de estado, las posiciones y velocidades deseadas $\|x - x_d\|$, donde el control logra estabilizar al sistema a una región muy cercana a cero, incluso desconociendo la señal sísmica. Lo cual nos permite afirmar un buen acoplamiento entre el observador y el controlador PD.

ISSN en trámite

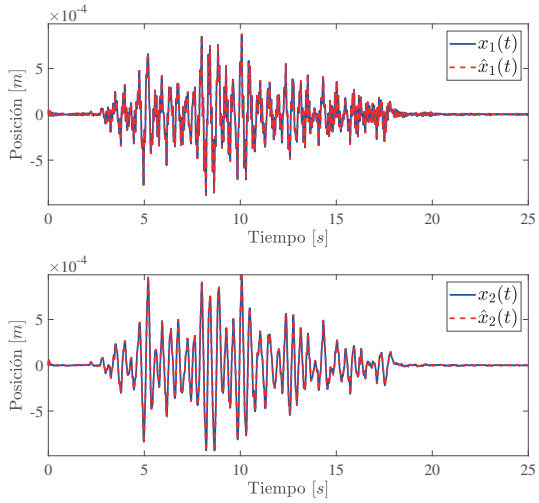


Figura 3. Estimación de la posición de cada piso.

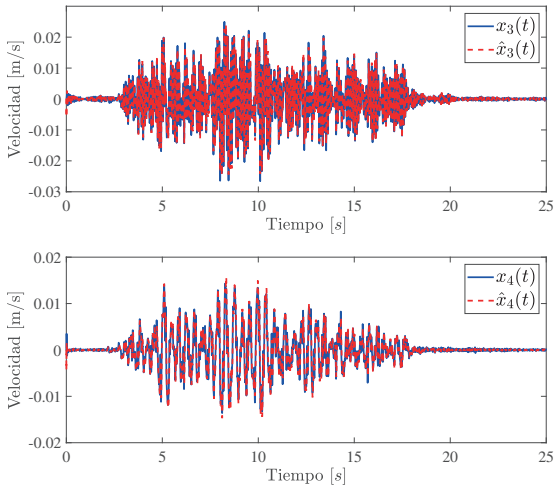


Figura 4. Estimación de las velocidad de cada piso.

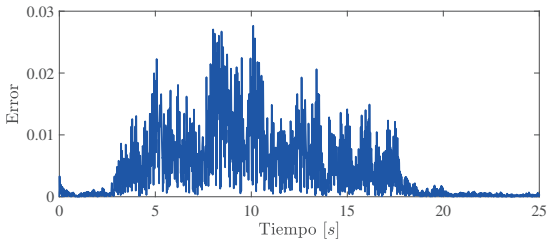


Figura 5. Norma del error $\|x - x_d\|$.

5. CONCLUSIONES

Se presentó un control proporcional-derivativo (PD) basado en un observador espectral para reducir las oscilaciones en una estructura de dos pisos, tomando las aceleraciones de cada piso como las señales medibles asumiendo al sismo como una entrada desconocida. Por medio de un ajuste adecuado entre las ganancias del control y del observador se logra reducir considerablemente los desplazamientos presentados en la estructura debido a las oscilaciones sísmicas. Una de las principales características del diseño propuesto es el ser un algoritmo simple capaz de ser implementado en un entorno real con el ajuste adecuado.

REFERENCIAS

Dertimanis, V., Chatzi, E., Eftekhar Azam, S., and Papadimitriou, C. (2019). Input-state-parameter estimation of structural systems from limited output information. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 126, 711–746.

Enríquez-Zárate, J., Valencia-Palomo, G., López-Estrada, F.R., Silva-Navarro, G., and Hoyo-Montaño, J.A. (2020). Efficient predictive vibration control of a building-like structure. *Asian Journal of Control*, 22(4), 1411–1421.

Erazo, K. and Hernandez, E.M. (2014). A model-based observer for state and stress estimation in structural and mechanical systems: Experimental validation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 43(1), 141–152.

Lourens, E., Papadimitriou, C., Gillijns, S., Reynders, E., De Roeck, G., and Lombaert, G. (2012). Joint input-response estimation for structural systems based on reduced-order models and vibration data from a limited number of sensors. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 29, 310–327.

Morales-Valdez, J., Alvarez-Icaza, L., and Concha, A. (2018). On-line adaptive observer for buildings based on wave propagation approach. *Journal of Vibration and Control*, 24(16), 3758–3778.

Morales Valdez, J., Alvarez-Icaza, L., and Escobar, J.A. (2019). Online identification system for damage location in building structures. *IEEE Latin America Transactions*, 17(08), 1283–1290.

Morales-Valdez, J., Lopez-Pacheco, M., and Yu, W. (2020). Automated damage location for building structures using the hysteretic model and frequency domain neural networks. *Structural Control and Health Monitoring*, 27(9), e2584.

Nayek, R., Chakraborty, S., and Narasimhan, S. (2019). A gaussian process latent force model for joint input-state estimation in linear structural systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 128, 497–530.

Ramírez-Rasgado, F., Galaz-Palma, R.R., Hernández-González, O., Astorga-Zaragoza, C.M., Guerrero-Sánchez, M.E., Valencia-Palomo, G., and Targui, B. (2020). Control basado en observador para el desplazamiento de estructuras con retardo en la señal de control. In *Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada*, 121–125.

Rodriguez-Torres, A., Morales-Valdez, J., and Yu, W. (2020). Modeling and proportional-derivative controller design for buildings based on vibration frequencies. *2020 7th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, 1, 575–580.

Torres, L., Jiménez-Cabas, J., Gómez-Aguilar, J.F., and Pérez-Alcazar, P. (2018). A simple spectral observer. *Mathematical and Computational Applications*, 23(2).

ISSN en trámite

Diseño de un reactor tubular continuo con agitadores estáticos para la producción de mono alquil ésteres

Peggy E. Alvarez Gtz*. Manuel Adam Medina,**
Betty Y. López Zapata*, Roberto Berrones Hernández***

*CONACYT TecNM Instituto Tecnonógico de Tuxtla Gutiérrez. Carretera Panamericana km. 1080, Col. Juan Crispín, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas 29050 MEX (Tel: 961 615 0380; e-mail: peggy.alvarez@hotmail.com).
**Tec NM Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Palmira, Cuernavaca, Mor., 62490 MEX (e-mail: manuel.am@cenidet.tecnm.mx)
***Universidad Politécnica de Chiapas, Col. Las Brisas; Suchiapa, Chiapas.29150. MEX, (e-mail: blopezz6@hotmail.com, roberto.berrons@gmail.com)

Abstract: Non-renewable energy has a due date and causes damages to the environment. On the other hand, renewable energy is inexhaustible, clean and has great potential for the generation of energy with efficient industrial processes. The global demand for biofuels in the last decades has grown exponentially, while the production processes do not have an equivalent growth. This is mainly due to the lack of a technology that allows both the production of biodiesel according to standards and the significant reduction of costs. Therefore, the development of systems for efficient production is a key factor and can contribute to make energy transformations that are friendly to the environment. Thus, the objective of this work was to design a biodiesel production system centered on a tubular chemical reactor in continuous operation with a static agitation system. This is the first step for the development of a mathematical model with experimental validated data and the instrumentation, automation and control system for the efficient production of methyl esters.

Keywords: Climate change, bioenergy production, biodiesel, renewable energy, biofuels.

1. INTRODUCTION

La reducción de las reservas de combustibles fósiles y el creciente deterioro del impacto ambiental por su consumo han generado la búsqueda de nuevas y renovables fuentes de energía (Demirbas, 2009; Ovando-Medina, et al. 2009; Mansouri et al., 2013). El biodiesel es un biocombustible renovable en el que se utiliza como materia prima triglicéridos provenientes de aceites vegetales de semillas de oleaginosas. La producción de bicombustibles contribuye sensiblemente a mitigar los efectos del cambio climático (Likozar y Levec, 2014), grasas animales (Kirubakaran y Mozhi, 2018), aceites reciclados (Talebian-Kiakalaieh et al., 2013), microalgas (Jazzar et al., 2015) y hongos (Cui y Liang, 2014). Este biocombustible presenta propiedades de lubricidad, biodegradabilidad y su combustión no genera gases efecto invernadero (Ozcanli et al. 2013). En general, tecnología de manufactura del biodiesel se lleva a cabo en reacciones homogéneas con la presencia de un catalizador alcalino como NaOH. La transesterificación de los triglicéridos de las grasas y aceites producen mono alquil ésteres de ácidos grasos (biodiesel) y glicerol. El mecanismo de transesterificación incluye tres reacciones reversibles en los que generalmente hay un exceso de alcohol de cadena corta como metanol para convertir los triglicéridos en alquil-ésteres (López Zapata et al., 2018).

1.1 Antecedentes

Existen plantas a pequeña escala que producen biodiésel, tienen muchos factores sociales, económicos y ambientales. De hecho, las pequeñas plantas contribuyen significativamente a la producción de energía renovable y rural. Las comunidades pueden utilizar/reutilizar materias primas locales y gestionar procesos de forma independiente, obtener biocombustibles mediante herramientas de autoabastecimiento imprescindibles,

ISSN en trámite

sencillas, flexibles y baratas. La revisión y la comprensión de las plantas recientes de pequeña producción de biodiésel es esencial para identificar limitaciones y unidades críticas para la mejora del proceso actual. Entre muchas posibilidades, se eligieron los aceites de cocina de desecho como fuentes económicas y ecológicas para producir biodiésel por transesterificación catalizada por bases en un reactor. El reactor es el corazón del proceso y su diseño apunta a alcanzar altos rendimientos del producto teniendo en cuenta la configuración, los materiales de construcción, la cinética de la reacción, transferencia de calor y masa, y todos los parámetros de reacción.

Generalmente se eligen dos tipos de reactores para la fabricación de biodiésel: reactores discontinuos (por lotes) y de flujo continuo. Los reactores por lotes son baratos y muy flexibles para los usuarios, fáciles de limpiar, pero los reactores discontinuos los demerita la baja productividad, necesitan más energía y mano de obra para operar y varía significativamente en la calidad del producto. Los reactores discontinuos se utilizan principalmente para producción de biodiésel a pequeña escala. El principal inconveniente de los reactores discontinuos es la producción a pequeña escala debido al tamaño pequeño del tanque. También se observó que la capacidad de producción de la planta podría incrementarse en acortar el tiempo de reacción en el proceso continuo de producción de biodiésel, el proceso de transesterificación que utiliza un reactor de flujo continuo se utiliza para biodiésel a gran escala.
Por su parte, los reactores de flujo continuo producen una calidad similar del producto, con bajo costo de capital y operación para la síntesis de biodiesel. El sistema de proceso continuo tiene muchos beneficios en comparación con el sistema por lotes. Estos incluyen una mayor eficiencia en el control de los parámetros de reacción, la mezcla de reactivos y la calidad uniforme del biodiésel producido, menos pasos para escalar y operación de la unidad durante el aislamiento del producto. La viabilidad económica de la producción de biodiésel depende principalmente del tipo de producción, tecnologías para una excelente productividad y costo de la materia prima. Esto exige buscar eficiencia tecnológica en la producción de biodiésel con materia prima más barata. El aspecto de los costos y el consumo de energía de los reactores también juegan un papel crucial en el proceso de producción de biodiesel.

1.2 Justificación

La producción de biodiesel se ha descrito en sistemas batch o continuos. Los sistemas por lote son los que se utilizan con mayor frecuencia en la industria (Dorado et al., 2004; Hájek et al. 2009; Liu et al., 2018), sin embargo estos sistemas tienen desventajas económicas y de diseño que influyen en la calidad del biodiesel (Santacesaria et al., 2012), los que incluyen tiempo de residencia de varias horas, costos altos de inversión en equipo y diseño de fábrica, y en algunos casos eficiencias bajas de producción con altos consumos de energía (Jachuck et al., 2009). En contraste, los sistemas continuos son una alternativa que permite solventar estas limitaciones pues incrementan sensiblemente la eficiencia y reducen costos y tiempos de proceso (Tran et al., 2017).

Recientemente se han diseñado diferentes tipos de reactores continuos para la producción de biodiesel para optimizar la producción, por ejemplo los reactores de cavitación, de microondas, de flujo oscilatorio, de alta presión, de fibra o de película (Likozar et al., 2016). Estos reactores son alternativas a los diseños convencionales utilizados en la industria, los cuales tienen diferentes desventajas que influyen directamente en el costo y rendimiento del biocombustible.

1.3 Objetivo

El objetivo de este trabajo fue el diseño y construcción de un sistema de producción de biodiesel por transesterificación en un reactor tubular basado en sistemas de agitación estática que permita el uso de diferentes aceites de oleaginosas.

2. PROPUESTA DE SOLUCION

2.1 Criterios de diseño

El sistema de consiste en un reactor tubular y los equipos periféricos necesarios para llevar a cabo la operación en sistema continuo. Los criterios de diseño fueron los siguientes:

a. Las condiciones de flujo varían de 2.5 a 10 L/h. La reacción se mantendrá a condiciones normales de baja temperatura, cercanas a los 60 °C. La presión del reactor se mantendrá en 100 psi, autogenerada por el sistema de impulsión.
b. El reactor tubular será construido a escala prototipo, la longitud del reactor se estimó en 6 metros, basado en el caudal.
c. La producción de biodiesel se llevará a cabo por transesterificación catalizada por álcali, utilizando como catalizador KOH en forma de metóxido. La relación molar utilizada es de 6:1, respecto al metanol y el aceite.
d. El material de construcción del reactor es principalmente acero inoxidable T-316 en combinación con tubo de vinilo de fabricación especial.

Estos criterios de diseño permitieron la selección de los materiales de construcción de los diferentes equipos.

2.2 Construcción del Reactor Tubular Continuo (RTC)

Para la construcción del RTC se utilizaron 12.8 m de tubería de ¼ in en tuo o tubing de acero inoxidable y 4.2 m de mezcladores estáticos en tubería de polipropileno de ½ in. El tubing fue doblado para hacer tres aros de 30 cm de diámetro utilizando 3.2 m de longitud para los dos primeros y 6.4 m para

ISSN en trámite

el otro. Los primeros dos aros de tubing fueron sumergidos en posición horizontal en un recipiente de acero inoxidable que funge como reactor de calentamiento. Estas secciones de tubería sirven para calentar el alcohol y el aceite por separado. Posteriormente los extremos de cada tubería fueron unidos mediante un cople de acero tipo "t" a la sección de agitadores estáticos, la cual está dispuesta fuera del reactor de calentamiento. A continuación, el otro extremo de agitadores estáticos fue conectado al tercer aro de tubing el cual fue también sumergido en el reactor de calentamiento. Para suministrar los reactivos se utilizaron dos bombas peristálticas de flujo controlado (Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, EE. UU.). Debido a que la sección de agitadores estáticos se encuentra fuera del reactor de calentamiento le fue instalado un material aislante para evitar las pérdidas de calor. También se instalaron dos válvulas de muestreo al inicio de la sección de los mezcladores y al final. Por otro lado, se instalaron los flujómetros del sistema, estos fueron dispuestos después de las bombas de alimentación y antes del reactor de calentamiento. Los flujómetros fueron programados para convertir las vueltas de sus hélices internas por minuto en un flujo volumétrico.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

3.1 Diseño del Reactor Tubular Continuo (RTC)

El sistema completo se presenta en la Figura 1 y consiste en dos depósitos de alimentación. El primero mezcla el alcohol de cadena corta (metanol) con el catalizador alcalino (KOH) para la formación del metóxido. El segundo serve para el acondicionamiento del aceite vegetal. Ambos depósitos se mezclan y acondiciona a la temperatura de reacción (50 °C) antes de entrar a un mezclador estático. El mezclador estático está en serie con el reactor tubular con un sistema de recirculación. El reactor tubular tiene un sistema de control de temperatura por medio de un baño térmico. El sistema opera de forma continua por lo que al salir del reactor alimenta a un separador que alimenta tanto a un depósito de biodiesel y como a uno de glicerol.

3.2 Construcción del Reactor Tubular Continuo (RTC)

El sistema construido se presenta en la Figura 2 y consiste en un reactor principapal, un almacen de aceite, bombas peristálticas, flujómetros y mezcladores estáticos.

3.3 Producción de mono alquil ésteres (biodiesel)

A partir de aceite de aceites vegetales y de ácido oleico fue possible producer monoalquil ésteres (biodiésel) en el reactor tubular continuo acoplado a agitadores estáticos.

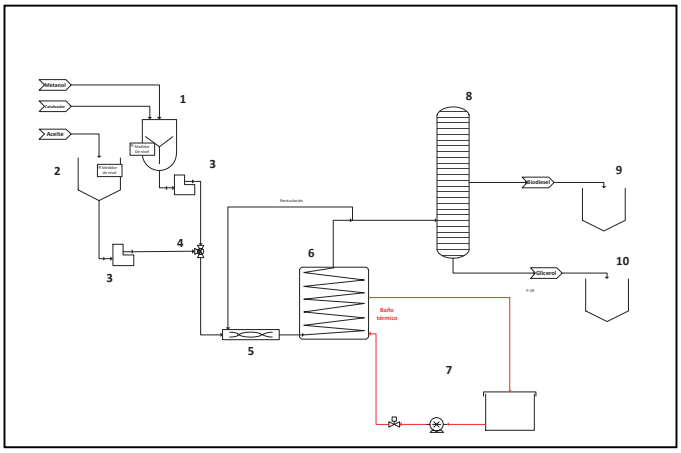


Fig. 1.Sistema de producción de biodiesel por transesterificación homogénea por álcali en un reactor tubular continuo. 1) Depósito de Metóxido, 2) Depósito de aceite, 3) Bombas dosificadores, 4) Mezclador, 5) Mezclador estático, 6) Intercambiador de calor, 7) Sistema calefactor, 8) Separador, 9) Depósito de biodiesel, 10) Depósito de glycerol.

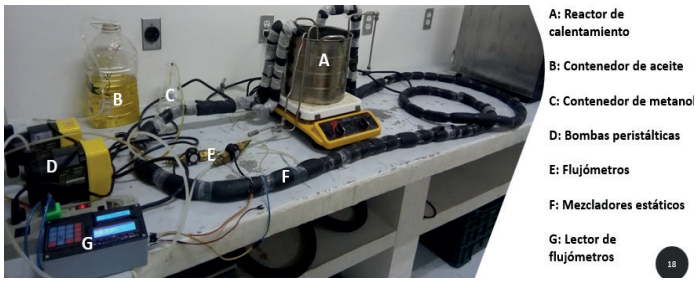


Figura 2. Sistema construido de producción de biodiesel por transesterificación homogénea por álcali en un reactor tubular continuo con agitadores estáticos.

4. PERSPECTIVAS A FUTURO

El diseño de este sistema es el primer paso para la puesta en marcha, instrumentación y validación a nivel prototipo de producción continua para desarrollar un sistema de control automático. Este sistema permitirá la experimentación para evaluar los parámetro fisicoquímicos que intervienen en el proceso de producción de biodiesel así como el desarrollo de un modelo matemático validado. Uno de los objetivos a largo plazo, establecido a partir la obtención de los resultados de este diseño es la investigación y desarrollo de estrategias de control automático (rama de la electrónica) que permitan automatizar el proceso en el reactor y obtener un desempeño eficiente del mismo. De manera similar, pueden abordarse investigaciones que afronten problemáticas como la de la eficiencia y

ISSN en trámite

optimización del proceso desde el enfoque de diferentes disciplinas de manera individual o simultáneamente.

6. CONCLUSIONES

El diseño y construcción del sistema de producción de biodiesel consiste en un reactor tubular acoplado a un sistema de agitación estática con sistemas de depósito y mezclado permitió la producción de biodiesel a partir de aceites vegetales por transesterificación.

REFERENCIAS

Cui, Y., & Liang, Y. (2014). Direct transesterification of wet Cryptococcus curvatus cells to biodiesel through use of microwave irradiation. *Applied Energy*, *119*, 438–444. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.016

Demirbas, A. (2009). Progress and recent trends in biodiesel fuels. *Energy Conversion and Management*, *50*(1), 14–34. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.09.001

Dorado, M. P., Ballesteros, E., López, F. J., & Mittelbach, M. (2004). Optimization of alkali-catalyzed transesterification of Brassica Carinata oil for biodiesel production. *Energy and Fuels*, *18*(1), 77–83. https://doi.org/10.1021/ef0340110

Gupta, J., Agarwal, M., & Dalai, A. K. (2020). An overview on the recent advancements of sustainable heterogeneous catalysts and prominent continuous reactor for biodiesel production. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, *88*, 58–77. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2020.05.012

Hájek, M., Skopal, F., & Kwiecien, J. (2009). Biodiesel preparation in a batch emulsification reactor. *European Journal of Lipid Science and Technology*, *111*(10), 979–984. https://doi.org/10.1002/ejlt.200900012

Jachuck, R., Pherwani, G., & Gorton, S. M. (2009). Green engineering: continuous production of biodiesel using an alkaline catalyst in an intensified narrow channel reactor. *Journal of Environmental Monitoring : JEM*, *11*(3), 642–647. https://doi.org/10.1039/b807390m

Jazzar, S., Olivares-Carrillo, P., Pérez de los Ríos, A., Marzouki, M. N., Acién-Fernández, F. G., Fernández-Sevilla, J. M., … Quesada-Medina, J. (2015). Direct supercritical methanolysis of wet and dry unwashed marine microalgae (Nannochloropsis gaditana) to biodiesel. *Applied Energy*, *148*, 210–219. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.069

Kirubakaran, M., & Arul Mozhi Selvan, V. (2018). A comprehensive review of low cost biodiesel production from waste chicken fat. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.039

Likozar, B., & Levec, J. (2014). Transesterification of canola, palm, peanut, soybean and sunflower oil with methanol, ethanol, isopropanol, butanol and tert-butanol to biodiesel: Modelling of chemical equilibrium, reaction kinetics and mass transfer based on fatty acid composition. *Applied Energy*, *123*, 108–120. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.02.046

Likozar, B., Pohar, A., & Levec, J. (2016). Transesterification of oil to biodiesel in a continuous tubular reactor with static mixers: Modelling reaction kinetics, mass transfer, scale-up and optimization considering fatty acid composition. *Fuel Processing Technology*, *142*, 326–336. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.10.035

Liu, L., Hong, Y., Ye, X., Wei, L., Liao, J., Huang, X., & Liu, C. (2018). Biodiesel production from microbial granules in sequencing batch reactor. *Bioresource Technology*, *249*, 908–915. *https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.10.105*

López Zapata, *B. Y., Ad*am Medina, M., Álvarez Gutiérrez, P., Hernández de León, H., García Beltrán, C., & Meza Gordillo, R. (2018). Different approaches for the dynamic model for the production of biodiesel. *Chemical Engineering Research and Design*, *2*, 536–550. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.01.048

Mansouri, S., Ismail, M., Babi, D., Simasatitkul, L., Huusom, J., & Gani, R. (2013). Systematic Sustainable Process Design and Analysis of Biodiesel Processes. *Processes*, *1*(2), 167–202. https://doi.org/10.3390/pr1020167

Ovando-Medina, I., Espinosa-García, F., Núñez-Farfán, J., & Salvador-Figueroa, M. (2009). Does biodiesel from Jatropha Curcas represent a sustainable alternative energy source? *Sustainability*, *1*(4), 1035–1041. https://doi.org/10.3390/su1041035

Ozcanli, M., Gungor, C., & Aydin, K. (2013). Biodiesel fuel specifications: A review. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, *35*(7), 635–647. https://doi.org/10.1080/15567036.2010.503229

Santacesaria, E., Vicente, G. M., Di Serio, M., & Tesser, R. (2012). Main technologies in biodiesel production: State of the art and future challenges. *Catalysis Today*. https://doi.org/10.1016/j.cattod.2012.04.057

Talebian-Kiakalaieh, A., Amin, N. A. S., Zarei, A., & Noshadi, I. (2013). Transesterification of waste cooking oil by heteropoly acid (HPA) catalyst: Optimization and kinetic model. *Applied Energy*, *102*, 283–292. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.07.018

Tran, D. T., Chang, J. S., & Lee, D. J. (2017). Recent insights into continuous-flow biodiesel production via catalytic and non-catalytic transesterification processes. *Applied Energy*. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.006

ISSN en trámite

Evaluation of Photosensors for Laser Scanning Range Extension

Ivan Yeniseysk Alba Corpus, Lars Lindner, Oleg Sergiyenko [*]
Julio C. Rodríguez-Quiñonez, Wendy Flores-Fuentes [**]
Fabian N. Murrieta-Rico [***]

[*] *Instituto de Ingeniería, UABC, Mexicali, México (e-mail: lindner.lars@uabc.edu.mx).*
[**] *Facultad de Ingeniería, UABC, Mexicali, México*
[***] *Departamento de Ingeniería Mecatrónica, UPBC, Mexicali, México*

Abstract: Laser scanners are widely used in industry and science, where measurement of 3D coordinates of any object under observation is required. A novel laser scanner called Technical Vision System (TVS), which uses the Dynamic Triangulation measurement method, has proven to present a fast and reliable laser scanning system. The measurement range of the current TVS prototype No.3 shall be extended. For this purpose and in the present paper, two types of photosensors and two types of amplifier circuits for the TVS Scanning Aperture are evaluated and compared to each other. It has been found that using a phototransistor together with a transimpedance amplifier represents a better solution than using a photodiode or a non-inverting amplifier. This configuration extends the field of application of the TVS to areas that were previously inaccessible.

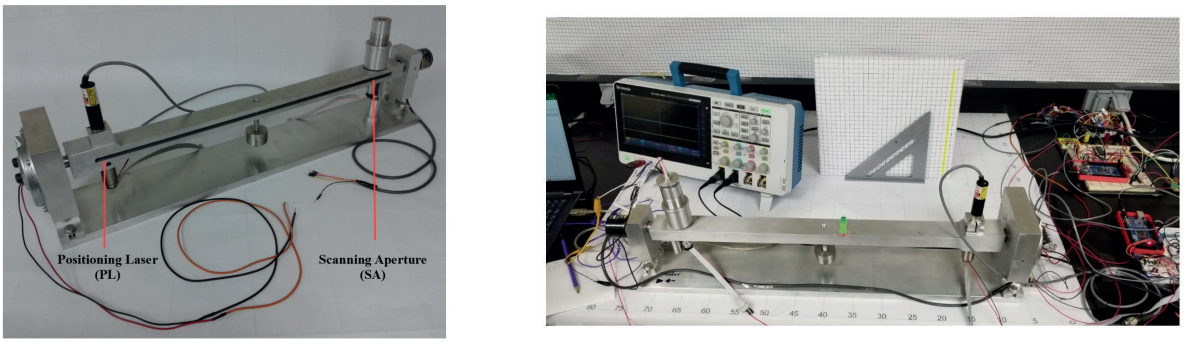
Keywords: Laser scanning, Technical vision system, Dynamic triangulation, Transimpedance amplifier, Photosensor characterization

1. INTRODUCTION

Laser scanners as image processing sensors play an important role when it comes to measuring three-dimensional coordinates of scanning objects. These coordinates can be used to map terrain, obstacle avoidance routines and surveying enclosed spaces such as pipes or ducts. The measurement of 3D coordinates can be found in a variety of applications, often implemented using optical methods. While optical methods such as camera-based vision systems are a good source of datasets for point clouds, they are prone to outliers (Rehman et al., 2019) and can struggle when operating in darkness or in weather conditions such as rain or fog (Zywanowski et al., 2020). 3D mapping (Zhang and Singh, 2017), autonomous robots (Fu et al., 2012), automatic inspections (Mavrinac et al., 2015), coat thickness measurement (Shao et al., 2019), object existence and location detection (Aloni and Yitzhaky, 2014), show clear examples of accurate positioning technologies. A novel Technical Vision System (TVS, prototype No.3) (Lindner et al., 2016d) was developed at the Engineering Institute of UABC, which represents a laser scanning system capable of measuring 3D coordinates in the TVS field-of-view (FOV), to determine the information of scanned surfaces for scientific and industrial application. The TVS uses the Dynamic Triangulation measurement principle and trigonometric functions, to measure distances and angles of any object under observation (Lindner et al., 2016a,c,b, 2017; Lindner, 2017). The applications of the TVS range from mobile robot navigation (Reyes-Garcia et al., 2020), through static and dynamic structural health monitoring (Flores-Fuentes et al., 2014; Rivera-Castillo et al., 2016; Castro-Toscano et al., 2020), to medical applications (Rodriguez-Quinonez et al., 2013; Rodríguez-Quiñonez et al., 2014).

The Scanning Aperture (SA) is one essential technical component of this TVS, which represents the receiver unit and which processes and detects the reflected laser beam angle. The TVS currently uses a low power green laser (518 nm) which is difficult to detect. The available sensor installed in the system has a peak wavelength sensitivity of 850 nm, which makes it not optimal for usage in this system. Coupled with the low availability of sensors with high sensitivity to the laser beam, as well as the interference in the sensors caused by natural and artificial light going from $400nm$ to $700nm$, which is in the spectrum of sensibility for the new sensors, makes it necessary to develop a filter, amplifier and algorithms to condition the laser beam signal received by the TVS SA (Corpus et al., 2020). The measurements taken with the current available sensors also show that the output current is too low to be measured and that these sensors only output a specific amount of voltage and current depending on the received laser light, without it being

ISSN en trámite



(a) TVS without connections

(b) TVS with connections

Fig. 1. TVS prototype No.3

possible to augment the output by changing the voltage supply. Augmenting the sensitivity of the system to get an extended range of vision would prove beneficial, especially when using the system in applications such as obstacle avoidance and navigation (Stulgis et al., 2018).

Thus, both conditioning of the signal and the implementation of an amplification method are necessary in order to extend the scanning range of the system. Thereby, the present paper describes the evaluation of two types of photosensors, proposed for the TVS SA, using different experimental parameters and configurations. A photodiode is compared with a phototransistor, whose output signals (photocurrent and -voltage) are amplified by using a non-inverting and a transimpedance amplifier.

The paper is organized as follows. After the introduction, a brief overview of related works concerning laser scanners and photosensors to detect coherent light is given. The following section describes fundamentals about the Technical Vision System, photosensors and transimpedance amplifiers. Following that, the next section describes the experimentation and the experimental results to evaluate two types of photosensors proposed for the TVS SA. The next section discusses the obtained experimental results using tables and graphics. Lastly, the conclusions as well as plans for future works are included.

2. RELATED WORKS

Laser scanning systems, as remote sensing technology, have found an extensive field of applications. They can be found in medical applications, land and building surveying, as laser and 3D printers, in mining and reverse engineering, only to name just a few. In work (Li et al., 2014), the structure of vegetation canopy are measured using laser scanning. It provides a way of obtaining dense canopy structure data in-situ without touching the targets. In work (Richardson et al., 2014) new vegetation indices that quantify the three-dimensional spatial configuration of plant communities are developed using terrestrial laser scanning. A 3-D laser tracking scanner system analysis focusing on immunity to ambient sunlight and geometrical resolution is presented in (Blais et al., 2000). An overview about history and applications of 3D laser scanners can be found in (Edl et al., 2018).

3. FUNDAMENTALS

3.1 Technical Vision System and Scanning Aperture

Fig.1 shows two images about the TVS prototype No.3 with and without connections. From Fig.1a, two principle parts of the TVS can be clearly observed: the Positioning Laser (PL) and the Scanning Aperture (SA). The laser diode module Coherent StingRay-514 containing a 10mW laser diode with 514nm wavelength is used as a coherent light source of the TVS. A detailed view of the TVS SA is depicted in Fig.2, which shows the optical path of the received laser beam (I), a DC motor Maxon A-max16 (II), a 45° mirror (III), two biconvex lenses (IV), an optical filter (V) and the used photosensor (VI).

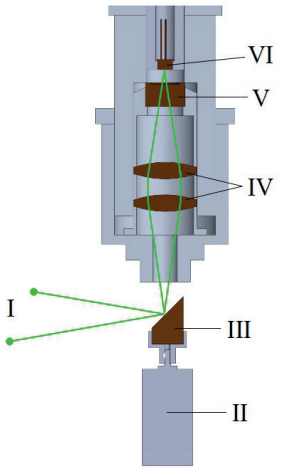


Fig. 2: TVS Scanning Aperture

ISSN en trámite

The SA DC motor is digitally controlled by a microcontroller, which by use of a PI-algorithm maintains a predetermined and constant rotating speed of the 45˚ mirror. The optical filter has a center wavelength of 515nm, full width-half wavelength of 10nm and a transmission of 45%. The center wavelength of the filter corresponds to the laser diode module wavelength of 514nm. The present paper offers the specification of the used photosensor and the used amplifier, to amplify the small photocurrent of the photosensor to a detectable signal, which is then measured using the ADC of the microcontroller.

3.2 Photosensors

Photosensors refer to electronic components that convert light into an electrical signal using the photoelectric effect or exhibit an electrical resistance that is dependent on the incident radiation. Most photosensors consist of a semiconductor with photoconductive properties, in which the electrical conduction varies depending on the intensity of the radiation reaching the sensor. The most common types of photosensor are photodiodes, phototransistors, and photoFETs. These devices are essentially the same common diodes, bipolar transistors, and FETs, except that the packages in which they are encapsulated have transparent windows that allow light to reach the junctions between the internal semiconductor materials. Bipolar transistors and FETs provide additional amplification to its sensing capabilities (Donati, 2021).

3.3 Transimpedance Amplifier

The Transimpedance Amplifier represents a more specific use of Operational Amplifiers, which use a current signal to transform it to a voltage signal, maintaining a specific gain. This is important in many optics applications, since the means for sensing a light signal from a source are photodetectors. These photodetectors take a light intensity signal and generate a current signal, which is proportional to this intensity. However, most of the measurement devices (for example, oscilloscopes, analog-digital converters, spectrum analyzers, etc.) handle voltage signals, and show a certain dynamic range. Depending on the application in which the photodetectors are used, the currents produced by them can be considerably low. This is why, in addition to transforming the signal from current to voltage, it must also be amplified (Corpus et al., 2020).

4. EXPERIMENTATION AND RESULTS

The following section describes the evaluation of two types of photosensors, using different experimental parameters and configurations. A photodiode is compared with a phototransistor, whose output signals (photocurrent and photovoltage) are amplified by using a non-inverting and a transimpedance amplifier.

4.1 Design of Experiment

The experimentation consisted of collecting data to verify the characteristics of the TVS SA photosensors using a non-inverting and a transimpedance amplifier in different amplification configurations. Evaluation of the photosensors was performed first by directly measuring the reflection of laser light from a cylindrical object and verifying the results. Once this was done, these results were verified by installing the sensors inside the SA and taking new measurements from the amplifier. The sensor with the highest efficiency was then selected. The following factors were taken into account for the experimentation: light level within the laboratory, the photosensor voltage, the resistance used for the transimpedance amplifier, the rotating speed of the SA and the distance between the scanned object and the SA. Following Table 1 summarizes the experimentation factors range and their levels:

Table 1. Experimentation factors

Factor	**Level / Range**	**Δ**
Laboratory Light	ON (1076 Lux) or OFF (< 1 Lux)	-
Photosensor Voltage	$5V$ - $7V$	$1V$
Amplifier Resistance	$1M\Omega$ - $10M\Omega$	$1M\Omega$
SA Rotating Speed	$300rpm$ or $500rpm$	-
Scanning Distance	$10cm$ - $50cm$	$5cm$

4.2 Static evaluation using direct measurement

The photosensors which were evaluated using direct measurement are the BPW21R photodiode and the TEPT5600 phototransistor from the manufacturer VISHAY. The photodiode was selected mainly due to its sensitive area of $7.5mm^2$ and angle of half sensitivity of ∓ 50 , while the phototransistor was selected due to its higher photo sensitivity and smaller dimensions compared to the photodiode. The selected sensors are highly sensible to the electromagnetic spectrum of the TVS laser ($518nm$), having a sensitivity peak of $565nm$ and $570nm$ respectively. For verification of the operation of these two sensors, a non-inverting voltage and a transimpedance amplifier were used, both implemented using the LM358. Both sensors were evaluated with laboratory lights turned off, using several measurements of direct reflection of the TVS laser beam from a metal object. Both sensors were installed with the same distance to the object outside of the SA, as shown in Fig.3. When using the BPW21R, a voltage signal of $0.759V$ and a noise signal of $0.014V$ were measured. When using the TEPT5600, a voltage signal of 1.622 and a noise signal of $0.013V$ were measured. Using the TEPT5600 phototransistor, a higher voltage signal with less noise can be received.

ISSN en trámite

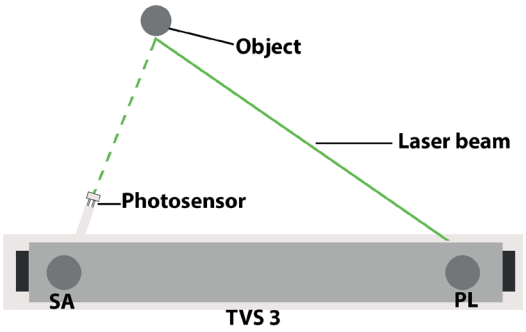


Fig. 3. Evaluation of both photosensors using direct measurement

4.3 Static evaluation using indirect measurement

After direct measurement, the behavior of both sensors was evaluated while installed inside the SA with laboratory lights turned off, as shown in Fig. 4.

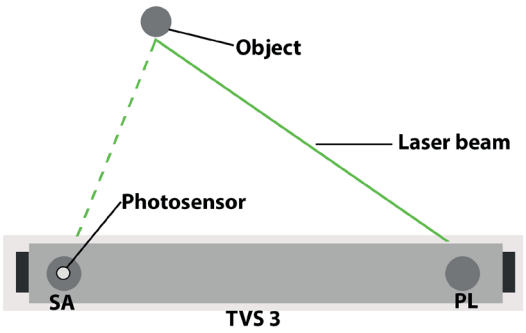


Fig. 4. Evaluation of both photosensors using indirect measurement

For this evaluation, the same cylindrical metal object was positioned 30cm in front of the SA, while the mirror of the SA and the laser positioner were manually pointed at the object and the two amplification circuits were implemented for comparison. Table 2 summarizes the indirect measurement for the voltage signals while Table 3 shows the indirect measurement for the noise signals.

Table 2. Indirect measurement of voltage signal

Sensor	Voltage Signal [V]	Amplifier
BPW21R	0.015	Non-inverting
BPW21R	0.104	Transimpedance
TEPT5600	0.459	Non-inverting
TEPT5600	2.960	Transimpedance

Based on the received voltage gains from Table 2, the TEPT5600 phototransistor with the transimpedance amplifier was chosen for the following static evaluation using triangulation.

Table 3. Indirect measurement of noise signal

Sensor	Noise Signal [V]	Amplifier
BPW21R	0.013	Non-inverting
BPW21R	0.013	Transimpedance
TEPT5600	0.014	Non-inverting
TEPT5600	0.349	Transimpedance

4.4 Static evaluation using triangulation

Once the TEPT5600 phototransistor with transimpedance amplifier was selected, an experiment was designed to verify the amplification capacity of the reflected laser beam received by the SA. The aim of this experiment was the verification of the amplification of the transimpedance amplifier, to take the measurements, it was decided to consider experimental factors such as distance combined with ambient light and the material of the object to be scanned. In the experiment, the motors of the system were stopped at specific positions using the principle of static triangulation with the purpose of aligning the SA and PS to the object, hence obtaining the best possible reflection of the laser at the SA.

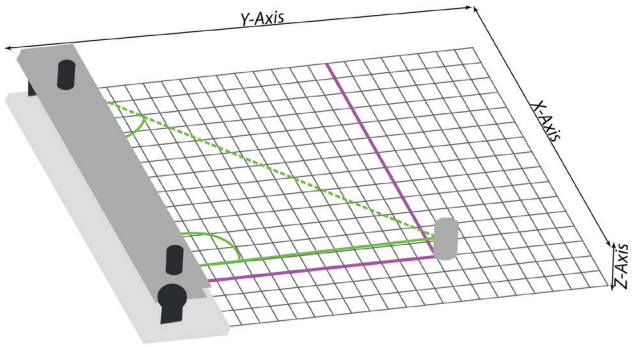


Fig. 5. Static evaluation using triangulation

Fig.5 depicts a schematic of the conducted experimentation for the static evaluation using triangulation. Measurements were conducted every 50cm with laboratory lights ON and OFF, using both a metallic bottle and a white wall as the scanning object to be detected. The mirrors and the SA were aligned by pointing the laser directly towards the mirror of the SA and verifying that the light beam was completely located at the center of the mirror. Measurements were taken by aligning the scanning object in front and center of the TVS and positioning the laser beam at the center of the object, as shown in Fig.6.

The next voltage measurements were obtained using a multimeter connected to the output of the transimpedance amplifier and manually changing between the metallic bottle and a white wall. Table 4 and Table 5 summarize the experimental results of these measurements. When using laboratory lights ON, a noise signal of 1.695V was measured and when using laboratory lights OFF, a noise signal of 0.350V was measured.

ISSN en trámite

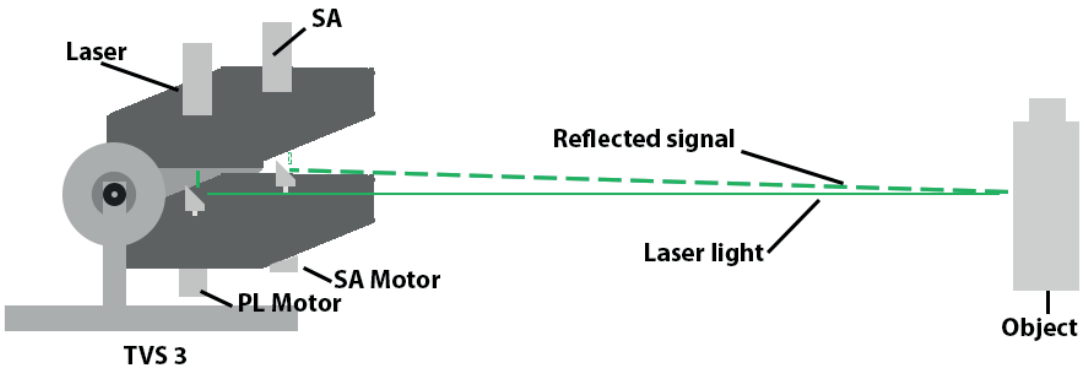


Fig. 6. Configuration of Experiment

Table 4. Triangulation using a metallic bottle / cylinder

Distance [m]	Light OFF [V]	Light ON [V]
0.5	2.957	3.504
1.0	2.804	3.523
1.5	1.850	2.950
2.0	1.532	2.552
2.5	1.102	2.719
3.0	0.850	2.652

Table 5. Triangulation using a white wall

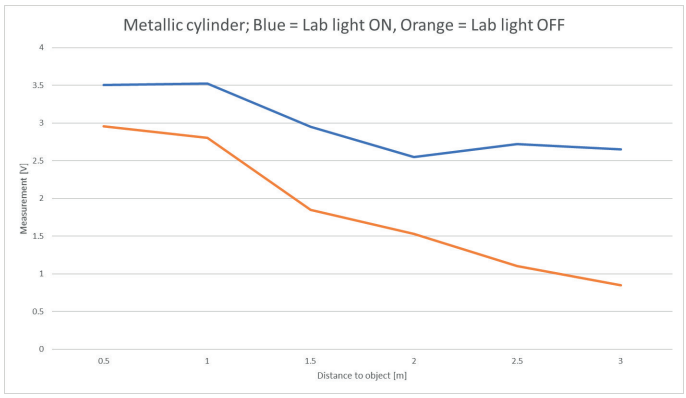
Distance [m]	Light OFF [V]	Light ON [V]
0.5	1.517	2.502
1.0	1.406	2.416
1.5	1.201	2.179
2.0	0.960	1.970
2.5	0.975	2.857
3.0	0.719	3.045

Fig.7a and Fig.7b show the comparison of the SA voltage measurements from Table 4 and Table 5, when measuring the reflection of the two objects using artificial light interference in the laboratory and without interference. Fig.7a depicts the data from Table 4 and Fig.7b the data from Table 5.

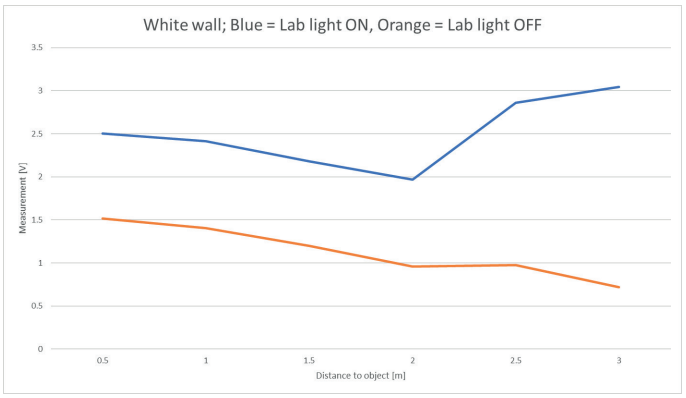
5. DISCUSSION

The experimental results from previous section 4 clearly shows the advantages of using the TEPT5600 phototransistor together with an transimpedance amplifier, when compared to the photodiode. The direct measurements from section 4.2 show, that when using the TEPT5600 phototransistor, a higher voltage signal with less noise is received. Note, that this fact can also be concluded from the results of section 4.3, which is why the use of the TEPT5600 phototransistor was defined as photosensor for the TVS SA. Using this configuration, the laser triangulation was carried out for different distances. The voltage signal of the reflected laser beam was measured for distances of $0.5 - 3m$, for two different scanning objects and for laboratory lights turned ON and OFF. While the direct relation between the voltage signal improvement with respect to the accuracy of distance measurements was not studied in this experiment, the clear decrease in the amplitude of the voltage signal shown in both Table 4 and Table 5 display a clear relation to the distance that can be studied in following experiments. It is also important to note that the surfaces of the objects, more precisely a metallic bottle / cylinder and a white wall, measured were already reflective and measurements taken form a more opaque surface are not shown in this paper. The orange graphs from Fig.7a and Fig.7b noticeably show how the voltage signal decreases when distance is incremented with laboratory lights turned OFF. The same effect can be observed for laboratory lights ON until approximately $2m$, as represented by the blue graphs from Fig.7a and Fig.7b. After this distance is reached, the voltage signal is increase with the distance, which will form part of future research. However, as long as the voltage signal is greater than the noise signal, it can be distinguished from it and a distance measurement can be carried out. Building on this work, the energy distribution of the reflected laser point on the surface of the object under observation is much clearer. This energy distribution ideally represents a normal distribution (Gaussian distribution), whose maximum point correlates directly with the angle of the TVS SA. Using the constant angular velocity of the TVS SA DC motor and the time of occurrence of this maximum point, the angle of the incident laser beam is determined. Using this angle together with the angle of the TVS PL, the 3D coordinates of the reflected laser point on the object surface can be measured (Lindner et al., 2016d). Repeating this process for different positions in the TVS field-of-view allows for a 3D reconstruction of the object under observation. This will be part of future works.

ISSN en trámite



(a) Metallic bottle / cylinder



(b) White Wall

Fig. 7. Results of static evaluation using triangulation

6. CONCLUSIONS

This work described the evaluation of two types of photosensors and the advantages of each. This evaluation was made using different experimental parameters and configurations using the TVS as a platform. It has been found that using a phototransistor together with a transimpedance amplifier configuration based on the LM358 OpAmp, a higher voltage signal with less noise can be received representing a better solution than using a photodiode or a non-inverting amplifier. Using this also allows for a scanning range extension of the used TVS laser scanning system. Using this amplifier will also allow for the energy distribution of the reflected laser point on the surface of the object under observation to be captured much more clearly.

REFERENCES

Aloni, D. and Yitzhaky, Y. (2014). Detection of Object Existence From a Single Reconstructed Plane Obtained by Integral Imaging. *IEEE Photonics Technology Letters*, 26(7), 726–728. doi:10.1109/LPT.2014.2304883. Conference Name: IEEE Photonics Technology Letters.

Blais, F., Beraldin, J.A., and El-Hakim, S. (2000). Range Error Analysis of an Integrated Time-of-Flight, Triangulation, and Photogrammetric 3D Laser Scanning System. In *SPIE Proceedings*. SPIE, Orlando, Florida.

Castro-Toscano, M.J., Rodríguez-Quiñonez, J.C., Sergiyenko, O., Flores-Fuentes, W., Ramírez-Hernández, L.R., Hernández-Balbuena, D., Lindner, L., and Rascón, R. (2020). Novel Sensing Approaches for Structural Deformation Monitoring and 3D Measurements. *IEEE Sensors Journal*, 1–1. doi: 10.1109/JSEN.2020.3031882. Conference Name: IEEE Sensors Journal.

Corpus, I.Y.A., Lindner, L., Sergiyenko, O., Ivanov, M., Fuentes, W.F., Rodriguez, J.C., Balbuena, D.H., Rico, F.N.M., and Gurko, A. (2020). Transimpedance Amplifier for Laser Scanning System Range Extension. In *2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 1421–1426. doi: 10.1109/ISIE45063.2020.9152487. ISSN: 2163-5145.

Donati, S. (2021). *Photodetectors: Devices, Circuits and Applications*. Wiley-IEEE Press.

Edl, M., Mizerák, M., and Trojan, J. (2018). 3d laser scanners, history and applications. *Acta Simulatio*, 4(4), 1–5. doi:10.22306/asim.v4i4.54.

Flores-Fuentes, W., Rivas-Lopez, M., Sergiyenko, O., Rodríguez-Quiñonez, J.C., Hernández-Balbuena, D., and Rivera-Castillo, J. (2014). Energy Center Detection in Light Scanning Sensors for Structural Health Monitoring Accuracy Enhancement. *IEEE Sensors Journal*, 14(7), 2355–2361. doi: 10.1109/JSEN.2014.2310224. Conference Name: IEEE Sensors Journal.

Fu, G., Menciassi, A., and Dario, P. (2012). Development of a low-cost active 3D triangulation laser scanner for indoor navigation of miniature mobile robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 60, 1317–1326. Publisher: Elsevier.

Li, X., Zhao, H., Liu, Y., Jiang, H., and Bian, Y. (2014). Laser scanning based three dimensional measurement of vegetation canopy structure. *Optics and Lasers in Engineering*, 54, 152–158. doi: 10.1016/j.optlaseng.2013.08.010.

Lindner, L. (2017). Laser Scanners. In *Developing and Applying Optoelectronics in Machine Vision*. doi:10.4018/978-1-5225-0632-4.ch004. ISBN: 9781522506324 Pages: 108-145 Publisher: IGI Global.

Lindner, L., Sergiyenko, O., Rivas-López, M., Hernández-Balbuena, D., Flores-Fuentes, W., Rodríguez-Quiñonez, J.C., Murrieta-Rico, F.N., Ivanov, M., Tyrsa, V., and Básaca-Preciado, L.C. (2017). Exact laser beam positioning for measurement of vegetation vitality. *Industrial Robot: An International Journal*, 44(4), 532–541. doi:10.1108/IR-11-2016-0297. URL `https://doi.org/10.1108/IR-11-2016-0297`. Publisher: Emerald Publishing Limited.

Lindner, L., Sergiyenko, O., Rivas-López, M., Rodríguez-Quiñonez, J., Hernández-Balbuena, D., Flores-Fuentes, W., Tyrsa, V., Nieto Hipólito, J.I., Murrieta-Rico,

ISSN en trámite

F.N., and Karthashov, V.M. (2016a). Issues of exact laser ray positioning using DC motors for vision-based target detection. In *Industrial Electronics (ISIE), 2016 IEEE 25th International Symposium on*, 929–934. IEEE, Santa Clara, USA.

Lindner, L., Sergiyenko, O., Rivas-López, M., Valdez-Salas, B., Rodríguez-Quiñonez, J., Hernández-Balbuena, D., Flores-Fuentes, W., Tyrsa, V., Medina Barrera, M., Murrieta-Rico, F.N., Mercorelli, P., and Gurko, A. (2016b). UAV remote laser scanner improvement by continuous scanning using DC motors. In *Industrial Electronics Society, IECON 2016 - 42th Annual Conference of the IEEE*, 371–376. IEEE, Florence , Italy.

Lindner, L., Sergiyenko, O., Rivas-López, M., Valdez-Salas, B., Rodríguez-Quiñonez, J., Hernández-Balbuena, D., Flores-Fuentes, W., Tyrsa, V., Medina Barrera, M., Murrieta-Rico, F.N., Mercorelli, P., Gurko, A., and Karthashov, V.M. (2016c). Machine vision system for UAV navigation. In *Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS), International Conference on*, 1–6. IEEE, Toulouse, France.

Lindner, L., Sergiyenko, O., Rodríguez-Quiñonez, J., Rivas-López, M., Hernández-Balbuena, D., Flores-Fuentes, W., Murrieta-Rico, F.N., and Tyrsa, V. (2016d). Mobile robot vision system using continuous laser scanning for industrial application. *Industrial Robot*, 43, 360–369. Publisher: Emerald.

Mavrinac, A., Chen, X., and Alarcon-Herrera, J.L. (2015). Semiautomatic Model-Based View Planning for Active Triangulation 3-D Inspection Systems. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20(2), 799–811. doi: 10.1109/TMECH.2014.2318729. Conference Name: IEEE/ASME Transactions on Mechatronics.

Rehman, Y., Uddin, H.M.A., Siddique, T.H.M., Haris, Jafri, S.R.U.N., and Ahmed, A. (2019). Comparison of camera and laser scanner based 3d point cloud. In *2019 4th International Conference on Emerging Trends in Engineering, Sciences and Technology (ICEEST)*, 1–5. doi:10.1109/ICEEST48626.2019.8981708.

Reyes-Garcia, M., Sepulveda-Valdez, C., Sergiyenko, O., Rivas-López, M., Rodríguez-Quiñonez, J.C., Flores-Fuentes, W., Hernandez-Balbuena, D., Nieto-Hipolito, J.I., Murrieta-Rico, F.N., Lindner, L., and Ivanov, M. (2020). Digital Control Theory Application and Signal Processing in a Laser Scanning System Applied for Mobile Robotics. In *Control and Signal Processing Applications for Mobile and Aerial Robotic Systems*. doi:10.4018/978-1-5225-9924-1.ch006. ISBN: 9781522599241 Pages: 215-265 Publisher: IGI Global.

Richardson, J., Moskal, M., and Bakker, J. (2014). Terrestrial Laser Scanning for Vegetation Sampling. *Sensors*, 14, 20304–20319. Publisher: MDPI.

Rivera-Castillo, J., Flores-Fuentes, W., Rivas-López, M., Sergiyenko, O., Gonzalez-Navarro, F.F., Rodríguez-Quiñonez, Julio C.and Hernández-Balbuena, D., Lindner, L., and Básaca-Preciado, L.C. (2016). Experimental image and range scanner datasets fusion in SHM for displacement detection. *Structural Control and Health Monitoring*, 1–17. Publisher: Wiley.

Rodriguez-Quinonez, J.C., Sergiyenko, O., Gonzalez-Navarro, F.F., Basaca-Preciado, L., and Tyrsa, V. (2013). Surface recognition improvement in 3D medical laser scanner using Levenberg–Marquardt method. *Signal Processing*, 93(2), 378–386. doi: 10.1016/j.sigpro.2012.07.001.

Rodríguez-Quiñonez, J.C., Sergiyenko, O.Y., Preciado, L.C.B., Tyrsa, V.V., Gurko, A.G., Podrygalo, M.A., Lopez, M.R., and Balbuena, D.H. (2014). Optical monitoring of scoliosis by 3D medical laser scanner. *Optics and Lasers in Engineering*, 54, 175–186. doi: 10.1016/j.optlaseng.2013.07.026.

Shao, X., Chen, X., Yu, X., Hu, Y., Liu, L., Shi, F., Shao, W., and Mo, J. (2019). Nondestructive Measurement of Conformal Coating Thickness on Printed Circuit Board With Ultra-High Resolution Optical Coherence Tomography. *IEEE Access*, 7, 18138–18145. doi:10.1109/ACCESS.2019.2896622. Conference Name: IEEE Access.

Stulgis, A., Ambroziak, L., Kondratiuk, M., and Nikonowicz, A. (2018). Simple sense and avoid system for unmanned aerial vehicles. volume 2029. doi: 10.1063/1.5066533. Cited By 0.

Zhang, J. and Singh, S. (2017). Low-drift and real-time lidar odometry and mapping. *Autonomous Robots*, 41(2), 401–416. doi:10.1007/s10514-016-9548-2. URL `https://doi.org/10.1007/s10514-016-9548-2`.

Zywanowski, K., Banaszczyk, A., and Nowicki, M. (2020). Comparison of camera-based and 3d lidar-based place recognition across weather conditions. 886–891. doi: 10.1109/ICARCV50220.2020.9305429. Cited By 0.

ISSN en trámite

Implementación hardware de filtros FIR de retraso fraccionario con valor ajustable en línea

Dariel Cano González*, Javier Diaz-Carmona*, Agustín Ramírez Agundis*, Alejandro Espinosa-Calderón, Alfredo Padilla Medina*, Juan Prado-Olivarez***

**Depto. Ing. Electrónica, Tecnológico Nacional de México en Celaya, Ave Tecnológico y G. Cubas s/n, Celaya GTO MEX (correspoding author e-mail: javier.diaz@ itcelaya.edu.mx).*
***Centro Regional de Optimización y Desarrollo de Equipos (CRODE), Tecnológico Nacional de México, Diego Arenas 901, Celaya GTO MEX*

Abstract: There are several digital applications where an online update fractional delay value is required. A Factional Delay Filter (FDF) is designed to achieve such task. Current FIR FDF design methods are based on two main approaches: time or frequency domain design. FIR FDF designed by time-based methods are characterized by a small passband frequency and wide passband FIR FDFs are achieved by frequency-based methods. A frequency-based FIR FDF design method and a proposed hardware implementation are described in this paper. A modified Farrow structure is employed, where the subfilters coefficients are obtained through a minimax frequency optimization. The structure hardware is implemented on the FPGA Zybo z010 board, where a distributed arithmetic structure is proposed. In order to validate the described structure, one FIR FDF example is presented. The FPGA-implemented FIR FDF frequency responses (magnitude and group delay) are analyzed and compared with the obtained ones through Matlab simulation. According to the obtained results the described FPGA-implemented FIR FDF fulfills the design specifications with an online fractional delay update.

Keywords: Digital Signal Processing, Fractional Delay FIR Filters, Farrow Structure, Frequency optimization, Distributed Arithmetic, Hardware implementation.

En muchas aplicaciones de procesamiento de señal digital, existe la necesidad de un retraso que sea una fracción del periodo de muestreo. Además, a menudo se desea que el valor del retraso sea ajustable o variable durante el cálculo de estas aplicaciones. Algunas de estas aplicaciones son conversión de frecuencias de muestreo arbitrarias, cancelación de eco, estimación de retraso de tiempo, ajuste de tiempo en receptores totalmente digitales, modelado de instrumentos musicales y codificación y síntesis de voz (Jiang and Yujun, 2010), (Laakso *et al.*, 1996), (Li *et al.*, 2018).

Un filtro de retraso fraccionario (FDF, de sus siglas en inglés) tiene como función principal retrasar la señal de entrada una fracción del tiempo del período de muestreo. Para lograr dicha función el filtro debe cumplir dos especificaciones principales en dominio de la frecuencia. La respuesta en frecuencia de su magnitud debe tener un comportamiento de pasa todo en un amplio rango de frecuencia, así como la respuesta en frecuencia de la fase debe ser lineal con una pendiente fraccionaria fija a través del ancho de banda.

Existen dos enfoques de diseño de FDF: diseño en el dominio del tiempo y diseño en el dominio de la frecuencia. El diseño en el dominio del tiempo tiene una pequeña flexibilidad para cumplir con las especificaciones del dominio de frecuencia, pues solo se cuenta con un parámetro de diseño que es el orden del polinomio y el ancho de banda resultante es un tanto limitado. Por otro lado, los métodos de dominio de frecuencia se basan en el proceso de optimización en frecuencia. Para este tipo de diseño se cuenta con la posibilidad de tener un mayor número de parámetros, como son el orden del polinomio L, el orden de los subfiltros N y la frecuencia de paso ω_p.

Muchos autores han enfocado el diseño de FDF en el dominio del tiempo, fundamentalmente haciendo uso de las fórmulas de Interpolación de Lagrange (Goswami, Upadhyay and Rawat, 2020), (Jing Xu and Yu, 2010), (Välimäki and Haghparast, 2007), (Jovanovic-Dolecek and Diaz-Carmona, 2002). De igual manera existen propuestas de obtención de los coeficientes del filtro FDF en el dominio de la frecuencia, empleando métodos de optimización (mínimos cuadrados ponderados y minimax) (rez-Conejo *et al.*, 2010), (Shyu *et al.*, 2008), (Díaz-Carmona, Jovanovic-Dolecek and Ramírez-Agundis, 2010), (Huang *et al.*, 2018). La flexibilidad en cuanto a parámetros de diseño de los métodos del dominio de la frecuencia hace que sea mucho más factible el fijar tanto el ancho de banda, como el orden del polinomio y de los subfiltros.

ISSN en trámite

Un resultado importante de los métodos diseñados en el dominio de frecuencia es una estructura de implementación altamente eficiente llamada estructura Farrow (Farrow, 1988), que permite la actualización en línea del valor fraccionario deseado (Diaz-Carmona and Jovanovic Dolecek, 2011). Tanto la estructura Farrow como la estructura Farrow modificada (Vesma and Saramaki, 1996) constituyen un enfoque eficiente para el diseño e implementación de este tipo de filtros, debido a su característica de actualización del valor de retraso fraccionario en línea. Ambas estructuras poseen un número equivalente a $M + 1$ subfiltros FIR ($C_m(z)$, $m \in [0, M]$), cada uno de orden N_{FD} y un valor de retraso γ, donde $\gamma = \rho$ para la estructura Farrow y $\gamma = 2\rho - 1$ para la estructura Farrow modificada, siendo ρ el valor de retraso requerido. Los subfiltros tienen valores no simétricos para la estructura original, y simétricos para la modificada.

La implementación de filtros digitales se puede realizar en FPGA (Field Programmable Gate Array) (Ramirez-Conejo, Diaz-Carmona, Ramirez-Agundis, *et al.*, 2010), (Sangaiah and Nagvajara, 2012), (Dai *et al.*, 2020). La elección de la plataforma depende en gran medida de los recursos con los que cuenta cada uno de los dispositivos, fundamentalmente en lo referente a la capacidad de almacenamiento (memoria), la velocidad, costo, portabilidad y procesamiento.

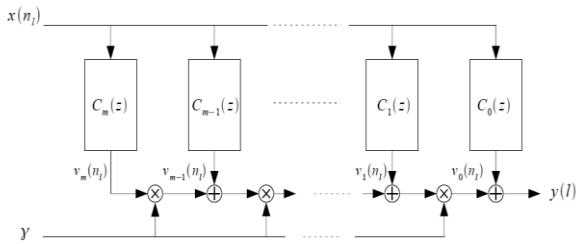


Fig. 1. Estructura Farrow.

En este artículo se describe la implementación en hardware reconfigurable de FIR FDF con valor ajustable en línea haciendo uso de la estructura Farrow modificada a partir de un método de diseño existente en el dominio de la frecuencia por medio de optimización *minimax*. La implementación de los coeficientes de los subfiltros en el FPGA se realiza en formato punto fijo y se emplea la técnica de aritmética distribuida como herramienta para el ahorro de recursos como multiplicadores dentro de cada subfiltro. Se describen las técnicas utilizadas para su implementación y se presentan los resultados obtenidos de la implementación FPGA mediante ejemplos y su comparación con el diseño en Matlab.

En la siguiente sección se describen los filtros de retraso fraccionario basados en la estructura Farrow. La tercera sección presenta el método de diseño de los subfiltros de la estructura FDF. La descripción de la metodología empleada en la implementación hardware en el FPGA se muestra en la cuarta sección. En la quinta sección se analizan los resultados obtenidos del diseño propuesto y en última sección se presentan las conclusiones.

2. FILTROS DE RETRASO FRACCIONARIO FIR BASADOS EN LA ESTRUCTURA FARROW

La función de sistema de un FDF ideal está dada por:

$$H_{id}(z,\rho) = z^{-D}, \tag{1}$$

donde D es el valor de retraso definido como $D = D_{\text{fix}} + \rho$ y $D_{fix} = NFD/2\text{-}1$, siendo ρ el valor de retraso fraccionario variable. Con N_{FD} como orden del filtro FIR FDF. La respuesta ideal en frecuencia de un filtro FDF está definida como:

$$H_{id}(e^{j\omega},\rho) = e^{-j\omega D}, |\omega| \le \pi, \tag{2}$$

donde $\omega = 2\pi f$ es la frecuencia angular. La respuesta en frecuencia del filtro FDF ideal tiene una respuesta de magnitud:

$$\left|H_{id}(e^{j\omega},\rho)\right| = 1, |\omega| \le \pi. \tag{3}$$

El objetivo principal de todos los métodos de diseño FDF existentes, basados en un enfoque de diseño de frecuencia, es obtener los coeficientes de filtro FDF mediante la aproximación a la respuesta de frecuencia ideal.

El enfoque de diseño basado en polinomios da como resultado la estructura de Farrow. La relación entre esta estructura y el modelo híbrido analógico digital (Ramstad, 1984), facilita el uso de polinomios en la implementación. Para un filtro interpolador basado en polinomios la respuesta al impulso $h_a(n)$ se expresa como:

$$h_a(n) = \sum_{m=0}^{M} c_m(n)\rho^m, \tag{4}$$

con $n = -N_{FD}/2, -N_{FD}/2 + 1, \ldots, N_{FD}/2 - 1$. Los $c_m(n)$ son los coeficientes polinómicos desconocidos y M es el orden de los polinomios.

Esta estructura es altamente eficiente ya que está compuesta de una conexión paralela de $M + 1$ filtros fijos, que tiene la capacidad de actualización en línea su valor de retraso fraccionario. Esta estructura permite que el problema de diseño del filtro FIR FDF se enfoque en obtener cada uno de los filtros fijos de rama $c_m(n)$ y la salida de la estructura de FDF se calcula a partir del retraso fraccionario deseado en línea dado por ρ. Lo anterior permite la implementación de filtros FIR FDF de retraso fraccionario variable, filtro VFD (Variable Fractional Delay filter).

Para reducir el número de operaciones aritméticas por muestra de salida en la estructura Farrow, se requiere una reducción en el orden polinómico o en la longitud de los subfiltros. Se han

ISSN en trámite

propuesto algunos enfoques de diseño para estructuras de implementación eficientes para reducir el número de operaciones aritméticas en un FDF de banda ancha. Una estructura Farrow modificada, reportada en (Vesma and Saramaki, 1996) es una extensión del método de interpolación basado en polinomios.

La estructura Farrow modificada utiliza la variable de interpolación $\gamma = 2\rho - 1$ en lugar de $\gamma = \rho$ en la ecuación:

$$h_a(n) = \sum_{m=0}^{M} c_m'(n)(2\rho - 1)^m , \qquad (5)$$

los coeficientes $c_m'(n)$ de los subfiltros $C_m(z)$ presentan simetría par o impar, es decir, son filtros FIR de fase lineal tipo II o tipo IV. Dicha simetría reduce a la mitad el número de multiplicaciones en cada subfiltro.

La estructura Farrow y Farrow modificada presentan un retraso fijo D_{fix} que depende de la longitud N_{FD} de los subfiltros. Con un valor par de N_{FD} se obtiene un retraso fraccionario $\rho \in [0,1]$, y con un valor impar se obtiene $\rho \in [-0.5,0.5]$.

Dentro de las principales características de las estructuras Farrow y Farrow modificada se pueden mencionar: a) contienen $M + 1$ subfiltros FIR de longitud N_{FD}, b) los coeficientes de los subfiltros son fijos, c) el único parámetro de control es función del retraso fraccionario ρ, d) la resolución del retraso está limitada por la precisión de la aritmética en lugar del tamaño de la memoria para los coeficientes.

3. METODO DE DISEÑO EMPLEADO EN LA IMPLEMENTACION

El método para obtener los coeficientes del FDF implementado se basa en una optimización en el dominio de la frecuencia, el cual se describe a continuación.

En (Vesma *et al.*, 1998) los subfiltros $C_m(z)$ $0 \le m \le M$ en la estructura original de Farrow son la aproximación de Taylor de orden M de la señal de entrada interpolada de tiempo continuo. En la estructura Farrow modificada, los subfiltros $C_m(z)$ son filtros de fase lineal tipo II para m par y tipo IV para m impar.

Del mismo modo, es posible aproximar la señal de entrada a través de la serie Taylor en una estructura Farrow modificada para cada diferenciador de orden m, la cual viene dada por la siguiente expresión:

$$D(m, e^{j\omega}) = e^{j\omega(N_{FD}-1)/2} \frac{-j\omega^m}{2^m m!}, \qquad (6)$$

donde $D(m,e^{j\omega})$ es la respuesta en frecuencia del subfiltro ideal $C_m(z)$ de la estructura Farrow modificada. Los parámetros de diseño de entrada para la ecuación (6) son: la longitud del filtro N_{FD}, el orden polinómico M y la frecuencia de paso deseada ω_p ($\omega \in [0, \omega_p]$). La respuesta en frecuencia para cada subfiltro $C_m(z)$ a diseñar es:

$$C_m(e^{j\omega}) = \sum_{n=0}^{N_{FD}} c_m(n) e^{-j\omega n} , \qquad (7)$$

donde $c_m(n)$ son los coeficientes de los subfiltros $C_m(z)$. Estos se calculan de tal manera que la siguiente función de error se minimiza en un sentido de mínimos cuadrados a través del rango de frecuencia $[0, \omega_p]$.

$$e_m(\omega) = \left| \sum_{n=0}^{N_{FD}} \left[c_m\left(\frac{N_{FD}}{2} - n\right) \right] \varphi(m,n,\omega) - \frac{(-j\omega)^m}{2^m m!} \right| , \qquad (8)$$

donde

$$\varphi(m,n,\omega) = 2\cos[(n+\frac{1}{2})\omega] \qquad m \text{ par}$$

$$\varphi(m,n,\omega) = 2sen[(n+\frac{1}{2})\omega] \qquad m \text{ impar.}$$

Se tiene entonces que la función objetivo a minimizar es:

$$E_m = \int_0^{\omega_p} [\sum_{n=0}^{N_{FD}/2} c_m(N_{FD}/2 - 1)\varphi(m,n,\omega) - \frac{(-j\omega)^m}{2^m m!}] d\omega \qquad (9)$$

En (Díaz-Carmona, Jovanovic-Dolecek and Ramírez-Agundis, 2010), (Ramirez-Conejo, Diaz-Carmona, Delgado-Frias, *et al.*, 2010), (Hermanowicz, 2015) se emplean las ecuaciones anteriores para llegar a la aproximación inicial de los coeficientes de los subfiltros FIR, haciendo uso de la estructura Farrow en su diseño.

El método de diseño empleado en este artículo para realizar primeramente su simulación en Matlab y posterior implementación en FPGA, se basa fundamentalmente en la estructura empleada en (Vesma and Saramaki, 1996). Para la obtención inicial de los coeficientes, se consultó lo planteado en (Díaz-Carmona, Jovanovic-Dolecek and Ramírez-Agundis, 2010), (Ramirez-Conejo, Diaz-Carmona, Delgado-Frias, *et al.*, 2010)-. Con el objetivo de lograr una aproximación de los coeficientes, se realizó una optimización minimax, haciendo uso de la función *fminimax* disponible en Matlab.

4. IMPLEMENTACION HARDWARE DE LA ESTRUCTURA FARROW

4.1 Aritmética distribuida en subfiltros.

Se utilizó la técnica de aritmética distribuida en la implementación de cada uno de los subfiltros FIR del FDF, con lo cual se emplearon solo memorias o LUTs, acumuladores de retardos y escalado. Dada una señal de entrada x de B bits valores de los coeficientes a, la salida y está dada mediante aritmética distribuida como:

ISSN en trámite

$$y = \sum_{k=0}^{N-1} a_k [-b_{k0} + \sum_{n=1}^{B-1} b_{kn} 2^{-n}], \quad (10)$$

donde $b_{k,0}$ es el bit más significativo y $b_{k,B-1}$ el menos significativo. Estos valores de bits forman direcciones partir de un barrido de los B bits en cada muestra de entrada. La dirección permite el acceso a los 2^N valores de las sumatorias de los coeficientes almacenados en memorias ROM o en LUTs, y de esta forma se realizan las operaciones de desplazamiento y acumulación, hasta llegar al último bit de la primera muestra. Esta operación se realiza para las N muestras de entrada y cada vez que se arribe al último valor de B se obtienen cada una de las muestras de salida.

En el diseño FDF implementado se consideró que los subfiltros son de *28* coeficientes. Lo cual implicaría una memoria de 2^{28} elementos de sumatoria de coeficientes. Con la finalidad de reducir esta cifra, se propone que los *28* bits de direcciones se implementen en 4 grupos de 7 bits, de esta forma se emplean 4 memorias ROM de 2^7 elementos. Una vez que se obtiene cada uno de los valores de estas cuatro memorias, se suman nuevamente y se procede a desplazar y acumular, tal y como se hace para una estructura de una sola memoria. En la Fig. 2 se presenta la estructura implementada utilizando aritmética distribuida.

4.2 Implementación del filtro

La implementación en FPGA se realizó en tarjeta Zybo Z010 (XC7Z010-1CLG400C), perteneciente a la familia Zynq 7000. Para ello se utilizaron los coeficientes de los subfiltros del FIR FDF obtenidos con el método de diseño descrito en sección 3. El diseño y síntesis del filtro se realizó mediante la herramienta de Xilinx Vivado 2018.1. En la Fig. 3 se muestra la organización de la implementación hardware realizada, donde las funciones de los bloques son las siguientes:

Receptor de la señal de entrada: Recibe de manera serial desde la PC bajo protocolo RS-232 los datos de entrada al filtro y los almacena en una memoria RAM.
Transmisor de las muestras filtradas: Se encarga de transmitir por puerto serie a la PC cada una de las muestras filtradas de la señal de entrada.
Filtrado FDF: es el bloque fundamental del diseño, se encarga de realizar el retraso fraccionario a la señal de entrada, en donde el valor de retraso es definido en línea. La salida del filtro es almacenada en otra memoria RAM.

Los subfiltros FIR son implementados mediante aritmética distribuida. Para ello, se emplea el paralelismo que ofrece esta técnica, pues se dividen en grupos de memorias ROM las distintas sumatorias de los coeficientes, en dependencia del número de coeficientes del filtro empleado N, haciendo subgrupo de direcciones correspondientes a las 2^N direcciones posibles (Fig. 2). De este modo, los subgrupos de bits aportan la dirección a buscar en cada una de las memorias y el resultado de cada una se suma en conjunto, para de esta forma obtener el

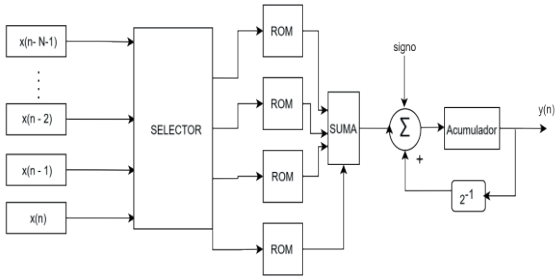


Fig. 2. Estructura de aritmética distribuida propuesta.

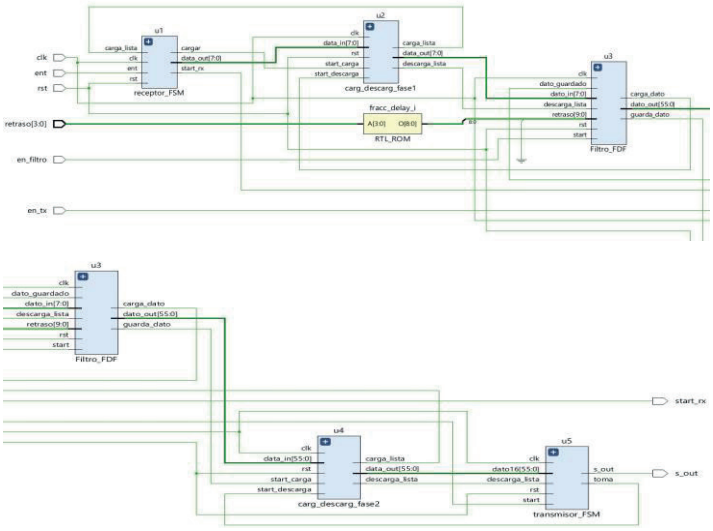


Fig. 3. Diseño en Vivado 2018.1

valor a desplazar y posteriormente acumular. El resto de los bloques corresponden a la estructura Farrow modificada, empleándose un total de 4 multiplicadores y 4 sumadores, además de los antes mencionados registros, contadores y bloques de control.

Los coeficientes de los subfiltros se representan en punto fijo con 15 bits para valor fraccionario y un bit de signo (Q15 signado). El retraso fraccionario se representa 9 bits para el valor fraccionario y 1 bit para el signo (Q9 signado). La salida del filtro se representa en el formato Q4,51 signado (muestras de 56 bits). La frecuencia de reloj utilizada es de 125 MHz. La transmisión de datos serial entre tarjeta y PC se realizó a una velocidad de 19 200 bps.

5. RESULTADOS

Se diseñó un filtro FIR FDF con una frecuencia de paso de $\omega_p = 0.9\pi$, un orden de polinomio $M = 4$ y un orden de subfiltros de $N = 27$ (5 subfiltros FIR con 28 coeficientes cada uno). Una vez obtenidos los coeficientes en Matlab, para los cuales se obtuvo un error máximo de retraso de fase = 0.00091418 y un error máximo de magnitud = 0.0058427, se simuló el comportamiento mediante Simulink, en la Fig. 4 se muestra el diagrama a bloques de la estructura Farrow modificada.

ISSN en trámite

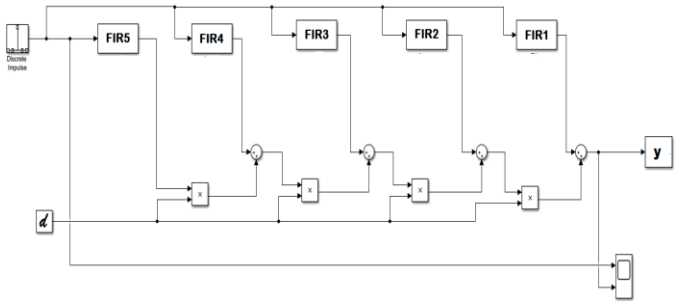


Fig. 4. Diagrama en bloques del filtro FDF en Simulink.

La implementación en el FPGA utilizó los recursos mostrados en Tabla 1. Los resultados de magnitud y atraso de grupo en dominio de frecuencia del FDF implementado en FPGA para una resolución de retraso fraccionario de 0.1 se muestran en la Fig. 5.

Tabla 1. Recursos utilizados en la implementación.

Recurso	Utilización	Disponible	%
LUT	1560	17600	8.86
Flip Flop	1626	35200	4.62
BRAM	11.50	60	19.17
DSP	7	80	8.75
IO	11	100	11.00
BUFG	1	32	3.13

Como se puede apreciar, el rizado presente en la respuesta en magnitud está en el rango del error de magnitud obtenido en el diseño, lo que permite corroborar que los resultados de implementación son correctos. El ancho de banda logrado es de $\omega_p = 0.9\pi$ para cada uno de los retrasos, lo cual corresponde al valor establecido en la optimización en el método de diseño.

El error máximo de magnitud y atraso de grupo con la respuesta ideal para los diseños es 0.0058294 y 0.0009081 para la simulación en Simulink y 0.0058716 y 0.0017012 para la implementación FPGA, respectivamente. Por tanto, la diferencia entre los dos diseños es del orden cien milésismas, lo que permite afirmar que la implementación en el FPGA cumple con los parámetros obtenidos en la simulación.

De igual manera en la Fig. 6 se muestran los resultados obtenidos del FIR FDF implementado en el FPGA para una resolución de retraso fraccionarios de 0.05. Como puede observarse se tiene un rizo mayor en el atraso de grupo para frecuencias altas, pero no se traslapan los valores. Para este caso se tiene un error máximo de magnitud y atraso de grupo con la respuesta ideal de 0.0058294 y 0.00091128 para Simulink y 0.0058716 y 0.0018631 para FPGA, respectivamente.

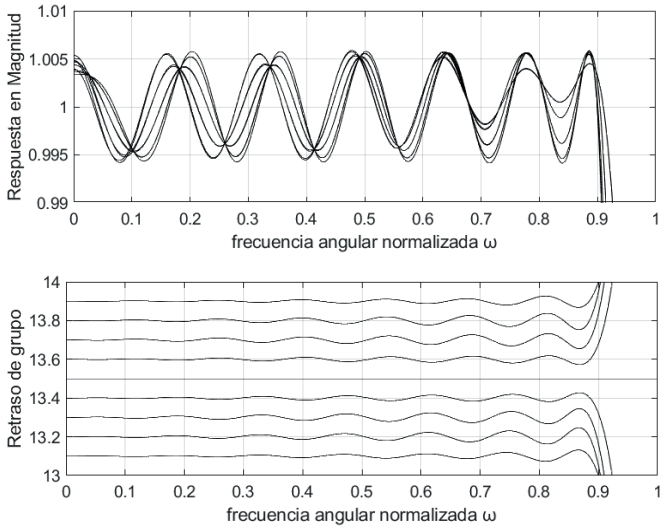


Fig. 5. Magnitud y atraso de grupo para resolución de 0.1.

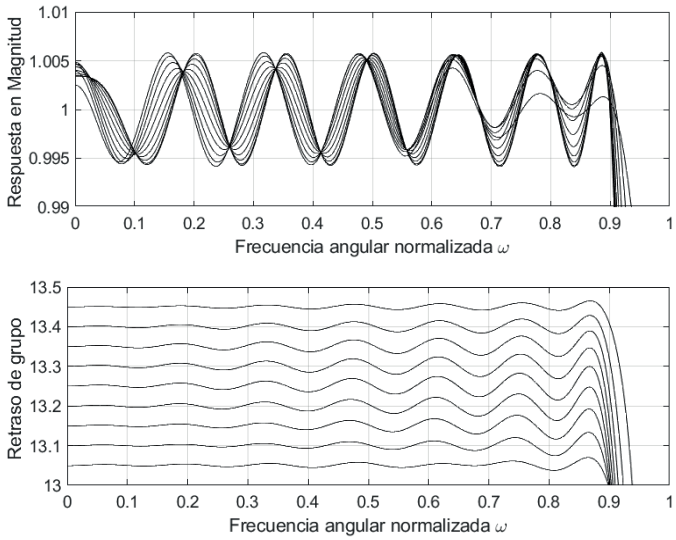


Fig. 6. Magnitud y atraso de grupo para resolución de 0.05.

6. CONCLUSIONES

El diseño basado en dominio de frecuencia y una propuesta de implementación en FPGA de una estructura Farrow modificada para filtros FIR FDF se presenta en este artículo. El diseño se logra mediante optimización minimax y su implementación en la tarjeta Zybo z010 proponiendo una estructura de aritmética distribuida para los subfiltros. Se presentan resultados para un FIR FDF en particular con resoluciones de valor fraccionario de 0.1 y 0.05. Como resultado se obtuvo un FIR FDF con un amplio ancho de banda y rizos tanto en magnitud como en atraso de grupo con rango de errores tolerables. Como era de esperarse el error máximo con respecto a la respuesta ideal del FIR FDF implementado en FPGA es mayor con respecto a la simulación en Matlab. De acuerdo con análisis de dichos errores se puede concluir que el FIR FDF implementado permite lograr retrasos fraccionarios de la señal de entrada con

ISSN en trámite

actualización en línea cubriendo un ancho de banda amplio ($\omega_p = 0.9\pi$). Este diseño establece las bases para utilizar la propuesta en aplicaciones específicas de acuerdo a los recursos disponibles en la tarjeta. Un trabajo a futuro es utilizar dicha estructura en aplicaciones FIR FDF en señales de audio.

REFERENCES

Dai, X. *et al.* (2020) 'FPGA realization of hardware-flexible parallel structure FIR filters using combined systolic arrays', *I2MTC 2020 - International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Proceedings*, (2), pp. 1–5. doi: 10.1109/I2MTC43012.2020.9129340.

Díaz-Carmona, J., Jovanovic-Dolecek, G. and Ramírez-Agundis, A. (2010) 'Frequency-based optimization design for fractional delay FIR filters with software-defined radio applications', *International Journal of Digital Multimedia Broadcasting*, 2010. doi: 10.1155/2010/194306.

Diaz-Carmona, J. and Jovanovic Dolecek, G. (2011) 'Fractional delay digital filters', in Michalowski, T. (ed.) *Applications of Matlab in Science and Engineering*. INTECH Open Access, pp. 247–272.

Farrow, C. W. (1988) 'A Continuously Variable Digital Delay Element', *Proc. IEEE Int. Symp. Circuits Syst.*, 3, pp. 2641–2645.

Goswami, O. P., Upadhyay, D. K. and Rawat, T. K. (2020) 'Fractional Delay Approximation Based Design of Low-order Digital Differentiator', *2020 IEEE 5th International Conference on Computing Communication and Automation, ICCCA 2020*, pp. 601–604. doi: 10.1109/ICCCA49541.2020.9250917.

Hermanowicz, E. (2015) 'On designing a wideband fractional delay filter using the farrow approach', *European Signal Processing Conference*, 06-10-Sept, pp. 961–964.

Huang, X. *et al.* (2018) 'Closed-Form Design of Variable Fractional-Delay FIR Filters With Low or Middle Cutoff Frequencies', *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 65(2), pp. 628–637. doi: 10.1109/TCSI.2017.2733554.

Jiang, X. and Yujun, B. (2010) 'Musical signal analysis using fractional-delay inverse comb filters', *ICCASM 2010 : 2010 International Conference on Computer Application and System Modeling : proceedings*, pp. 22–24.

Jing Xu, W. and Yu, Y. J. (2010) 'Polynomial implementation structure for lagrange-type variable fractional delay filters', *ISCAS 2010 - 2010 IEEE International Symposium on Circuits and Systems: Nano-Bio Circuit Fabrics and Systems*, 0, pp. 733–736. doi: 10.1109/ISCAS.2010.5537474.

Jovanovic-Dolecek, G. and Diaz-Carmona, J. (2002) *One method for FIR fractional delay filter design*, *ICCDCS 2002 - 4th IEEE International Caracas Conference on Devices, Circuits and Systems*. doi: 10.1109/ICCDCS.2002.1004022.

Laakso, T. I. *et al.* (1996) 'Splitting the unit delay', *IEEE Signal Processing Magazine*, 13(1), pp. 30–60. doi: 10.1109/79.482137.

Li, C. *et al.* (2018) 'Digital self-interference cancellation with variable fractional delay FIR filter for full-duplex radios', *IEEE Communications Letters*, 22(5). doi: 10.1109/LCOMM.2018.2810270.

Ramirez-Conejo, G., Diaz-Carmona, J., Delgado-Frias, *et al.* (2010) 'Adjustable Fractional Delay FIR Filters Design Using Multirate and Frequency Optimization Techniques', *International IEEE Symposium CONCAPAN 2010*, pp. 1–5.

Ramirez-Conejo, G., Diaz-Carmona, J., Ramirez-Agundis, A., *et al.* (2010) 'FPGA implementation of adjustable wideband fractional delay FIR filters', *Proceedings - 2010 International Conference on Reconfigurable Computing and FPGAs, ReConFig 2010*, pp. 406–411. doi: 10.1109/ReConFig.2010.68.

Ramstad, T. A. (1984) 'Digital Methods for Conversion Between Arbitrary Sampling Frequencies', *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 32(3), pp. 577–591. doi: 10.1109/TASSP.1984.1164362.

Sangaiah, K. and Nagvajara, P. (2012) 'Variable fractional digital delay filter on reconfigurable hardware', in *Midwest Symposium on Circuits and Systems*, pp. 430–433. doi: 10.1109/MWSCAS.2012.6292049.

Shyu, J. J. *et al.* (2008) 'Minimax design of variable fractional-delay FIR digital filters by iterative weighted least-squares approach', *IEEE Signal Processing Letters*, 15(4), pp. 693–696. doi: 10.1109/LSP.2008.2005049.

Välimäki, V. and Haghparast, A. (2007) 'Fractional delay filter design based on truncated Lagrange interpolation', *IEEE Signal Processing Letters*, 14(11), pp. 816–819. doi: 10.1109/LSP.2007.898856.

Vesma, J. *et al.* (1998) 'Design of polynomial interpolation filters based on taylor series', *European Signal Processing Conference*, 1998-Janua.

Vesma, J. and Saramaki, T. (1996) 'Interpolation filters with arbitrary frequency response for all-digital receivers', *Proceedings - IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 2, pp. 568–571. doi: 10.1109/iscas.1996.541788.

ISSN en trámite

Síntesis basada en Filtros Butterworth de Osciladores Caóticos con Derivadas de Orden Arbitrario ⋆

L.C. Lujano-Hernández, J.M. Munoz-Pacheco, L.A. Sánchez-Gaspariano

Facultad de Ciencias de la Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla 72000, México (e-mail: luis.lujanoh@alumno.buap.mx).

Resumen: En este trabajo se presenta la síntesis de un integrador de orden fraccionario, usando el método de filtro Butterworth. A partir de una función de transferencia de primer orden que aproxima al integrador fraccionario desde la definición de Riemann-Liouville obtenemos filtros de primer orden. Para corroborar el método propuesto, analizamos los integradores de orden fraccionario con ordenes desde α =0.1 hasta α =0.95 en el dominio de la frecuencia. Se encontró que la pendiente de la magnitud se aproxima adecuadamente a la ideal. Además, a diferencia con las técnicas tradicionales para el diseño de integradores de orden fraccionario, el método propuesto converge en su mayoría a valores comerciales de los elementos del circuito reduciendo la complejidad de la implementación física. Finalmente, aplicamos nuestra técnica al diseño de un sistema caótico de orden fraccionario que presenta un atractor con múltiples enrrollamientos. Los resultados obtenidos están en una corecta concordancia con la teoría relacionada.

Keywords: Butterworth, Caótico, Chebyshev, Fraccionario, Integrador, Oscilador.

1. INTRODUCCIÓN

El cálculo fraccionario surge a partir del cálculo de orden entero, pero ha sido desarrollado con mayor interés en las últimas décadas (Machado et al., 2011; David et al., 2011; Tavazoei, 2020; Sun et al., 2011, 2018). Desde el inicio de la teoría del cálculo diferencial e integral de orden entero, matemáticos como Euler y Leibniz desarrollaron sus ideas sobre el cálculo de derivadas e integrales de orden no entero. En 1812 Laplace definió una derivada fraccionaria con el uso de una integral. Desde el nacimiento del cálculo de orden fraccionario han surgido varias definiciones de derivación e integración de orden no entero, esto se debe a que el concepto de cálculo fraccionario ha sido objeto de varios enfoques. Dentro de las definiciones más importantes se encuentra la definición de Riemann-Liouville, en la ecuación (1) se muestra la definición que aproxima al integrador de orden fraccionario. (Pacheco et al., 2021).

$$ {}_aD_t^{\alpha} f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \left(\frac{d}{dt}\right)^n \int_a^t \frac{f(t)^{\alpha-n+1}}{t-\tau} d\tau \qquad (1) $$

El diseño de integradores y derivadores de orden fraccionario se realizan en el dominio de la frecuencia. Hay varias técnicas que buscan la racionalización del operador fraccionario α como el método Charef, el método de Carlson, el método de Oustaloup, entre otros (Charef et al., 1992; Charef, 2006; Montero et al., 2017; Kapoulea et al., 2018; Pacheco et al., 2021). El método de Charef tiene una mejor relación entre complejidad y precisión al aproximar la pendiente del integrador de orden fraccionario $\frac{1}{s^{\alpha}}$ con un número de pendientes de -20 dB/Decada conectadas en zigzag con una pendiente de 0 dB/Decada (Charef et al., 1992; Charef, 2006; Serrano, 2017). Con este método se obtiene la precisión deseada y que dependerá del orden de la función de transferencia que aproxima al integrador fraccionario. El problema de estas realizaciones es su implementación física, puesto que los valores de los componentes que forman parte de la red pasiva son de valores no comerciales, al aproximar estos valores desvían la pendiente y agrega un error al orden en el que se diseña. (Bertsias et al., 2019; Mahata et al., 2020; Kapoulea et al., 2018; Pacheco et al., 2021).

En este trabajo nos enfocamos en abordar una función de transferencia de primer orden desde la definición de Riemann-Liouville, para sintetizarla usando el método de Butterworth. Posteriormente, la función de transferencia se caracteriza en el dominio de la frecuencia para identificar su rendimiento y tasa de error en donde la pendiente

⋆ El becario Luis Carlos Lujano Hernández (CVU:1003956) agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo otorgado para la beca de estudios de maestría.

ISSN en trámite

del integrador se determina considerando las tolerancias de elementos comerciales. Finalmente, como ejemplo de aplicación, el integrador fraccionario propuesto se utiliza para diseñar un oscilador caótico de 2-enrrollamientos y 4-enrrollamientos con orden fraccionario $\alpha = 0.9$. Los resultados de simulación en el software de circuitos SPICE confirman el resultado esperado para el oscilador caótico de orden fraccionario demonstrando que el método propuesto es adecuado para la implementación física de osciladores caóticos dado que el 90% de los valores son comerciales.´

2. APRIXIMACIÓN BUTTERWORTH PARA INTEGRADORES DE ORDEN FRACCIONARIO

La función de transferencia de la ecuación (2) es aproximada a partir de la definición de Riemann-Liouville. Es una función de transferencia de primer orden, y no aumenta ni disminuye el orden de la función de transferencia al cambiar el orden α del integrador de orden fraccionario.

$$\frac{1}{s^{\alpha}} = \frac{s+A}{As+1}, \tag{2}$$

donde A depende del orden del integrador fraccionario:

$$A = \frac{1+\alpha}{1-\alpha}. \tag{3}$$

La función de transferencia de la ecuación (2) puede separase en una suma de filtros pasa bajas y pasa altas, como se muestra en la ecuación (4).

$$\frac{1}{s^{\alpha}} = \frac{s}{As+1} + \frac{A}{As+1}. \tag{4}$$

2.1 Filtro Pasa Bajas

En el caso del filtro pasa bajas, se toma el segundo término de la ecuación (4), asociada a una respuesta tipo pasa bajas, para determinar el coeficiente de ganancia. Esto nos ayuda a identificar los requisitos del diseño del filtro pasa bajas con el diagrama de Bode de la función de transferencia con ganancia unitaria. La función de transferencia del filtro pasa bajas se muestra en la ecuación (5).

$$H_{pb}(s) = G_{pb}\frac{1}{As+1}, \tag{5}$$

donde la ganancia del filtro pasa bajas es G_{pb} y se calcula con el factor A, como se muestra en la ecuación (6).

$$G_{pb} = A. \tag{6}$$

Del diagrama de Bode obtenemos los requisitos de diseño, como la frecuencia de corte (ω_p), la frecuencia en la banda de rechazo (ω_s), magnitud en la frecuencia de corte (A_p) y la magnitud en la banda de rechazo (A_s). En la Fig. 1 se muestra el diagrama de Bode del filtro pasa bajas con ganancia unitaria con orden $\alpha = 0.9$, además se muestran los requisitos de diseño en la Tabla 1 para órdenes desde α =0.1 hasta α =0.95.

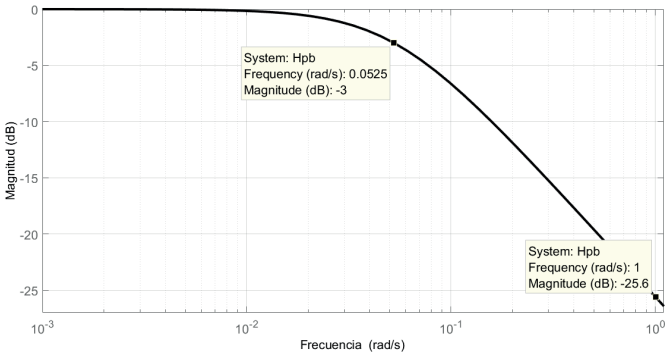


Fig. 1. Gráfica de Bode del filtro pasa bajas con $\alpha = 0.9$.

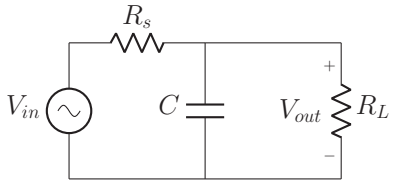


Fig. 2. Circuito pasa bajas Butterworth tipo π.

Para el caso del filtro pasa bajas de orden α =0.9, la función de transferencia se muestra en la ecuación (7). El orden entero n de la función de transferencia Butterworth para los órdenes no enteros α desde 0.1 hasta 0.95 es de $n = 1$.

$$H_{pb}(s) = G_{pb}\frac{1}{19s+1}. \tag{7}$$

La ecuación de diseño (8) del filtro pasa bajas de la Fig. 2 toma en cuenta que los resistores R_s y R_L son del mismo valor y ambos son iguales a R_{pb}.

$$R_{pb} = 2\frac{A}{C}. \tag{8}$$

Con la ecuación (8) se puede proponer un valor de capacitor comercial y ajustar los valores de resistores para diseñar el filtro pasa bajas Butterworth, tomando en cuenta el factor A que depende del orden del integrador fraccionario de la ecuación (3).

La Tabla 2 muestra los valores normalizados de capacitor

Tabla 1. Requisitos de diseño del filtro pasa bajas Butterworth.

α	ω_p (rad/s)	ω_s (rad/s)	A_p (dB)	A_s (dB)
0.1	0.816	1.0	-3.0	-4.00
0.2	0.665	1.0	-3.0	-5.12
0.3	0.538	1.0	-3.0	-6.50
0.4	0.427	1.0	-3.0	-8.10
0.5	0.333	1.0	-3.0	-10.00
0.6	0.249	1.0	-3.0	-12.30
0.7	0.170	1.0	-3.0	-15.20
0.8	0.111	1.0	-3.0	-19.20
0.85	0.081	1.0	-3.0	-21.90
0.9	0.052	1.0	-3.0	-25.60
0.95	0.025	1.0	-3.0	-31.90

ISSN en trámite

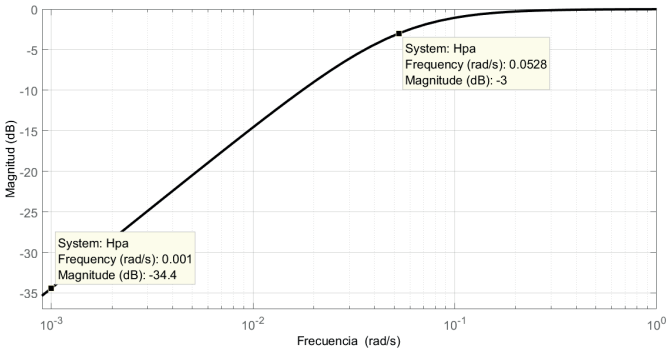


Fig. 3. Gráfica de Bode del filtro pasa altas con $\alpha = 0.9$.

para el circuito pasa bajas Butterworth tipo π, para integradores de orden fraccionario de α =0.1 hasta α =0.95.

Tabla 2. Valores de elementos para el filtro pasa bajas Butterworth tipo π.

α	R_s (Ω)	R_L (Ω)	C (F)
0.1	2.44	2.44	1.0
0.2	3.00	3.00	1.0
0.3	3.71	3.71	1.0
0.4	4.67	4.67	1.0
0.5	6.00	6.00	1.0
0.6	8.00	8.00	1.0
0.7	11.34	11.34	1.0
0.8	18.00	18.00	1.0
0.85	24.68	24.68	1.0
0.9	38.00	38.00	1.0
0.95	78.00	78.00	1.0

2.2 Filtro Pasa Altas

La función de transferencia del filtro pasa altas se muestra en la ecuación (9).

$$H_{pa}(s) = G_{pa}\frac{s}{s+\frac{1}{A}}, \tag{9}$$

donde G_{pa} es la ganancia del filtro pasa altas y es igual a la ecuación (10).

$$G_{pa} = \frac{1}{A}. \tag{10}$$

De la gráfica de Bode del filtro pasa altas podemos encontrar los requisitos de diseño. La Fig. 3 muestra la gráfica de Bode del filtro pasa altas Butterworth del integrador de orden fraccionario de orden α =0.9. Con la gráfica obtenemos la frecuencia de corte, la frecuencia en la banda de rechazo, la magnitud en la frecuencia de corte y la magnitud en la banda de rechazo. La Tabla 3 muestra los requisitos de diseño para el filtro pasa altas Butterworth desde órdenes del integrador fraccionario de α =0.1 hasta α =0.95.

El filtro pasa altas de Butterworth obtenido a partir de los requisitos de diseño para el orden fraccionario de α =0.9 se muestra en la ecuación (11), donde la

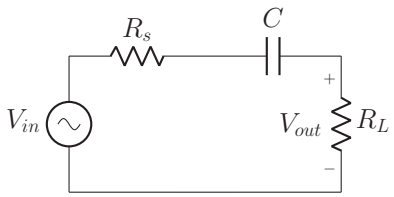


Fig. 4. Circuito Pasa Altas Butterworth tipo T.

función de transferencia es de primer orden. Igual que el caso anterior, se encontró que los órdenes α =0.1 hasta α =0.95, se aproximan mediante un filtro pasa altas de primer orden $n = 1$.

$$H_{pa}(s) = \frac{s}{s+\frac{1}{19}}. \tag{11}$$

Para facilitar el diseño del filtro pasa altas encontramos la ecuación de diseño expresada en la ecuación (12), donde los resistores R_s y R_L son iguales a R_{pa}.

$$R_{pa} = \frac{1}{2}\frac{A}{C}. \tag{12}$$

El factor A depende el orden del integrador fraccionario y se puede calcular desde la ecuación (3). La Tabla 4 muestra los valores normalizados para el filtro pasa altas Butterworth tipo T (Fig. 4) para integradores desde α =0.1 hasta α =0.95.

Tabla 3. Requisitos de diseño del filtro pasa altas Butterworth.

α	ω_p (rad/s)	ω_s (rad/s)	A_p (dB)	A_s (dB)
0.1	0.818	1.0	-3.0	-18.30
0.2	0.667	1.0	-3.0	-16.60
0.3	0.538	1.0	-3.0	-14.80
0.4	0.427	1.0	-3.0	-12.90
0.5	0.333	1.0	-3.0	-10.80
0.6	0.249	1.0	-3.0	-8.58
0.7	0.176	1.0	-3.0	-6.14
0.8	0.111	1.0	-3.0	-20.90
0.85	0.081	1.0	-3.0	-18.20
0.9	0.052	1.0	-3.0	-20.00
0.95	0.025	1.0	-3.0	-28.20

Tabla 4. Valores de elementos para el filtro pasa altas Butterworth tipo T.

α	R_s (Ω)	R_L (Ω)	C (F)
0.1	0.61	0.61	1.0
0.2	0.75	0.75	1.0
0.3	0.93	0.93	1.0
0.4	1.16	1.16	1.0
0.5	1.50	1.50	1.0
0.6	2.00	2.00	1.0
0.7	2.83	2.83	1.0
0.8	4.50	4.50	1.0
0.85	6.16	6.16	1.0
0.9	9.50	9.50	1.0
0.95	19.50	19.50	1.0

ISSN en trámite

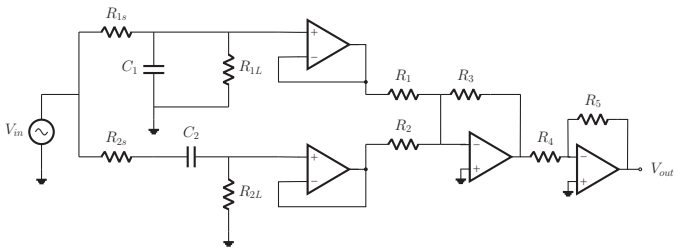


Fig. 5. Integrador de orden fraccionario propuesto para la ecuación (4) usando los filtros Butterworth de la Fig. 2 y Fig. 4.

2.3 Integrador $\frac{1}{s^\alpha}$

El integrador fraccionario se conforma de la suma de las respuestas de un filtro pasa bajas Butterworth y un filtro pasa altas Butterworth como se muestra en la Fig. 5. El sumador inversor también amplifica las respuestas de salida de cada filtro, de tal forma que los resistores R_1, R_2 y R_3 se seleccionan para obtener la ganancia G_{pb} de la ecuación (6) y la ganancia G_{pa} de la ecuación (10). La Tabla 5 muestra las ganancias para el filtro pasa bajas Butterworth y filtro pasa altas Butterworth desde α =0.1 hasta α =0.95.

Tabla 5. Ganancias para los filtros Butterworth pasa bajas y pasa altas.

α	R_1 (Ω)	R_2 (Ω)	R_3 (Ω)	G_{pb}	G_{pa}
0.1	$1e^3$	$1.49e^3$	$1.22e^3$	1.22	0.81
0.2	$1e^3$	$2.25e^3$	$1.50e^3$	1.50	0.66
0.3	$1e^3$	$3.44e^3$	$1.85e^3$	1.85	0.53
0.4	$1e^3$	$5.44e^3$	$2.33e^3$	2.33	0.42
0.5	$1e^3$	$9.00e^3$	$3.00e^3$	3.00	0.33
0.6	$1e^3$	$16.00e^3$	$4.00e^3$	4.00	0.25
0.7	$1e^3$	$32.11e^3$	$5.66e^3$	5.66	0.17
0.8	$1e^3$	$81.00e^3$	$9.00e^3$	9.00	0.11
0.85	$1e^3$	$152.10e^3$	$12.33e^3$	12.33	0.08
0.9	$1e^3$	$361.00e^3$	$19.00e^3$	19.00	0.05
0.95	$1e^3$	$1.52e^6$	$39.00e^3$	39.00	0.02

Posteriormente, se realizó un escalamiento en impedancia con el objetivo de obtener valores de capacitores comerciales en el circuito del integrador fraccionario. La Tabla 6 muestra los valores escalados del circuito del integrador de orden fraccionario de la Fig. 5, mientras que la Fig. 6 muestra el comportamiento del integrador de orden fraccionario en el dominio de la frecuencia con órdenes α =0.1 hasta α =0.95.

Para determinar si los resultados a nivel circuito (Fig. 5) reproducen el comportamiento esperado a nivel teórico comparamos la pendiente obtenida con la ecuación (4) respecto a la pendiente medida con el simulador de circuitos SPICE de la Fig. 6, la cual es el resultado de la respuesta en frecuencia del integrador de orden fraccionario propuesto de la Fig. 5

En la Tabla 7 se muestra el resultado de la comparación. Se observa que el mayor error se presenta en el orden de

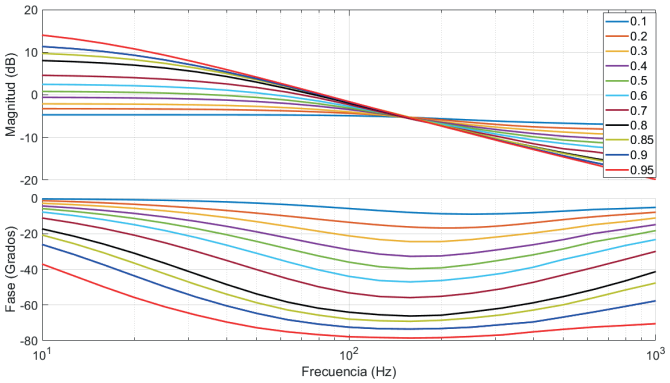


Fig. 6. Respuesta en frecuencia del integrador de orden fraccionario propuesto (Fig. 5) obtenida mediante el simulador de circuitos SPICE.

0.6, siendo de hasta -3.601 dB/Dec. El error tiende a disminuir para órdenes fraccionarios pequeños y grandes, es decir, cuando se aproximan a cero y uno, respectivamente.

Es importante mencionar que la realización física del integrador fraccionario propuesto es factible debido a que los capacitores son de valor comercial. Por otro lado, el valor de los resistores son fácilmente realizables con potenciómetros de presición (ver Tabla 6). Finalmente,

Tabla 6. Valores de resistores y capacitores del integrador fraccionario de la Fig. 5.

α	R_{1s} (Ω)	R_{1L} (Ω)	R_{2s} (Ω)	R_{2L} (Ω)	C_1 (F)	C_2 (F)
0.1	$244e^3$	$244e^3$	$610e^3$	$610e^3$	$10e^{-6}$	$1e^{-6}$
0.2	$300e^3$	$300e^3$	$750e^3$	$750e^3$	$10e^{-6}$	$1e^{-6}$
0.3	$371e^3$	$371e^3$	$930e^3$	$930e^3$	$10e^{-6}$	$1e^{-6}$
0.4	$467e^3$	$467e^3$	$117e^3$	$117e^3$	$10e^{-6}$	$10e^{-6}$
0.5	$604e^3$	$604e^3$	$150e^3$	$150e^3$	$10e^{-6}$	$10e^{-6}$
0.6	$801e^3$	$801e^3$	$201e^3$	$201e^3$	$10e^{-6}$	$10e^{-6}$
0.7	$515e^3$	$515e^3$	$284e^3$	$284e^3$	$22e^{-6}$	$10e^{-6}$
0.8	$816.81e^3$	$816.81e^3$	$451e^3$	$451e^3$	$22e^{-6}$	$10e^{-6}$
0.85	$1.12e^6$	$1.12e^6$	$617e^3$	$617e^3$	$22e^{-6}$	$10e^{-6}$
0.9	$1.72e^6$	$1.72e^6$	$949e^3$	$949e^3$	$22e^{-6}$	$10e^{-6}$
0.95	$3.54e^6$	$3.54e^6$	$1.96e^6$	$1.96e^6$	$22e^{-6}$	$10e^{-6}$

Tabla 7. Comparación entre resultados teóricos respecto al integrador fraccionario propuesto de la Fig. 5.

α	Pendiente ideal ec. (4) (dB/Dec)	Pendiente circuito Fig. 6 (dB/Dec)	Error (dB/Dec)
0.1	-2	-2.791	-0.791
0.2	-4	-5.547	-1.547
0.3	-6	-8.293	-2.293
0.4	-8	-10.909	-2.909
0.5	-10	-13.398	-3.398
0.6	-12	-15.601	-3.601
0.7	-14	-17.488	-3.488
0.8	-16	-17.899	-1.899
0.85	-17	-18.387	-1.387
0.9	-18	-18.738	-0.738
0.95	-19	-19.336	-0.336

ISSN en trámite

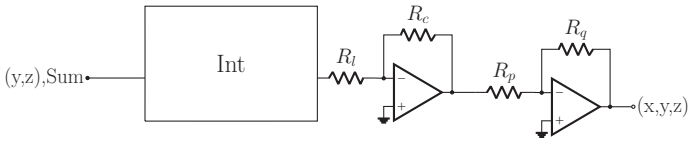


Fig. 7. Circuito (*Int_Gain*) para generar la señales de salida (x, y, z). El bloque Int corresponde al integrador propuesto de la Fig. 5.

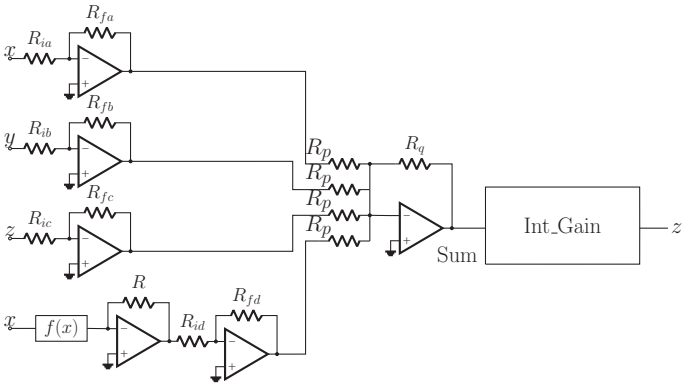


Fig. 8. Circuito para generar la señal de salida z.

los amplificadores operacionales son TL081. Por lo tanto, todos los dispositivos son de uso común y disponibles comercialmente.

3. OSCILADOR CAÓTICO DE MÚLTIPLES ENRROLLAMIENTOS

En esta sección se muestra un ejemplo de aplicación de integrador fraccionario propuesto en la sección anterior. Basados en el trabajo de (Deng and Lü, 2006), el oscilador caótico de Lü se describe con las ecuaciones diferenciales de orden fraccionario (13), (14) y (15), donde $a = 2$, $b = 1$, $c = 0.6$ y $d_1 = 2$. *f(x)* es una función PWL (piecewise-linear, por sus siglas en inglés) .

$$D^{\alpha}x = y \tag{13}$$

$$D^{\alpha}y = z \tag{14}$$

$$D^{\alpha}z = -ax - by - cz + d_1 f(x) \tag{15}$$

Aplicando la metodología de diseño propuesta, en la Fig. 7 se presenta el circuito que sintetiza las ecuaciones (13) y (14) del oscilador caótico. En particular, el bloque *Int* se relaciona con el integrador de orden fraccionario de la Fig. 5. Las salidas de los integradores de orden fraccionario es amplificada con una ganancia de 3 para el caso particular de α =0.90. Por otro lado, el circuito de la Fig. 8 sintetiza a la ecuación (15), donde la señal *Sum* es integrada por el bloque *Int_Gain* y obtener la señal de salida z. El bloque *Int_Gain* se relaciona con la Fig. 7. Además, las Figs. 9 y 10 corresponden a la función *f(x)* para obtener un oscilador caótico de 2 o 4 enrollamientos, respectivamente. Finalmente, la Tabla 8 muestra los valores de los componentes del oscilador caótico de Lü de orden α =0.90. Es importante

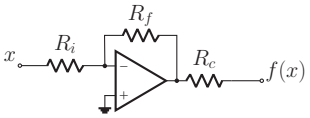


Fig. 9. Circuito de la función *f(x)* para generar un oscilador caótico de 2 enrollamientos.

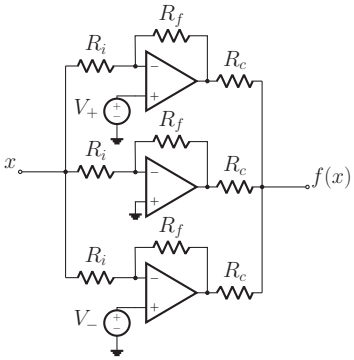


Fig. 10. Circuito de la función *f(x)* para generar un oscilador caótico de 4 enrollamientos.

Tabla 8. Valores para el circuito del oscilador caótico de orden α =0.90.

Elemento	Valor	Elemento	Valor
$R_{1s}(k\Omega)$	19.02	$C_1(\mu F)$	10.00
$R_{1L}(k\Omega)$	19.02	$R_{2s}(k\Omega)$	4.75
$C_2(\mu F)$	10.00	$R_{2L}(k\Omega)$	4.75
$R_1(k\Omega)$	1.00	$R_2(k\Omega)$	361.00
$R_3(k\Omega)$	19.00	$R_4(k\Omega)$	10.00
$R_5(k\Omega)$	20.00	$R_l(k\Omega)$	2.20
$R_c(k\Omega)$	6.80	$R_p(k\Omega)$	10.00
$R_q(k\Omega)$	10.00	$R_{ia}(k\Omega)$	10.00
$R_{fa}(k\Omega)$	20.00	$R_{ib}(k\Omega)$	10.00
$R_{fb}(k\Omega)$	10.00	$R_{ic}(k\Omega)$	10.00
$R_{fc}(k\Omega)$	6.00	$R(k\Omega)$	10.00
$R_{id}(k\Omega)$	10.00	$R_{fd}(k\Omega)$	20.00

Tabla 9. Voltajes para la función PWL $f(x)$.

Elemento	Valor	Elemento	Valor
$R_i(k\Omega)$	1.00	$R_f(M\Omega)$	1.00
$R_c(k\Omega)$	149.60	$V_+(v)$	1.85
$V_-(v)$	-1.90	$V_{SS}(v)$	15.00
$V_{EE}(v)$	-15.00	$V_{sat}(v)$	± 14.60

mencionar que los integradores fraccionarios se escalaron en frecuencia, en el caso de los integradores de orden α =0.90, el escalamiento es de 1.67Hz en la frecuencia de corte (factor de escalamiento 200 para el integrador de α =0.90 normalizado). En la tabla 9 se muestran los valores de voltaje para la función no lineal $f(x)$ o PWL.

4. CONCLUSIÓN

Se presentó una propuesta de diseño electrónico para un integrador de orden fraccionario basado en filtros Butterworth pasabajas y pasa altas. Usando el simulador de circuitos SPICE, el análisis de la respuesta en frecuencia determinó que el error de aproximación es

ISSN en trámite

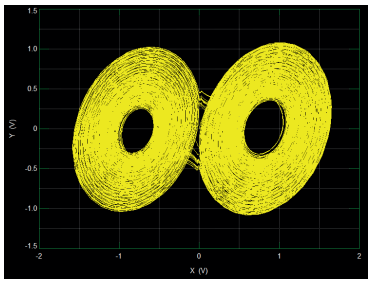


Fig. 11. Oscilador caótico de Lü con $\alpha = 0.9$ con 2 enrollamientos.

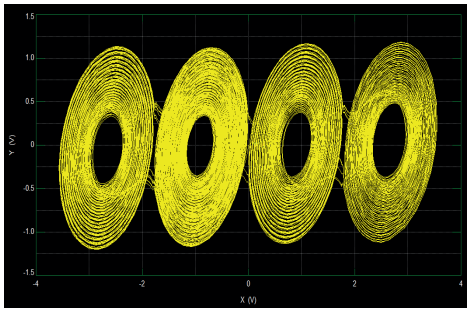


Fig. 12. Oscilador caótico de Lü con $\alpha = 0.9$ con 4 enrollamientos.

aceptable en comparación con realizaciones conocidas. En particular, el error de aproximación del integrador fraccionario propuesto se reduce significativamente para órdenes fraccionarios $\alpha \geq 0.8$ Para demostrar la utilidad del método propuesto, el integrador de orden α =0.9 se utilizó para la implementación experimental del oscilador caótico de 2 y 4 enrrollamientos. Los resultados a nivel circuito (Fig. 5 y Fig. 6) reproducen el comportamiento esperado a nivel teórico (ver Tabla 7). Las aplicaciones de los integradores fraccionarios Butterworth son el campo de la dinámica no lineal, diseño de controladores PID, y diseño de emuladores de memristores.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo otorgado mediante el proyecto 100519836-VIEP2021.

REFERENCIAS

Bertsias, P., Psychalinos, C., Elwakil, A., Safari, L., and Minaei, S. (2019). Design and application examples of cmos fractional-order differentiators and integrators. *Microelectronics Journal*, 83, 155–167. doi: https://doi.org/10.1016/j.mejo.2018.11.013.

Charef, A. (2006). Analogue realisation of fractional-order integrator, differentiator and fractional pi$\lambda d\mu$ controller. *IEE Proceedings-Control Theory and Applications*, 153, 714–720.

Charef, A., Sun, H., Tsao, Y., and Onaral, B. (1992). Fractal system as represented by singularity function. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 37, 1465–1470. doi:https://doi.org/10.1109/9.159595.

David, S., López, J., and Pallone, E. (2011). Fractional order calculus: Historical apologia, basic concepts and some applications. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 33, 4302–4302. doi: https://doi.org/10.1590/S1806-11172011000400002.

Deng, W. and Lü, J. (2006). Design of multidirectional multiscroll chaotic attractors based on fractional differential systems via switching control. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 16, 043120. doi:https://doi.org/10.1063/1.2401061.

Kapoulea, S., Psychalinos, C., and Elwakil, A.S. (2018). Single active element implementation of fractional-order differentiators and integrators. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 97, 6–15. doi:https://doi.org/10.1016/j.aeue.2018.09.046.

Machado, J.T., Kiryakova, V., and Mainardi, F. (2011). Recent history of fractional calculus. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 16, 1140–1153. doi: https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2010.05.027.

Mahata, S., Kar, R., and Mandal, D. (2020). Optimal rational approximation of bandpass butterworth filter with symmetric fractional-order roll-off. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 117, 153106. doi: https://doi.org/10.1016/j.aeue.2020.153106.

Montero, C.M., Gaspariano, L.A.S., López, C.S., Díaz, V.R.G., and Cuautle, E.T. (2017). On the electronic realization of fractional order filters with opamps and field programmable analog arrays. volume 688. Springer. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-319-50249-6_5.

Pacheco, J.M.M., Hernández, L.C.L., Montero, C.M., Akgül, A., Gaspariano, L.A.S., Li, C.B., and Çağri Kutlu, M. (2021). Active realization of fractional-order integrators and their application in multi-scroll chaotic systems. *Complexity*, 2021. doi: https://doi.org/10.1155/2021/6623855.

Serrano, E.Z. (2017). *Fractional Order Chaotic Systems and Their Electronic Design*. Ph.D. thesis, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Sun, H., Chen, W., Wei, H., and Chen, Y. (2011). A comparative study of constant-order and variable-order fractional models in characterizing memory property of systems. *The European Physical Journal Special Topics*, 193, 185. doi:https://doi.org/10.1140/epjst/e2011-01390-6.

Sun, H., Zhang, Y., Baleanu, D., Chen, W., and Chen, Y. (2018). A new collection of real world applications of fractional calculus in science and engineering. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 64, 213–231. doi: https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2018.04.019.

Tavazoei, M.S. (2020). Fractional order chaotic systems: history, achievements, applications, and future challenges. *The European Physical Journal Special Topics*, 229, 887–904. doi: https://doi.org/10.1140/epjst/e2020-900238-8.

ISSN en trámite

Modelado del Sistema Cardiovascular mediante Bond Graph

Ortiz R. Estela * **Guerrero R. Gerardo V.** *
García B. Carlos D. * **Hernández R. Isaura V.** *
Serrano C. Dulce A. * **Ortiz R. Carina** **

* *Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Internado Palmira S/N, Cuernavaca, Morelos, México. CP. 62490 (e-mail: estela_or@cenidet.edu.mx).*
** *Hospital Regional de Alta Especialidad del Bajío, San Carlos la Roncha, León, Gto, México. CP.37660.*

Resumen: Por medio de este trabajo se presenta el desarrollo de un modelo del sistema cardiovascular (SCV) basado en elementos Windkessel, utilizando la metodología de Bond Graph (BG). El modelo emplea la exitación paramétrica por medio de una función de compliancia variable para los ventrículos y consta de diez ecuaciones diferenciales que fueron resueltas mediante integración numérica. Los resultados obtenidos de las presiones en el circuito sistémico y el pulmonar fueron validados mediante la comparación con los rangos normales reportados de presión arterial y flujo sanguíneo de adultos sanos. Se obtuvieron además el volumen sistólico y la salida cardiaca para determinar el volumen de sangre expulsado por cada ventrículo y se mostró que son equivalentes y congruentes con lo reportado en la literatura. Este modelo puede apoyar el desarrollo de técnicas de diagnóstico médico.

Palabras clave: Modelado matemático, Sistema Cardiovascular, Windkessel, Bond Graph

1. INTRODUCTION

El sistema cardiovascular (SCV) es el encargado del transporte y distribución de nutrientes y oxígeno en el cuerpo, así como del desecho de productos metabólicos de todos los tejidos. Está formado principalmente por el corazón, que actúa como una bomba impulsando la sangre a través de las arterias y arteriolas, por una lado hacia los capilares de todos los órganos (circulación sistémica), y por el otro hacia los pulmones (circulación pulmonar); en ambos casos la sangre regresa al corazón por medio de las venas. El corazón es un órgano hueco dividido internamente en cuatro cavidades: dos superiores llamadas aurículas, y dos inferiores denominadas ventrículos. También dispone de cuatro válvulas que separan las aurículas de los ventrículos (mitral y tricúspide) y los ventrículos de las arterias principales (aórtica y pulmonar); su función es asegurar el flujo de sangre en una sola dirección. El ciclo cardiaco está dividido básicamente en dos fases: sístole y diástole. La sístole se refiere a la contracción y expulsión ventricular. La diástole se refiere a la relajación y el llenado ventricular.

Los primeros modelos del SCV estuvieron basados en el fenómeno llamado bolsa de aire o Windkessel, el cual permitió representar el corazón y las arterias primero por medio de un circuito hidráulico y posteriormente uno eléctrico, con el que se realizó el análisis matemático de los fenómenos hemodinámicos como la presión arterial y el flujo sanguíneo. Los modelos de parámetros concentrados son aquellos en los que se representan conjuntos de vasos sanguíneos por medio de elementos resistivos, capacitivos e inductivos interconectados. El uso de estos modelos se sigue explotado ampliamente por su precisión y fácil interpretación; actualmente se emplean en el estudio de cardiopatías Li et al. (2019), Manoliu (2015), Faragallah and Divo (2012), Broomé (2013), en el análisis de la interacción del SCV con el respiratorio Belkhatir (2014), y en el diseño de dispositivos que asisten la circulación Koh et al. (2019) y Ellwein (2013), entre otros. Por otro lado, los trabajos de modelado computacional también hacen uso de los modelos de parámetros concentrados para representar vasos sanguíneos específicos para limitar el costo computacional, como por ejemplo en Yang and Feinstein (2020), Bonfanti et al. (2019) y Quarteroni et al. (2016).

La metodología Bond Graph (BG) es un desarrollo de modelado unificado de sistemas energéticos multidominio que ha sido utilizado para modelar sistemas complejos donde intervienen fenómenos de distintas naturalezas como la eléctrica, química, mecánica y de fluidos. Los Bond Graphs se han empleado con éxito en el modelado del SCV, en el estudio de la transducción químico-mecánica en el ventrículo, en el análisis de la interacción fluido-sólido del flujo pulsátil mostrado en Zadpoor et al.

ISSN en trámite

(2005), la interconexión con modelos tridimensionales de estructuras cardiacas Díaz-Zuccarini et al. (2009) y para modelar la dinámica del ventrículo izquierdo estudiada por Moin (2016). Es por ello que en este trabajo se desarrolla la metodología Bond Graph para la obtención, análisis y validación del modelo matemático de parámetros concentrados del sistema cardiovascular como un circuito cerrado; donde se incluye el corazón y las principales venas y arterias del cuerpo para un adulto sano.

2. METODOLOGÍA DE MODELADO CON BOND GRAPH

2.1 Variables y elementos energéticos

El primer paso para modelar un sistema en BG es identificar las variables energéticas básicas del sistema que se denominan genéricamente como esfuerzo (variable extensiva) y flujo (variable intensiva). En los sistemas hidráulicos, como el SCV, las variables energéticas son la presión P, que es análoga al esfuerzo energético, y el flujo de fluido Q, que es análogo al flujo energético Shuvra (2009). Los elementos básicos de BG son: la fuente de esfuerzo o SE y la fuente de flujo o SF, los almacenadores de esfuerzo L y los almacenadores de flujo C; los elementos transformadores y giradores, entre otros.

Los almacenadores de esfuerzo y flujo son elementos pasivos a los que llega la energía y normalmente absorben potencia. Ambos tipos se pueden describir por medio de una relación constitutiva que depende de las propiedades del material del que están hechos y de la geometría del elemento, y por una relación dinámica que explica su comportamiento temporal. En los sistemas de fluidos, la variable de almacenamiento de flujo es el volumen V que se define para un tanque o depósito; en el caso del SCV los vasos sanguíneos actúan como tanques presurizados Wellstead (2000). La propiedad del tanque presurizado para almacenar flujo se denomina capacitancia hidráulica C, cuya relación dinámica está en la ecuación 1 y la relación constitutiva en la ecuación 2.

$$V = \int Q dt \tag{1}$$

$$P = \frac{V}{C} \tag{2}$$

La variable de almacenamiento de esfuerzo de fluido es la energía cinética asociada con un cuerpo en movimiento, llamado momento de presión Γ. Las propiedades del material del almacenador de esfuerzo definen su inertancia L, cuya relación dinámica está en la ecuación 3 y la constitutiva en la ecuación 4. En el modelo del SCV el efecto de la inertancia se halla en las arterias principales, donde la velocidad de la sangre es mayor Wellstead (2000).

$$\Gamma_{21} = \int P dt \tag{3}$$

$$Q = \frac{\Gamma_{21}}{L} \tag{4}$$

El elemento disipador de potencia es aquel que convierte la energía instantáneamente y sólo tiene relación constitutiva (ecuación 5), que es análoga a la ley de Ohm. Generalmente disipa la energía en forma de calor. Para los sistemas hidráulicos es llamada resistencia hidráulica R, y en el modelo del SCV está determinada por la resistencia al flujo de la sangre que presentan las válvulas cardiacas, las arterias y principalmente las arteriolas y capilares en órganos y alveolos.

$$P_{21} = RQ \tag{5}$$

2.2 Enlaces energéticos

En segundo lugar se procede a identificar los enlaces energéticos; gráficamente son líneas con medias flechas que apuntan en la dirección positiva de la potencia. Las flechas siempre salen desde las fuentes de esfuerzo y flujo, y se dirigen hacia los almacenadores y los disipadores, indicando que absorben potencia.

2.3 Uniones de esfuerzo y flujo

En tercer lugar se establece el tipo de unión que existe entre los componentes del modelo. Existen uniones de dos tipos: la unión de flujos y la unión de esfuerzos. La unión de esfuerzos, se denota por el número 1, puede verse como un punto donde los elementos están conectados en serie y por ellos circula el mismo flujo (ecuación 6). La suma de esfuerzos, es decir, de presiones en este nodo es cero (ecuación 7).

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = ... = Q_n \tag{6}$$

$$P_1 + P_2 + P_3 + ... + P_n = 0 \tag{7}$$

De manera análoga la unión de flujos o unión tipo 0, se puede ver como un punto donde los elementos están conectados en paralelo, por lo tanto están sometidos al mismo esfuerzo o presión (ecuación 8) y la suma de flujos es cero (ecuación 9).

$$P_1 = P_2 = P_3 = ... = P_n \tag{8}$$

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + ... + Q_n = 0 \tag{9}$$

2.4 Causalidad

Una vez que se ha formado el modelo gráfico donde se representan todos los elementos y uniones entre ellos se procede a la asignación de la causalidad de cada enlace. La causalidad define la relación esfuerzo/flujo, entrada/salida o causa/efecto de un sistema, gráficamente se representa como una línea perpendicular a la flecha en el extremo por donde entra o sale la información del esfuerzo (Fig. 1. a y b).

ISSN en trámite

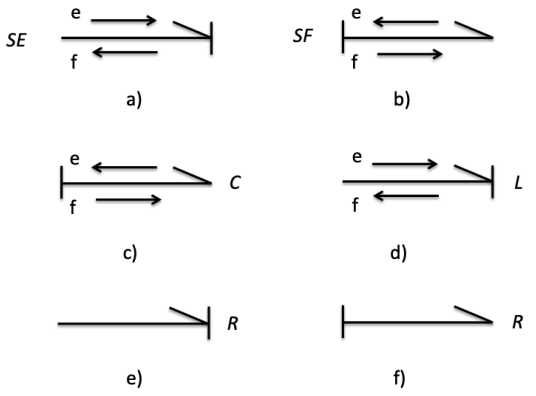


Fig. 1. Causalidad preferida de los elementos en BG

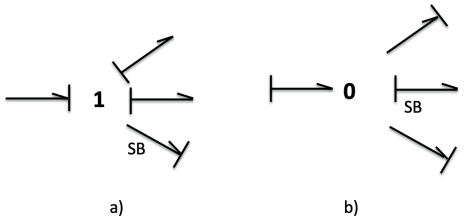


Fig. 2. Causalidad en las uniones 0 y 1 en BG

La causalidad preferida del almacenador de flujo C es la integral, es decir, al elemento entra información del flujo que se integra según la relación dinámica y sale información de presión según la relación constitutiva (Fig. 1. c), mientras que para el elemento almacenador de esfuerzo L entra información de presión que es integrada mediante la relación dinámica y sale información de flujo al aplicarse la relación constitutiva (Fig. 1. d). Los elementos disipadores R no tienen causalidad preferida y pueden tener cualquiera de ellas (Fig. 1. e y f), excepto si son elementos no lineales, multivariables o con relaciones constitutivas específicas.

En las uniones de esfuerzos sólo uno de los enlaces puede tener al flujo como variable de salida al que se le llama *StrongBond* (SB) (Fig. 2. a), mientras que en las uniones de flujo sólo un enlace puede tener al esfuerzo como variable de salida (Fig. 2. b).

2.5 Modelo del sistema cardiovascular en Bond Graph

El modelo planteado en este trabajo está basado en el modelo de parámetros concentrados propuesto en Ortiz-Rangel et al. (2021), en el cual se utiliza una exitación paramétrica dada por una entrada periódica que representa la compliancia ventricular variable en el tiempo. En este modelo se aprovecha la simetría de la circulación sistémica y pulmonar para proponer un único circuito cerrado cuyos elementos se muestran en la figura 3. El flujo instantáneo que atraviesa cada estructura es el mismo en cada instante de tiempo; se denominó flujo sistémico (Q_s) al flujo impulsado por el ventrículo izquierdo y como

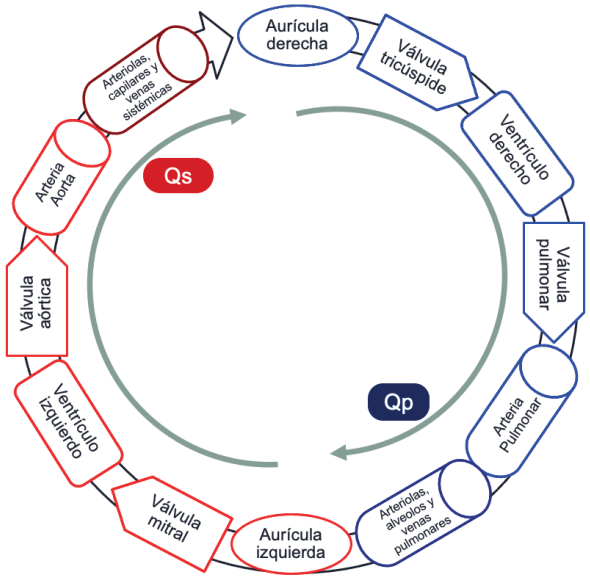


Fig. 3. Flujo sistémico (Q_s) y pulmonar (Q_p) normal

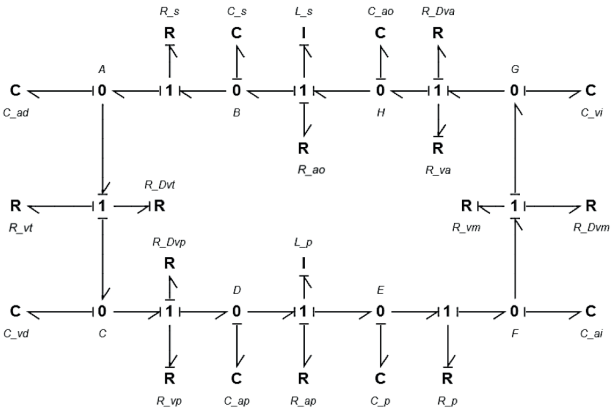


Fig. 4. Modelo del SCV en Bond Graph

flujo pulmonar (Q_p) al que es impulsado por el ventrículo derecho.

Al definir los elementos energéticos del modelo se consideró que para el circuito sistémico el ventrículo izquierdo se representara con una capacitancia variable (C_{vi}), la aurícula izquierda con una compliancia constante (C_{ai}), la aorta con una resistencia y una inertancia en serie, que a su vez están en paralelo con una capacitancia (R_{ao}, L_s, C_{ao}) y finalmente las arteriolas, capilares y venas por medio de una resistencia en paralelo con una compliancia (R_s, C_s). Las válvulas se modelaron con dos resistencias en serie cada una, por ejemplo para la válvula aórtica R_{vm} representa la resistencia al flujo y RD_{vm} representa el estado de la válvula, cuando su valor es grande la válvula está cerrada y no hay flujo o toma un valor cercano a cero si la válvula está abierta y hay flujo. Del mismo modo se procedió con los elementos del circuito

ISSN en trámite

pulmonar y se asignaron los enlaces energéticos para cada elemento.

Se formaron las uniones de esfuerzo y flujo considerando la disposición de los elementos entre sí, y se definió la causalidad de los elementos del circuito siguiendo las convenciones establecidas por la metodología. Finalmente se generó el gráfico de la Figura 4, en el cual se puede verificar que existe una correcta correspondencia de la dirección de potencia en los enlaces, y se estableció la causalidad integral para todos los elementos L y C.

2.6 Ecuaciones diferenciales del modelo

El número de elementos de almacenamiento independientes con causalidad integral (L, C) determina el orden del sistema, es decir, el número de ecuaciones diferenciales independientes que se generarán. Al aplicar las relaciones para cada uno de los almacenadores independientes y desarrollar las expresiones se obtiene el siguiente conjunto de ecuaciones diferenciales para el circuito pulmonar (ecs. 10-14) y para el circuito sistémico (ecs. 15-19).

$$\dot{V_{ad}} = \frac{V_s}{C_s R_s} - \frac{V_{ad}}{C_{ad} R_s} - \frac{V_{ad}}{C_{ad}(R_{Dvt} + R_{vt})} + \frac{V_{vd}}{C_{vd}(R_{Dvt} + R_{vt})} \tag{10}$$

$$\dot{V_{vd}} = \frac{V_{ad}}{C_{ad}(R_{Dvt} + R_{vt})} - \frac{V_{vd}}{C_{vd}(R_{Dvt} + R_{vt})} - \frac{V_{vd}}{C_{vd}(R_{Dvp} + R_{vp})} + \frac{V_{ap}}{C_{ap}(R_{Dvp} + R_{vp})} \tag{11}$$

$$\dot{V_{ap}} = \frac{V_{vd}}{C_{vd}(R_{Dvp} + R_{vp})} - \frac{V_{ap}}{C_{ap}(R_{Dvp} + R_{vp})} - \frac{\Gamma_p}{L_p} \tag{12}$$

$$Q_p = \dot{V_p} = \frac{\Gamma_p}{L_p} - \frac{V_p}{C_p R_p} + \frac{V_{ai}}{C_{ai} R_p} \tag{13}$$

$$P_p = \dot{\Gamma_P} = \frac{V_{ap}}{C_{ap}} - \frac{R_{ap}\Gamma_p}{L_p} - \frac{V_p}{C_p} \tag{14}$$

$$\dot{V_{ai}} = \frac{V_p}{C_p R_p} - \frac{V_{ai}}{C_{ai} R_p} - \frac{V_{ai}}{C_{ai}(R_{Dvm} + R_{vm})} + \frac{V_{vi}}{C_{vi}(R_{Dvm} + R_{vm})} \tag{15}$$

$$\dot{V_{vi}} = \frac{V_{ai}}{C_{ai}(R_{Dvm} + R_{vm})} - \frac{V_{vi}}{C_{vi}(R_{Dvm} + R_{vm})} - \frac{V_{vi}}{C_{vi}(R_{Dva} + R_{va})} + \frac{V_{ao}}{C_{ao}(R_{Dva} + R_{va})} \tag{16}$$

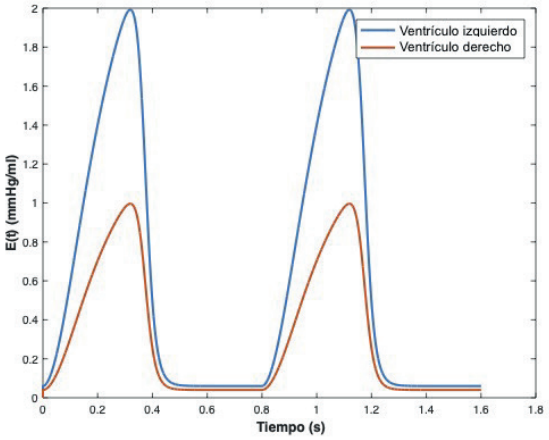


Fig. 5. Funciones de elastancia ventricular

$$\dot{V_{ao}} = \frac{V_{vi}}{C_{vi}(R_{Dva} + R_{va})} - \frac{V_{ao}}{C_{ao}(R_{Dva} + R_{va})} - \frac{\Gamma_s}{L_s} \tag{17}$$

$$Q_s = \dot{V_s} = \frac{\Gamma_s}{L_s} - \frac{V_s}{C_s R_s} + \frac{V_{ad}}{C_{ad} R_s} \tag{18}$$

$$P_p = \dot{\Gamma_s} = \frac{V_{ao}}{C_{ao}} - \frac{R_{ao}\Gamma_s}{L_s} - \frac{V_s}{C_s} \tag{19}$$

2.7 Modelo de la elastancia ventricular

La elastancia es la función inversa a la compliancia y define la rigidez de las paredes cardiacas. La función de elastancia ventricular $E(t) = 1/C_v(t)$ es variable en el tiempo y ha sido determinada experimentalmente en numerosos estudios de la relación presión-volumen; aquí se aproximó como en Simaan (2008):

$$E(t) = (E_{max} - E_{min})E_n(t_n) + E_{min} \tag{20}$$

$E(t)$ es una versión reescalada de la elastancia normalizada $E_n(t_n)$ y las constantes E_{max} y E_{min} están determinadas por la relación entre el volumen y la presión final sistólica, y entre el volumen la presión final diastólica respectivamente.

$$E_n(t_n) = 1.55[\frac{(\frac{t_n}{0.7})^{1.9}}{1 + (\frac{t_n}{0.7})^{1.9}}] * [\frac{1}{1 + (\frac{t_n}{1.17})^{21.9}}] \tag{21}$$

Donde se considera el tiempo en el que la función alcanza su valor máximo (T_{max}) y el tiempo que dura el ciclo cardiaco (t_c) con respecto a la frecuencia cardiaca (FC) dada en latidos por minuto.

$$t_n = t/T_{max}, T_{max} = 0.2 + 0.15t_c, t_c = 60/FC \tag{22}$$

3. SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

Los parámetros del modelo se ajustaron mediante aproximaciones teóricas tomadas de la literatura: Simaan and

ISSN en trámite

Fellow (2014), quedando como se muestra en la Tabla 1, con FC =75. En la figura 5 se observan las funciones de elastancia variable para ambos ventrículos, el ventrículo izquierdo es el que desarrolla mayor fuerza de contracción y por lo tanto donde se genera la mayor presión del SCV. Se obtuvieron las curvas de los flujos sistémico y pulmonar (Fig. 6), se observa que su magnitud es distinta, sin embargo el área bajo la curva en cada ciclo cardiaco es similar y corresponde al volumen desalojado del corazón por las arterias respectivas.

En la figura 7 se observan las presiones pulmonares para un adulto normal, se aprecia que el ventrículo derecho tiene una presión sistólica (Pvi_s) de 23 mmHg, mientras que la presión diastólica (Pvi_d) es de 3 mmHg. La presión auricular derecha (Pad) tiene cambios de apenas 2 mmHg entre sístole y diástole, por otro lado se observa que la arteria pulmonar (Pap) que está a la salida del ventrículo presenta una variación de 13 mmHg; como es de esperarse, en las arterias más alejadas del corazón (P_p), la variación de presión pulsátil es de unos 5 mmHg.

Tabla 1. Parámetros del modelo

Parámetro	Valor	Significado fisiológico
	Elastancias $[mmHg/ml]$	
$Emax_{vi}$	2	E. máxima ventrículo izq.
$Emin_{vi}$	0.06	E. mínima ventrículo izq.
$Emax_{vd}$	1	E. máxima ventrículo der.
$Emin_{vd}$	0.04	E. mínima ventrículo der.
	Resistencias $[mmHg.s/ml]$	
R_{vt}	0.0025	R. válvula tricúspide
R_{vp}	0.001	R. válvula pulmonar
R_{ap}	0.05	R. arteria pulmonar
R_p	0.05	R. vasculatura pulmonar
R_{vm}	0.0025	R. válvula mitral
R_{va}	0.001	R. válvula aórtica
R_{ao}	0.05	R. arteria aorta
R_s	1.2	R. vasculatura sistémica
	Compliancias $[ml/mmHg]$	
C_{ad}	62.42	C. aurícula derecha
C_{ap}	2.17	C. arteria pulmonar
C_p	5	C. vasculatura pulmonar
C_{ai}	47.65	C. aurícula izquierda
C_{ao}	0.08	C. arteria aorta
C_s	1.4465	C. vasculatura sistémica
	Inertancias $[mmHg.s^2/ml]$	
L_p	0.0001	Inercia de la sangre en la arteria pulmonar
L_s	0.0005	Inercia de la sangre en la arteria aorta

De manera similar para el circuito sistémico (Fig. 8), donde las presiones son mayores que las pulmonares, se observa que la presión sistólica del ventrículo derecho (Pvd_s) es de 118 mmHg y la diastólica (Pvd_d) es de 7 mmHg. Para la arteria aorta que está a la salida del ventrículo la variación de la presión sistólica (Pao_s) y diastólica (Pao_d) es de 40 mmHg. Se logra observar en la curva de presión aórtica la incisura dícrota que coincide con la apertura de la válvula mitral y el cierre de la válvula aórtica. En las arteriolas que están más alejadas del corazón la presión (Ps) tiene una menor variación de

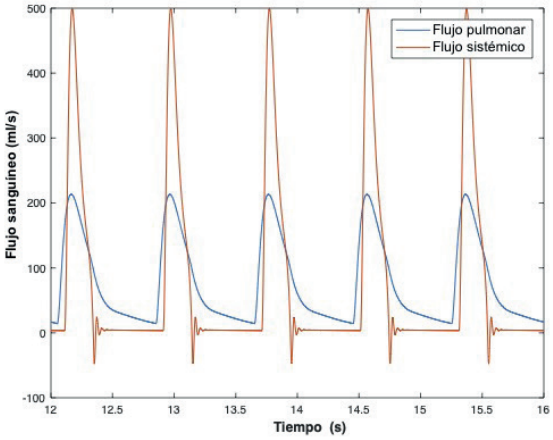


Fig. 6. Flujo sistémico y flujo pulmonar

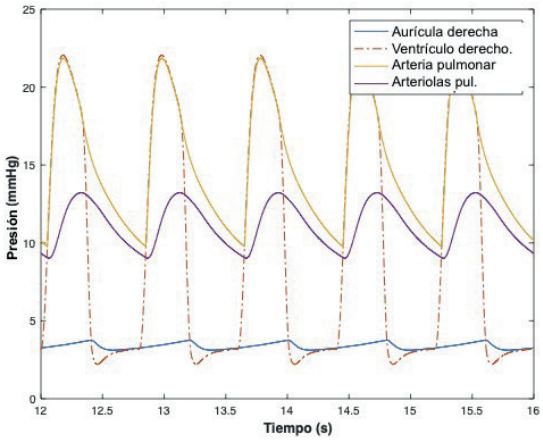


Fig. 7. Presiones en el circuito pulmonar

modo que a nivel de los capilares el flujo sanguíneo es no pulsátil.

En la practica médica para determinar el desempeño cardiaco suele utilizarse la medida del volumen de sangre expulsado por cada ventrículo por latido, lo que se conoce como Stroke Volume (SV, por sus siglas en inglés), y el volumen sanguíneo expulsado por minuto o Cardiac Output (CO, por sus siglas en inglés).

$$SV = \int Q(t)dt \tag{23}$$

$$CO = SV * FC \tag{24}$$

En la tabla 2 se resumen los resultados de la simulación, se distingue que el volumen sanguíneo del circuito sistémico SV_s y el pulmonar SV_p son similares para sujetos sanos y por lo tanto la salida cardiaca sistémica CO_s y pulmonar CO_p también son similares.

ISSN en trámite

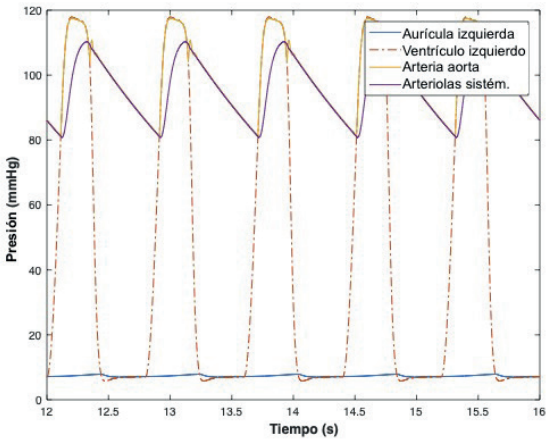


Fig. 8. Presiones en el circuito sistémico

4. CONCLUSION

Se concluye que el modelo de parámetros concentrados del SCV en su representación con BG simulado con datos de la literatura es útil para relacionar las variables hidráulicas y eléctricas con las variables fisiológicas de manera que pueden ser analizadas desde el punto de vista energético, en este caso las variables del modelo corresponden al volumen y al momento de presión de las cuales se deriva el flujo sanguíneo instantáneo y la presión sanguínea. Algunas de las ventajas de la representacion en BG es que permite la interconexión entre modelos de distinta naturaleza y la detección de fallas por medio de la causalidad, lo cual se propone como trabajo futuro de la investigación.

AGRADECIMIENTOS

Estela Ortiz agradece a CONACYT por la beca de doctorado otorgada. Los autores agradecen al HRAEB por la colaboración con TecNM/CENIDET.

Tabla 2. Resultados para sujetos sanos

Salidas	Teórico	Modelo
Pao_s [mmHg]	127	119.2
Pao_d [mmHg]	86	81.82
Pap_s [mmHg]	28.1	22.98
Pap_d[mmHg]	10	10.19
SV_s[ml/latido]	58	59
SV_p [ml/latido]	58	58.6
CO_s $[\frac{l}{min}]$	5	4.425
CO_p $[\frac{l}{min}]$	5	4.395

REFERENCIAS

Belkhatir, Z. (2014). Residual generator for cardiovascular anomalies detection. *European Control Conference*, 1862–1868.

Bonfanti, M., Franzetti, G., Maritati, G., Homer-Vanniasinkam, S., Balabani, S., and Díaz-Zuccarini, V. (2019). Patient-specific haemodynamic simulations of complex aortic dissections. *Medical Engineering and Physics*.

Broomé, M. (2013). Closed-loop real-time simulation model of hemodynamics and oxygen transport in the cardiovascular system. *BioMedical Engineering On-Line*, 12(69), 1–20.

Díaz-Zuccarini, V., Rafirou, D., LeFevre, J., Hose, D.R., and Lawford, P.V. (2009). Systemic modelling and computational physiology. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 17(1), 125–136.

Ellwein, L. (2013). Modeling cardiovascular and respiratory dynamics in congestive heart failure. *Math Biosci*, 241, 56–74.

Faragallah, G. and Divo, E. (2012). A New Control System for Left Ventricular Assist Devices Based on Patient-specific Physiological Demand. 20.

Koh, V.C.A., Ho, Y.K., Stevens, M.C., Ng, B.C., Salamonsen, R.F., Lovell, N.H., and Lim, E. (2019). A centralized multi-objective model predictive control for a biventricular assist device : An in silico evaluation. *Biomedical Signal Processing and Control*, 49, 137–148.

Li, B., Wang, W., Mao, B., and Liu, Y. (2019). A Method to Personalize the Lumped Parameter Model of Coronary Artery. *International Journal of Computational Methods*, 16(3), 1–13.

Manoliu, V. (2015). Modeling cardiovascular hemodynamics in a model with nonlinear parameters. *E-Health and Bioengineering Conference*, (LV), 31–34.

Moin, L. (2016). Bond Graph model for the Right Atrium of Heart. *Conference on Biomedical Engineering and Sciences*, 181–185.

Ortiz-Rangel, E., Guerrero-Ramírez, G.V., García-Beltran, C.D., Guerrero-Lara, M., Adam-Medina, M., and Astorga-Zaragoza, C.M. (2021). Dynamic modeling and simulation of the human cardiovascular system with PDA. *Biomedical Signal Processing and Control*.

Quarteroni, A., Lassila, T., Rossi, S., and Ruiz-Baier, R. (2016). Integrated Heart-Coupling multiscale and multiphysics models for the simulation of the cardiac function. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*.

Shuvra, D. (2009). *Mechatronic Modeling and Simulation Using Bond Graphs*. CRC Press.

Simaan, M.A. (2008). Modeling and control of the heart left ventricle supported With a Rotary Assist Device. *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, 2656–2661.

Simaan, M.A. and Fellow, L. (2014). Control of the Left Ventricular Assist Device.

Wellstead, P.E. (2000). *Introduction to Physical System Modelling*. Academic Press LTD.

Yang, W. and Feinstein, J.A. (2020). *Computational Modeling and Personalized Surgery*. Elsevier Inc.

Zadpoor, A.A., Arshi, A.R., and Nikooyan, A.A. (2005). A bond graph approach to modeling pulsatile flow. *Engineering in Medicine and Bi*, 2319–2322.

ISSN en trámite

Simulación de ALU basada en circuito de perceptrón simple

Lozoya-Ponce Ricardo*·[1], Medrano H. Jesús Alfonso.*·[2], Ramírez Q. Juan Alberto*·[3], J. L. Durán-Gómez *·[4], L. Alfonso González-Bravo·[1], J. Manuel Silva**·[2]**

**Instituto Tecnológico de Chihuahua: División de Estudios de Posgrado e Investigación*
(e-mail: {ricardo.lp[1], jesus.mh[2], juanrq[3], jose.dg[4]} @chihuahua.tecnm.mx).
***Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus San Luis Potosí*
(e-mail: {luis.bravo[1], jmanuel.silva[2]} @tec.mx).

Resumen: En el presente trabajo se muestran los resultados de simulación de un circuito que representa algunas funciones operativas de una Unidad Lógica Aritmética (ALU). Para ello se utiliza como lógica de diseño el modelo de un perceptrón simple, basado en Amplificadores Operacionales. El resultado se trata de un sistema que presenta bondades de reconfiguración y escalabilidad.

Palabras clave: Unidad Lógica Aritmética, Perceptrón Simple, Amplificadores Operacionales.

1. INTRODUCCCIÓN

Las redes neuronales artificiales son un conjunto de técnicas perteneciente al campo de la inteligencia artificial. Su estructura consiste en una red formada por nodos (o neuronas) y conexiones, razón por la cual se asemejan al cerebro de los seres humanos, del cual procede su nombre. Las redes neuronales tienen una amplia diversidad de aplicaciones en problemas de reconocimiento de patrones y aproximación de funciones, debido a su flexibilidad y facilidad de uso.

Una red neuronal es capaz de detectar relaciones complejas y no lineales entre variables, a partir de unidades sencillas como las neuronas, al disponer muchas de estas unidades en paralelo. Las variables se dividen en variables de entrada y de salida, relacionadas por algún tipo de correlación o dependencia (no necesariamente causa-efecto). También es posible que la salida sea la clasificación de las variables de entrada en diferentes grupos.

Las neuronas se pueden disponer en diferentes capas. Las redes neuronales más sencillas constan de una capa de entrada, una capa de neuronas o capa oculta, y una capa de salida, como se representa en la figura 1.

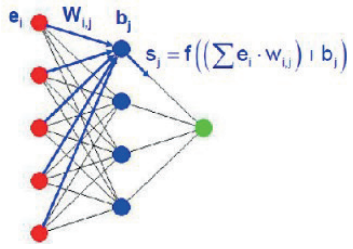


Fig. 1. Ejemplo de red neuronal con una capa oculta, Martínez Alvares (2012).

El funcionamiento de una neurona consiste en la transformación de los valores de las entradas a través de las conexiones, en una salida. La salida se obtiene a partir de la función de propagación, una función de activación, y una función de transferencia.

- La función de propagación más común consiste en el sumatorio de todas las entradas multiplicadas por los pesos de las conexiones, más un valor de sesgo o "bias".
- La función de activación, en caso de que exista, activa o desactiva la salida de esta neurona.
- La función de transferencia se aplica al resultado de la función de propagación y normalmente consiste en una función de salida acotada como una sigmoidea [0,1], o la tangente hiperbólica [-1,1]. Otras funciones de transferencia pueden ser una función lineal [-∞,+∞], base radial [0,1] o una función de discriminación [0,1], como las que se presentan en la figura 2.

ISSN en trámite

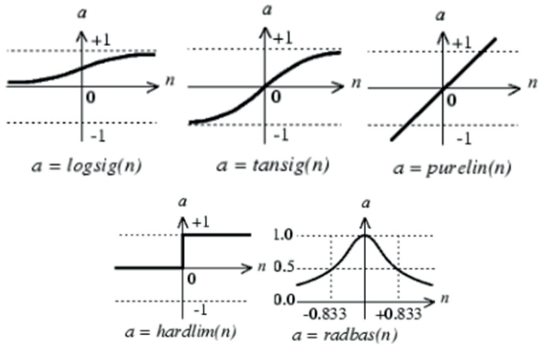


Fig. 2. Ejemplo de red neuronal con una capa oculta, Martínez Alvares (2012).

En este articulo se presenta el diseño de un ALU retomando el concepto de un perceptrón simple, implementado mediante amplificadores operacionales.

2. ANTECEDENTES

Desde los primeros años del siglo XX se han propuesto diversos modelos que han intentado emular el comportamiento del cerebro humano. Aunque existe una gran cantidad de modelos propuestos, la mayoría se basa en el hecho de ver a las neuronas como procesos numéricos que involucran los estados de otros según sus interconexiones.

El modelo de neurona artificial propuesto por McCulloch y Pitts (1943), presentaba un esquema que consideraba a las neuronas como sistemas que manejan señales que se presentan en dos posibles estados: activo o inactivo. Además, concebía a estos sistemas con *n* entradas y una única salida. En la figura 3, se representa un esquema de este modelo.

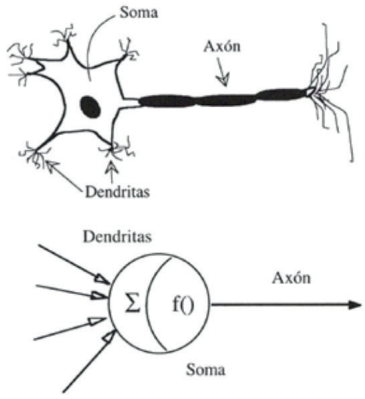


Fig. 3. Modelo de una neurona perceptrón, las dendritas como receptor de información, el soma donde se procesa, y el axón como transmisor, Khunder (2013).

De esta manera es que diversos autores como Hu Hen (2001) , Zhu Jihan (2003), J. Maher (2006), Rocke P. (2007), D. Maliuk (2010), J.J. Martínez Álvarez (2012), Lozoya-Ponce(2013), Khuder (2013), W. Liu (2018) y S. Abden (2020), por mencionar a algunos, utilizan un modelo matemático para representar este tipo de interacción, el cual se presenta en la figura 4.

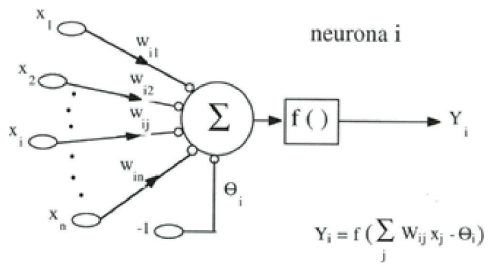


Fig. 4. Modelo de interacción sináptica de una neurona, Geng (2020).

Donde, x_j son las entradas de una neurona, w_{ij} son pesos sinápticos de la i-ésima neurona, θ_i es el nivel de disparo de la i-ésima neurona y $f(\,)$ función de transferencia.

De esta forma se puede considerar que el sistema esta dado por la ecuación (1).

$$F(X) = A^T X + B \qquad (1)$$

Donde

$$A^T = [a_0, a_1, \dots, a_{N-1}] \qquad (2)$$

$$X = \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ \dots \\ x_{N-1} \end{bmatrix} \qquad (3)$$

Con $A^T, X \in \mathbb{R}^n$ y $B \in \mathbb{R}$, donde B es un parámetro para sintonizar, A corresponde a los pesos que se agregan a cada entrada mediante la sinapsis y X es un vector de N entradas las cuales tienen su analogía directa con las dendritas de la neurona; los valores que puede tomar x son binarios, es decir $x_i \in \{0,1\}$; la función de que describe la activación esta dada de la siguiente manera:

$$g(z) = \begin{cases} 1, & z \in (m_{inf}, m_{sup}) \\ 0, & \text{para otro caso.} \end{cases}; \qquad (4)$$

De forma general, las ecuaciones permiten modelar este tipo de neurona artificial son:

$$F(X) = a_0 x_0 + a_1 x_1 + \cdots + a_{N-1} X_{N-1} + b \qquad (5)$$

$$y_j = (GoF)(X) = \begin{cases} 1, & F(x_i) \in (m_{inf}, m_{sup}); \\ 0, & \text{en otro caso.} \end{cases} \qquad (6)$$

La ecuación (5) describiría el proceso de la asignación de los pesos en la sinapsis y de la suma de señales en el soma, mientras que la ecuación (6) corresponde a la función de activación, donde el umbral está definido por las cotas m_{inf}, m_{sup}.

ISSN en trámite

Existen 3 formas directas de modificar el resultado de este grupo de ecuaciones, la primera es modificando los valores de lo pesos $a_0, a_1 \ldots a_n$, la siguiente es semejante y consiste en variar el valor de h, la cual afecta de manera proporcional sumando una constante al valor de las entradas y el tercer método consiste en variar el umbral de activación, donde se puede definir un umbral con valores negativos, positivos e incluso aumentar o disminuir el tamaño del mismo.

La respuesta de estas funciones se representa en la figura 5, donde se muestra los posibles valores que pueden tomar (5) y (6) para un caso hipotético, en a) observamos como las señales de entrada tienen un peso diferente y como está definido el umbral de acción, se observa como la magnitud de algunas de las entradas están dentro del umbral de acción, posteriormente en b) como cada de una de los pulsos que caen dentro del umbral generan un valor de 1 en la salida, mientras que para los demás casos un 0.

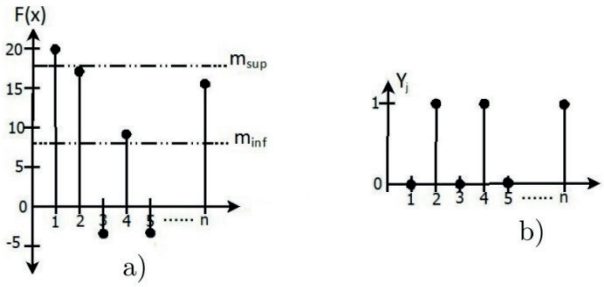


Fig. 5. a) Representación gráfica de las entradas y el umbral de acción, b) Representación gráfica de las salidas.

3. DESARROLLO

Para la ecuación (5) se propone el diseño de un amplificador operacional en modo sumador inversor, como el que se muestra en la figura 6. Este diseño permite controlar las ganancias de cada una de las entradas, mediante la relación de las resistencias de entrada y de referencia como se muestra en la siguiente ecuación.

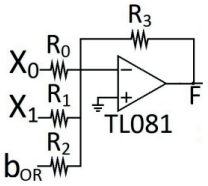


Fig. 6. Circuito que asigna los pesos de las señales y simula la función del soma en una neurona.

$$F(X) = -\frac{R_3}{R_0}x_0 - \frac{R_3}{R_1}x_1 - \frac{R_3}{R_2}b \qquad (7)$$

Donde

$a_0 = -\frac{R_3}{R_0}$, $a_1 = -\frac{R_3}{R_1}$ y $a_b = -\frac{R_3}{R_2}$.

Para el circuito de la ecuación (6), se utilizan un par de amplificadores operacionales en modo de circuito ventana, como el diseño que se muestra en la figura 7, este tiene 4 entradas que son los valores de las cotas superior e inferior del umbral de acción, la señal (F) que está dada por la ecuación (6) y un voltaje de referencia V que se dejara fijo en 5V. De esta forma, cuando el valor de la señal F este dentro del umbral de acción a la salida se presentará un valor de 5V y 0 para el caso contrario.

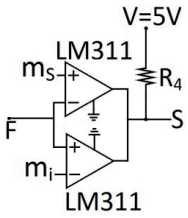


Fig. 7. Circuito que define el umbral de operación y emula la función de activación en la neurona.

Una Unidad Lógica Aritmética (Arithmetic Logic Unit - ALU) es un circuito digital que es capaz de realizar operaciones aritméticas, como lo son la suma y resta; además de poder llevar a cabo operaciones lógicas como lo son los operadores AND, OR y XOR. De esta forma es que se pueden definir diversos tipos de ALU, aumentando o disminuyendo el total de funciones que estas puedan desempeñar, y de igual forma el número de señales de entrada y salida que estas puedan contener.

Para este trabajo de investigación, el modelo que se contempla corresponde al que se presenta en la figura 8, donde se aprecia un ALU don una resolución de dos bits, además de un bit de acarreo de entrada y otro de salida. Es así que en la tabla uno se presentan las funciones lógicas que este sistema contempla, mientras que, de forma semejante, en la tabla 2 se presentan las funciones aritméticas que contempla.

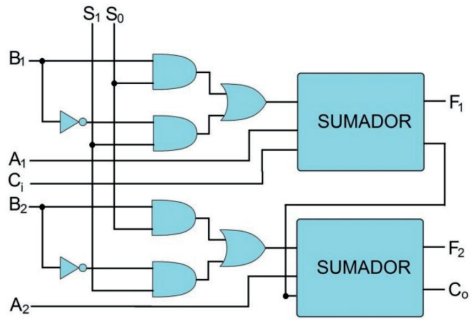


Fig. 8. Diagrama de ALU de dos bits de resolución, con bit de acarreo de entrada y bit de acarreo de salida.

ISSN en trámite

Tabla 1. Funciones Lógicas

S_1	S_2	Salida	Función F_i
0	0	$F = A_i+B_i$	OR
0	1	$F = A_i \pm B_i$	XOR
1	0	$F = A_i * B_i$	AND
1	1	$F = A_i'$	NOT

Tabla 2. Funciones Lógicas

S_1	S_2	Cin	N	F	Descripción
0	0	0	0	A	Transferir A
0	0	1	0	A+1	Incrementar A
0	1	0	B	A+B	Sumar A más B
0	1	1	B	A+B+1	Sumar A más B más 1
1	0	0	B'	A+B'	Agregar el complemento de 1 de B a A
1	0	1	B'	A+B'+1	Agregar el complemento de 2 de B a A
1	1	0	Todos uno	A-1	Decrementar A
1	1	1	Todos uno	A	Transferir A

Las simulaciones que se emplearon para este proyecto fueron realizadas en Multisim. Como se puede observar en el diagrama de la figura 8, es necesario implementar un conjunto de compuertas que permitan llevar a cabo el proceso de selección de tal forma que permita diferenciar entre el caso de una función lógica o una función aritmética. En base al esquema propuesto del perceptrón simple, es que se propone el diseño de la figura 9, donde se puede apreciar que el modelo es semejante.

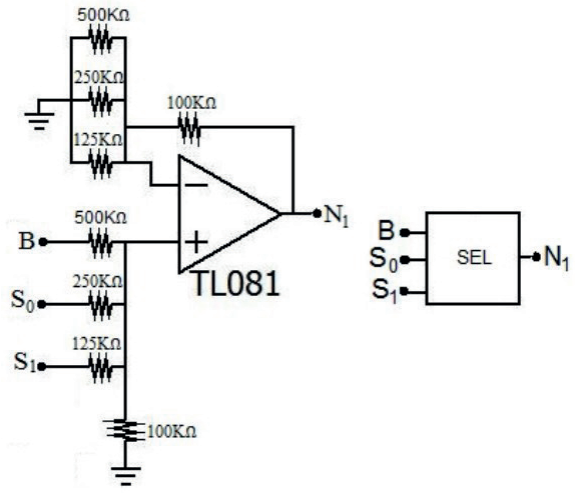


Fig. 9. Diagrama electrónico de la sección uno de selección.

En la figura 10, se presenta la segunda parte del sistema de selección, donde se puede apreciar la inminente semejanza con el circuito de selección de umbral de operación. Cabe mencionar que la tabla de verdad que describe el comportamiento del sistema de selección aritmética se describe en la tabla 3.

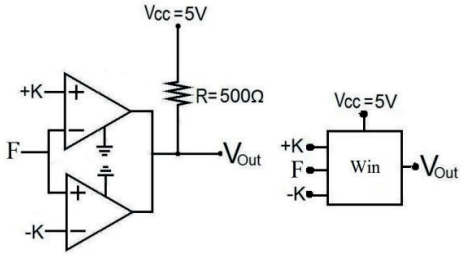


Fig. 10. Diagrama electrónico de la sección dos de selección.

Tabla 3. Tabla de verdad para circuito lógico selector de funciones aritméticas

S_1	S_2	B_i	N_i
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	1
1	1	1	1

En la figura 11 se presenta la respuesta de la primera sección del circuito seleccionador, las regiones en color verde indican los umbrales de acción que seleccionan que niveles activan la salida.

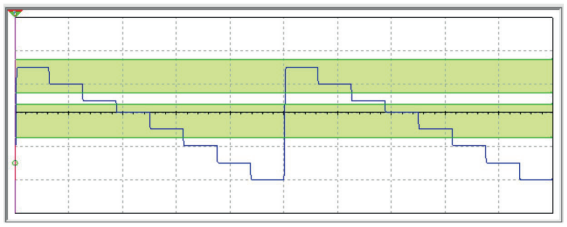


Fig. 11. Respuesta del sistema de selección, regiones de umbral de acción en color verde.

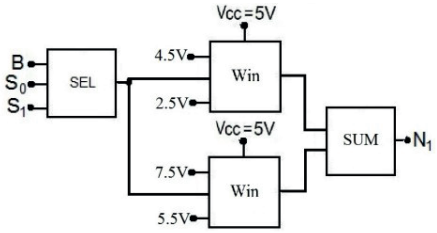


Fig. 12. Diagrama a bloques del circuito selector aritmético completo.

ISSN en trámite

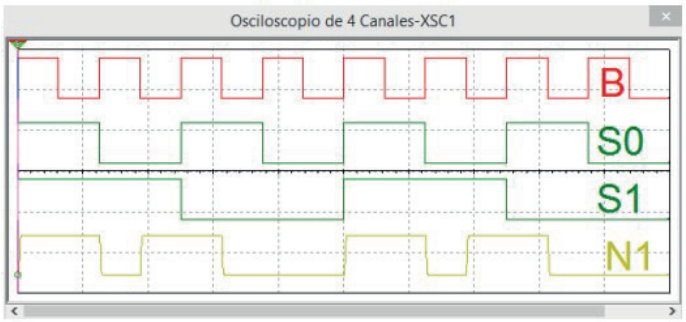


Fig. 13. Respuesta para circuito seleccionador aritmético completo.

Teniendo ya el circuito seleccionador, resta considerar los bits de salida, que en este caso son C_{O1}, F_1 y F_2. Observe que para la obtención de dichos se implementa nuevamente la función representada en la figura 10, siendo de esta forma que se asignan los nuevos umbrales de acción que definen las funciones que se desean obtener en el sistema.

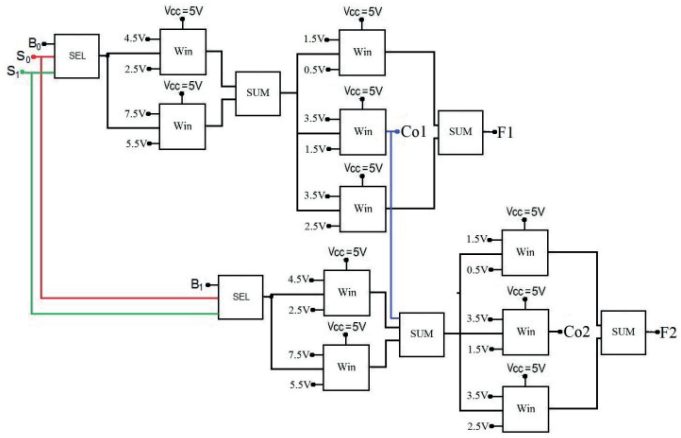


Fig. 14. Diagrama a bloques de un ALU 2 Bit.

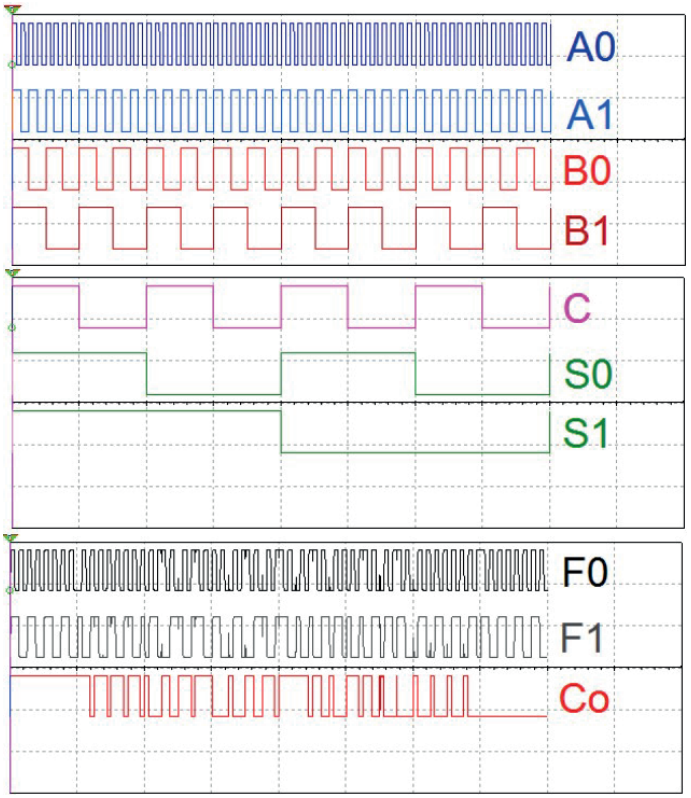


Fig. 15. Respuesta de funciones aritméticas para un ALU 2 Bit.

De esta forma, en la figura 14 se representa el diagrama a bloques completo para el ALU de 2 Bits, mientras que en las figuras 15 y 16 respectivamente se puede constatar las respuestas aritmeticas y logicas para este sistema.

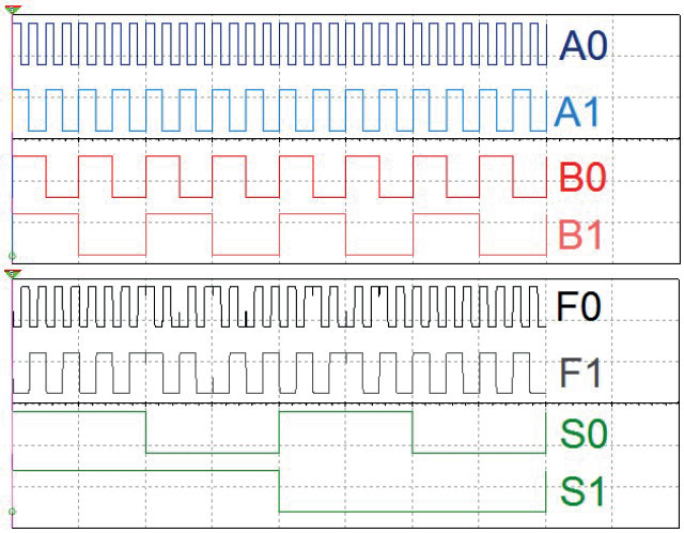


Fig. 16. Respuesta de funciones lógicas para un ALU 2 Bit.

ISSN en trámite

6. CONCLUSIONES

Este modelo de ALU utilizando el esquema básico del perceptrón, permite el manejo de las operaciones aritméticas básicas, además hay que mencionar que la implementación de este circuito no limita su funcionamiento solo al procesamiento de señales digitales, ya que una de sus mayores virtudes radica en el manejo de señales continuas.

Es necesario mencionar que la frecuencia de operación de estos sistemas es cercana al orden de los Giga Hertz, dependiendo del amplificador especifico que se utilice. Las respuestas presentadas en este articulo corresponden al TL081, que de acuerdo con la hoja técnica del fabricante, mantiene un funcionamiento correcto utilizando valores cercanos a los 3MHz.

Cabe denotar que, retomando la parte de la implementación física, se debe mencionar que un sistema como el presentado puede llevarse a cabo ya sea directamente utilizando Amplificadores Operacionales o mediante la configuración de tarjetas FPAA's (Field Programmable Analog Array), donde en ambos casos se presenta un sistema adaptable y que permite un cambio de configuración mediante la variación directa de los voltajes de operación.

Finalmente, es de denotar que, dado que el sistema permite la operación y manejo de señales continuas, esto abre la posibilidad de estudiar más adelante la implementación de circuitos electrónicos que no operen bajo un dominio totalmente binario, es decir, poder realizar circuitos que puedan adaptar modelos de otras bases numéricas.

REFERENCIAS

D. Maliuk, H. Stratigopoulos and Y. Makris, (2010), An analog VLSI multilayer perceptron and its application towards built-in self-test in analog circuits, IEEE 16th International On-Line Testing Symposium, 2010, pp. 71-76.

Geng, C., Sun, Q., & Nakatake, S. (2020). Implementation of Analog Perceptron as an Essential Element of Configurable Neural Networks. *Sensors (Basel, Switzerland)*, *20*(15), 4222.

Hu Hen Yu, Neng Hwang Jenq (2001), Handbook of Neural Network Signal Processing, CRC Press Electrical Engineering & Applied Signal Processing Series.

J. Maher, B. M. Ginley, P. Rocke and F. Morgan, (2006), Intrinsic Hardware Evolution of Neural Networks in Reconfigurable Analogue and Digital Devices, 14th Annual IEEE Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines, 2006, pp. 321-322.

Khuder, A.I., & Husain, S.H. (2013). Hardware Realization of Artificial Neural Networks Using Analogue Devices.

Martínez Álvarez José Javier (2012), Diseño e implementación sobre hardware reconfigurable de una arquitectura para la emulación en tiempo real de redes neuronales, Universidad Politécnica de Cartagena.

R.E. Lozoya-Ponce and I. Campos-Cantón, (2013), Estructura reconfigurable: comparador/multiplexor/demultiplexor. Revista Mexicana de Física 59: 107-116.

Rocke P., McGinley B., Morgan F., Maher J. (2007) Reconfigurable Hardware Evolution Platform for a Spiking Neural Network Robotics Controller. Lecture Notes in Computer Science, vol 4419. Springer, Berlin, Heidelberg.

S. Abden and E. Azab, (2020), Multilayer Perceptron Analog Hardware Implementation Using Low Power Operational Transconductance Amplifier, 32nd International Conference on Microelectronics (ICM), 2020, pp. 1-4.

W. Liu, Z. Li, S. Xue, X. Yang and W. Lin, (2018), Training an Artificial Neural Network with Op-amp Integrators Based Analog Circuits, IEEE CSAA Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC), pp. 1-6.

McCulloch, W.S., Pitts, W. (1943), A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics* **5,** 115–133.

Zhu Jihan, Sutt Peter (2003), FPGA Implementations of Neural Networks a Survey of a Decade of Progress, 13th International Conference, FPL.

Estudio de un Inversor para la Alimentación de un Motor Reciprocante Magnético

Carlos E. Domínguez Hernández, **Mario Ponce Silva, ***Jarniel García Morales, * Manuel Adam Medina, ****Christian Ríos Enríquez**

*Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Morelos, México; email:

m20ce015@cenidet.tecnm.mx

**Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Morelos, México; email:

Mario.ps@cenidet.tecnm.mx

***Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Morelos, México; email:

Jarniel.gm@cenidet.tecnm.mx

****Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Morelos, México; email:

Manuel.am@cenidet.tecnm.mx

****Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Morelos, México; email:

D17CE066@cenidet.tecnm.mx

Resumen: En el presente artículo se muestra el estudio de un inversor para la alimentación de un motor reciprocante magnético (MRM), este motor aprovecha la estructura del motor de combustión interna (MCI), pero funciona por la repulsión de campos magnéticos entre un electroimán y un imán permanente, el cual está colocado sobre el pistón. Actualmente no se ha detallado la forma de alimentación, el cómo impacta en su funcionamiento y eficiencia. En este trabajo se presenta una forma de alimentación al motor reciprocante magnético donde una primera simulación se realizó para entrega una potencia de 800w a 7.8A, 130V y una segunda a 15A a 230V. Además de comprobar la velocidad desarrollada del motor con estos valores de corriente.

Palabras clave: Motor Reciprocante Magnético, Inversor puente H

1. INTRODUCCIÓN

El automóvil es el medio de transporte terrestre más usado por el ser humano. La industria automotriz y las industrias que la sirven, constituyen una parte muy importante de la economía mundial (Hota et al., 2015, Eapen et al., 2014). Actualmente la mayoría de los vehículos utilizan un Motor de Combustión Interna (MCI), este motor endotérmico está basado en el mecanismo pistón-biela-manivela, también conocido como tren alternativo, y nace a finales del siglo XIX como alternativa a las máquinas de vapor para propulsar vehículos ligeros de transporte terrestre. La principal fuente de energía de los automóviles es combustible fósil (gasolina y diésel) derivado del petróleo. Los gases que emiten los motores de combustión interna contribuyen a los altos niveles de contaminación que se presentan en la actualidad, así como también están contribuyendo al calentamiento global. Ante este escenario las energías renovables han demostrado ser las mejores aliadas para afrontar la problemática de emisiones contaminantes provocada por motores de combustión interna(Zhao et al., 2018) No obstante, introducir energías limpias a nuestro sistema energético actual es muy complicado debido a los intereses económicos que existen de por medio. Actualmente se han presentado nuevas alternativas, tales como los autos híbridos y eléctricos que parecen ser la respuesta al gran problema del uso de motores de combustión interna (Crolla and Mashadi, 2011a, Rahman et al., 2017) sin embargo son costos y solo una parte muy reducida de la población tiene acceso a esta tecnología y por consecuencia los autos tradicionales siguen dominando el mercado.

Es por ello que las investigaciones se enfocan en obtener la máxima eficiencia de los MCI y reducir los niveles de contaminación que aporta al medio ambiente, para alcanzar los objetivos los investigadores han agregado más sensores y actuadores al motor con el fin de monitorear más variables para sus estrategias de control y poder cumplir con las normativas ambientales. Con la metodología de alimentación el funcionamiento del motor será a 800w.

ISSN en trámite

2. FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR

El MRM tiene el mismo principio de funcionamiento que un motor de combustión interna, es decir se apoyan en el mecanismo Pistón-Biela-Manivela, la diferencia es que mientras el MCI utiliza combustible fósil (Gasolina o diésel), el MRM utiliza energía eléctrica que genera campos magnéticos para generar la repulsión entre el electroimán (Actuador magnético) y el pistón sobre el cual se coloca un imán permanente de neodimio. Este movimiento lineal se convierte en un trabajo rotacional gracias al mecanismo Manivela-Biela-corredera.

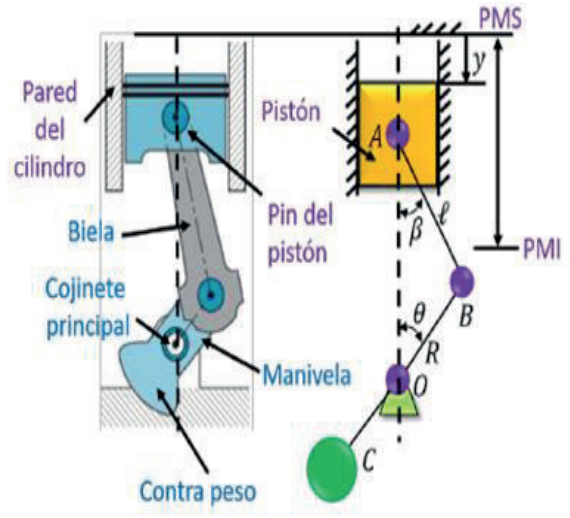


Fig. 1 Mecanismo Biela-Manivela

El modelo cinemático de un motor mono cilíndrico es la del mecanismo de manivela deslizante (Crolla and Mashadi, 2011b) donde el desplazamiento del pistón es relativo al punto muerto superior y el punto muerto inferior. El radio de la manivela es R y la longitud de la biela entre los puntos A y B es "l"

$$y = L - R\cos\theta - lsen\beta \tag{1}$$

"y" es la posición del pistón y θ el Angulo de la manivela. Al derivar la posición del pistón se obtiene su velocidad Ec. (2) y al derivar la velocidad del desplazamiento del pistón obtenemos su aceleración Ec. (3).

$$V_p = \frac{dy}{dt} \tag{2}$$

$$a_p = \frac{d^2y}{dt^2} \tag{3}$$

Al derivar la Ec.(1) con respecto al tiempo conducirá a ecuaciones para la velocidad y la aceleración del pistón en las siguientes formas:

$$v_p = k_v R\omega_e \tag{4}$$

$$a_p = k_v R\alpha_e + k_a R\omega_e^2 \tag{5}$$

En la que ω_e y α_e son la velocidad angular y la aceleración del motor, respectivamente, k_a y k_v se obtienen con las siguientes ecuaciones:

$$k_v = sen\theta + \frac{R}{2l} \tag{6}$$

$$k_a = \cos\theta + \frac{R}{l}\left(\frac{\cos 2\theta}{\cos\beta}\right) + \left(\frac{R}{l}\right)^3 \cdot \frac{sen^2 2\theta}{4\cos^3\beta} \tag{7}$$

Para encontrar el valor de β se aplica la ecuación:

$$\beta = sen^{-1}\left(\frac{R}{L}\right)sen\theta \tag{8}$$

3 ALIMENTACIÓN DEL MRM

Para el funcionamiento por atracción y repulsión del motor reciprocante magnético, se requiere el cambio en la polaridad del voltaje en la carga (actuador magnético-bobina) y debido a la alta potencia entregada(800w) la topología de inversor seleccionada es un puente H, se modelo el electroimán como una carga R-L Fig.2 se aplica el siguiente análisis (Ponce-Silva et al., 2018).

ISSN en trámite

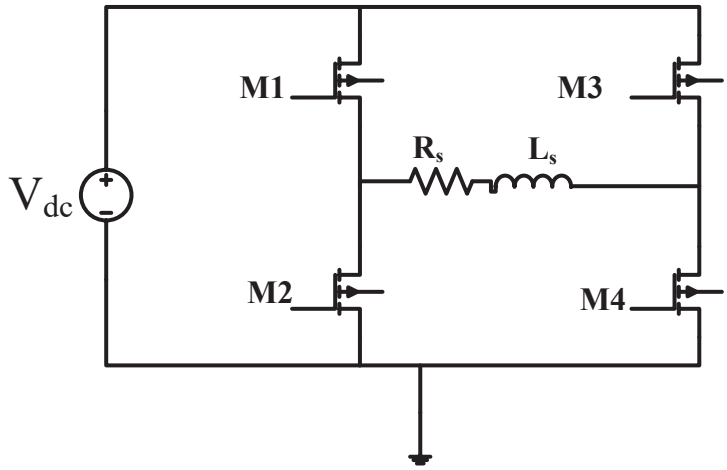


Fig. 2 Inversor puente H con carga R-L

Donde el circuito simplificado queda de la siguiente forma

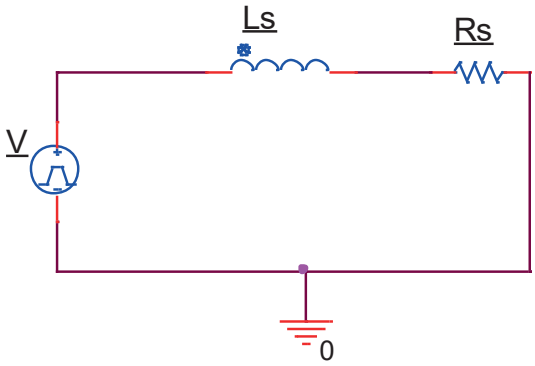


Fig. 3 Circuito R-L(electroimán)

Aplicando la ley de voltaje de Kirchhoff se obtiene la siguiente expresión.

$$L_s \frac{di_{Ls}(t)}{dt} + R_{\text{inductor}} i_{Ls}(t) - v_{in}(t) = 0 \qquad (9)$$

Donde $v_{in}(t)$

$$v_{in}(t) = \begin{cases} V_{in} & 0 \le t \le T/2 \\ 0 & T/2 \le t \le T \end{cases} \qquad (10)$$

La Ec. (9) tiene las siguiente soluciones

(11)

Donde V_{in} es el valor máximo de $v_{in}(t)$, T es el periodo de la señal en estado estacionario I_O es el valor de la corriente durante la transición de positivo a negativo del voltaje $V_{in}(t)$ y es el valor máximo de la corriente i_{Ls}por lo tanto

$$I_O = i_{Ls}\left(\frac{T}{2}\right) \qquad (12)$$

τ (constante de tiempo) se obtiene mediante la Ec. (13)

$$\tau = \frac{L_s}{R_{inductor}} \qquad (13)$$

De la expresión anterior se observa que la función depende de la constante de tiempo tao, con el propósito de simplificar la ecuación se añade una constante k, al darle valores grandes a k se obtiene una señal casi cuadrada de corriente, lo que indica que el medio período se alcanza en k veces. Sustituyendo Ec. (12) en Ec. (13) se tiene.

$$I_o = c\frac{V_{in}}{R_{inductor}} \qquad (14)$$

Donde la constante c es:

$$c = \frac{1 - e^{-k}}{1 + e^{-k}} \qquad (15)$$

4 POTENCIA ENTREGADA AL ELECTROIMÁN

Considerando un comportamiento resistivo por parte del inductor, la potencia promedio entregada se puede expresar de la siguiente forma.

$$P = I_{Lrms}^2 R_{\text{inductor}} \qquad (16)$$

Donde I_{Lrms} representa la corriente RMS la cual se puede calcular con la siguiente expresión, considerando par la señal de corriente:

$$I_{Lrms^2} = \frac{2}{T}\int_0^{T/2} \left(I_{Ls}(t)\right)^2 dt \qquad (17)$$

Sustituyendo Ec. (11) en Ec. (17) y se obtiene la Ec. (18)

ISSN en trámite

$$I_{Lsrms^2} = \frac{2V_{in}^2}{TR_{inductor}^2}\left[\begin{array}{l}\frac{T}{2}+2(1+c)\frac{L_s}{R_{indcutor}}\left(e^{-\frac{T}{2\tau}}-1\right)\\ -\frac{L_s}{2R_{inductor}}(1+c)^2\left(e^{-\frac{T}{\tau}}-1\right)\end{array}\right] \quad (18)$$

Para simplificar el análisis se añade una constante "a" en función de "c" y "k"

$$a=\left[\frac{1}{2}+\frac{(1+c)}{k}(e^{-k}-1)-\frac{1}{4k}(1+c)^2\left(e^{-2k}-1\right)\right] \quad (19)$$

Por lo tanto

$$I_{Lsrms}^2 = \frac{V_{in}^2}{R_{inductor}^2}[a] \quad (20)$$

Al sustituir Ec. (20) en Ec.(16) podemos obtener $V_{in}(t)$ como se muestra en la Ec . (21), donde P es la potencia entregada al electroimán y es una especificación de diseño.

$$V_{in} = \frac{\sqrt{R_{inductor}P}}{2\sqrt{a}} \quad (21)$$

El valor de la inductancia se determina mediante la Ec. (22);

$$L_s = \frac{R_{inductor}}{2kf} \quad (22)$$

Donde f es la frecuencia de operación del convertidor en Hz

5. PÉRDIDA POR CONDUCCIÓN DE LOS MOSFET

Las pérdidas por conducción se producen al encendido del MOSFET, dependen de la R_{ON} y la corriente que pasa a través del MOSFET, está perdida se puede calcular por métodos dependientes del tiempo (Glitz and Ordonez, 2019) o empleando la definición de potencia (Ahmed et al., 2019) considerando constante la Ron, para este análisis se usará la definición de potencia,

$$P_{c(MOSFET)} = \int_{t1}^{t2} I_{rms}^2 R_{D(ON)} dt \quad (23)$$

De acuerdo a (Glitz and Ordonez, 2019) la frecuencia influye en las pérdidas por conducción por lo cual se agregan a la Ec. (23) y resulta la Ec. (24)

$$P_{c(MOSFET)} = f_{sw}\int_{0}^{\frac{1}{2f_{sw}}} I_{rms}^2 R_{D(ON)} dt \quad (24)$$

El valor de IRMS se puede calcular por medio de la Ec. (27)

$$I_{rms}^2 = \frac{1}{T}\int_0^T i(t)^2\, dt \quad (25)$$

Sustituyendo el resultado de la Ec. (25) en la Ec. (24) se obtiene la Ec. (26);

$$I_{rms}^2 = \frac{I_p^2}{2} \quad (26)$$

Así finalmente las pérdidas en los MOSFET se pueden aproximar por la Ec. (27).

$$P_{C(MOSFET)} = \frac{I_p^2 R_{D(ON)}}{4} \quad (27)$$

Las pérdidas por conmutación se desprecian pues se trabajará a una muy baja frecuencia.

6. RESULTADOS

Tabla 1 Especificaciones de diseño

Potencia	800w
Frecuencia	33.33Hz
Resistencia del electroimán	17Ω
k	10
L	25.5mH
C	0.99
a	0.800
Voltaje de entrada	130.38V

En la Fig. 4 se observa el comportamiento de la corriente que es entregado a la carga cuando la corriente es positiva se genera un campo magnético de atracción y cuando la corriente es negativa se está en modo de repulsión entre el electroimán y el imán permanente.

ISSN en trámite

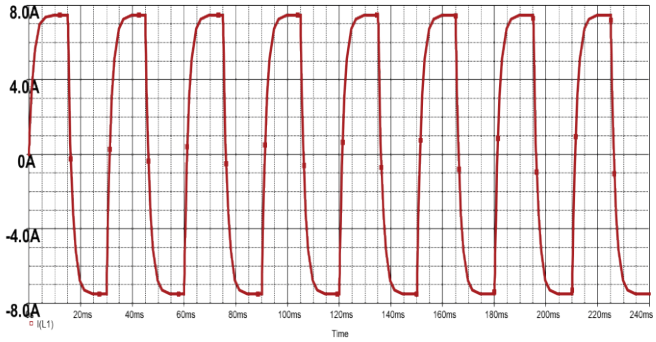


Fig. 4 Corriente en la carga 7.8A

La potencia consumida por el MOSFET se muestra en la Fig. 5 se puede observar que las pérdidas son bajas, esto debido a la baja potencia que pasa a través de los semiconductores.

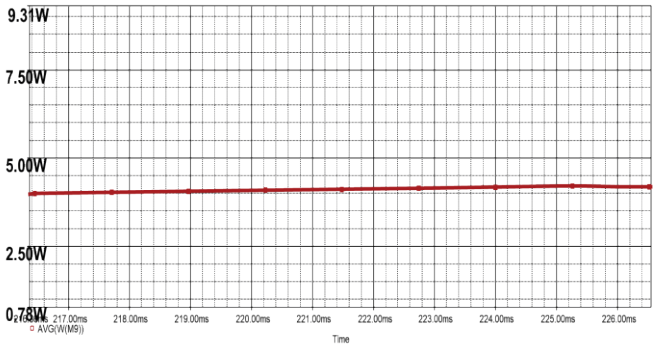


Fig. 5 Pérdida en el MOSFET

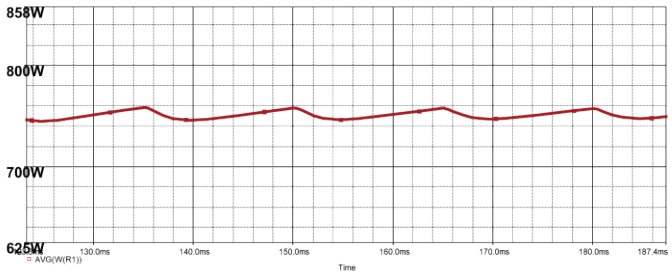


Fig. 6 Potencia entregada a la carga

Para evaluar el impacto de un incremento de corriente en el inversor y en la velocidad desarrollada por el motor, se incrementó la corriente a 15A

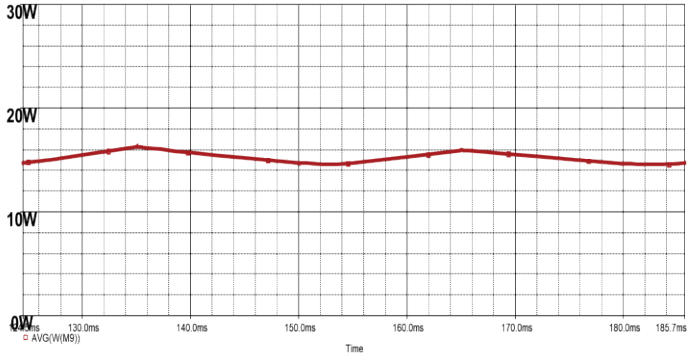


Fig. 7 Pérdida en el MOSFET con 15A

Como se observa en la Fig. ***4*** la corriente es casi cuadrada, esto se debe al valor del factor *k* que se le dio, las perdidas en los MOSFET son de menos de 2w y la potencia entregada Fig. *6* es de 792w

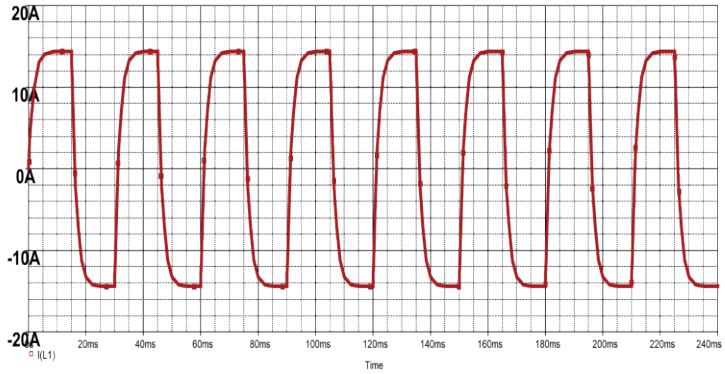


Fig. 8 Corriente en la carga 15A

Se apoyó en el modelo matemático presentado en el trabajo *"Modeling and simulation of an electromagneticreciprocating engine"* enviado para su publicación, en la Tabla 2 se observa que la velocidad máxima alcanza con 7.8A es de 793rpm, teniendo como mejor ángulo de energización entre 1°-5° después del PMS. Para la simulación del modelo matemático se consideran los siguientes parámetros.

Tabla 2 Parámetros de simulación del motor

Parámetro	Descripción	Valor
l	Longitud de la biela	0.06272 m
R	Longitud de la manivela	0.012 m
m_p	Masa del pistón	0.025 kg
m_R	Masa de la biela	0.023 kg

ISSN en trámite

N	Numero de vueltas del electroimán		660

Tabla 3 Velocidad obtenida con 7.8A

Ángulo de energización (θ)	Par medio(Nm)	Velocidad angular media(RPM)	Máxima fuerza ejercida
1°	0.1102	793	329
2°	0.1102	784	328
3°	0.1104	781	327
5°	0.1078	767	325
10°	0.1	715	313
15°	0.087	619	299
20°	0.070	491	279
25°	0.0486	344	255
30°	0.0245	180	232
31°	0.0175	128	227

Se observa que la fuerza generada por el electroimán decae cuando los ángulos de energización se hacen más grandes, esto se debe a que la distancia en el pistón y el electroimán también se hace más grande, afectando la fuerza generada. Si se quiere tener la mayor velocidad se debe energizar el motor en 1°, pero si se quiere mayor torque debe ser en el rango de 3°-5°.

Tabla 4 Velocidad desarrollada con 15A

Ángulo de energización (θ)	Par medio(Nm)	Velocidad angular media(RPM)	Máxima fuerza ejercida
1°	0.3364	2409	1026
2°	0.3344	2335	1024
3°	0.3365	2370	1021
5°	0.3296	2299	1014
10°	0.3067	2122	980
15°	0.2592	1873	933
20°	0.2074	1457	867
25°	0.137	1014	799
30°	0.0765	533	724
31°	0.02921	213	680

En la Fig. *7* se muestra la forma de onda de corriente a 15A, se aprecia que la forma cuadrada se mantiene, mientras que en la Fig. *8* las perdidas en los MOSFET se incrementan a casi 20w y la **Tabla *4*** muestra que la máxima velocidad desarrollada es de 2409 manteniéndose el ángulo de energización entre 1°-5°.

7. CONCLUSIÓN

El MRM tiene la ventaja de aprovechar la estructura de un motor de combustión interna, realizando algunas modificaciones se puede tener un motor que funciona por repulsión de campos magnéticos, sin embargo, la alimentación de este motor presenta un reto

Observación 1: los ángulos para este motor se encuentran entre 1°-5° cercano al PMS, es decir cuando el pistón esta lo más cercano el electroimán.

Observación 2: El valor de corriente aumenta si las RPM desarrolladas se incrementan.

Observación 5: Al aumentar la corriente para desarrollar una mayor fuerza, torque e incrementar la velocidad, las pérdidas por calor en el electroimán y por conducción también aumentan y eso afecta la eficiencia del motor.

Referencias

AHMED, M. H., WANG, M., HASSAN, M. A. S. & ULLAH, I. J. I. A. 2019. Power loss model and efficiency analysis of three-phase inverter based on SiC MOSFETs for PV applications. **7**, 75768-75781.

CROLLA, D. & MASHADI, B. 2011a. Vehicle Power train systems. *John Wiley*.

CROLLA, D. & MASHADI, B. 2011b. *Vehicle powertrain systems*, John Wiley & Sons.

EAPEN, A. J., VARUGHESE, E., ARUN, T. & ATHUL, E. 2014. Electromagnetic Engine. *Technology*, 2319-1163.

GLITZ, E. S. & ORDONEZ, M. J. I. T. O. P. E. 2019. MOSFET power loss estimation in LLC resonant converters: Time interval analysis. 34, 11964-11980.

HOTA, P., RATHORE, M. & SHAIKH, S. 2015. Magnetic repulsión piston engine. *Research,* 4, 338-344.

ISSN en trámite

PONCE-SILVA, M., AQUI-TAPIA, J. A., OSORIO, R. & LOZOYA-PONCE, R. E. J. I. T. O. P. E. 2018. Starting Circuit Adapted to Stabilize HID Lamps and Reducing the Acoustic Resonances. 34**,** 7914-7921.

RAHMAN, A., RAHMAN, M. & KARIM, A. 2017. The theory of the development pf an electromagnetic engine for automative use. 2**,** 1-8.

ZHAO, J., HAN, B. & BEI., S. 2018. Electromagnetic properties analysis on hybrid-drived system of electromagnetic motor. *IOP conference Series: Earth and Environmental Science* 108.

ISSN en trámite

Modelado de Sistemas Multi-Agente para el Problema de Transporte Aéreo con Carga Suspendida

Flores M. Rogelio * **García B. C, Daniel.** *
Valencia P. Guillermo **

* *Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Palmira, 62490, Cuernavaca, Morelos, México (e-mail: rogelio.flores@cenidet.edu.mx).*
** *Instituto Tecnológico de Hermosillo, Av. Tecnológico S/N, El Sahuaro, 83170, Hermosillo, Sonora, México, (e-mail: chinovp@gmail.com)*

Resumen
El objetivo de este artículo es el modelado matemático para el transporte aéreo de carga suspendida por medio de cables utilizando multi-rotores UAV (Por sus siglas en ingles Unmanned Aerial Vehicle). Para ello, cada UAV, se considera un agente con lo que se obtiene un modelo del sistema utilizando el método Udwadia-Kalaba para un número arbitrario de UAV y una carga suspendida con cables. Este método conduce a un nuevo modelo de sistema de multi-agentes con interacciones entre agentes vecinos y no vecinos. Con el fin de desarrollar algoritmos de control cooperativo para la asignación de tareas a múltiples UAV, el objetivo principal es transportar una carga suspendida de forma segura con un mínimo de oscilación. Los resultados de la simulación se presentan para verificar el modelo con el enfoque propuesto para diseñar leyes de control de consenso que se puedan aplicar para mantener la formación de los agentes y para guiar la carga en la dirección deseada.

Keywords: Ecuación Udwadia-Kalaba, Sistemas Multi-Agente, Transporte de carga suspendida.

1. Introducción

Los multi-rrotores, son helicópteros con tres, cuatro, seis, ocho rotores, etc. Estos están colocados a la misma distancia del centro de masa del UAV, se controlan ajustando sus velocidades angulares, consiguen la sustentación debido a las hélices que llevan incorporadas en los extremos de cada brazo y permanecen suspendidos sobrevolando en un mismo sitio. Incluye cinco componentes esenciales (aeronave, carga de pago, sistema de control, estación de control y equipo soporte) divididos en dos segmentos (aire y tierra). El concepto de dinámica con restricciones de sistemas multicuerpos plantea diferentes desafíos de modelado, y la elección del método es crucial según el propósito del modelado matemático. Al modelar con fines de estudios de simulación, se suponen dos casos, el primero requiere un modelo detallado y realista, el segundo propone un modelo para diseño de control, donde se consideran las dinámicas más importantes. Para el próposito de este trabajo se aborda el primer caso. Existen diferentes técnicas, pero las principales diferencias dependen de cómo encontrar las fuerzas de restricción explícitamente. El transporte aéreo de carga es una aplicación interesante de los UAV [Lee (2017)]. El transporte con un UAV tiene algunas restricciones debido a la carga y el peso, la falta de confiabilidad y la oscilación. El balanceo, especialmente para cargas suspendidas con un cable, es un problema de interés para los investigadores; un enfoque alternativo es utilizar múltiples UAV. Esto requiere algoritmos de control cooperativo [Tartaglione et al. (2017)], que dependen significativamente de los modelos dinámicos y los métodos utilizados para el modelado del sistema [Klausen et al. (2017)]. Los métodos de modelado se basan en el principio del trabajo virtual introducido por D'Alembert en 1743 [Li Y (2016)] y la formulación de Lagrange. El principio de restricción mínima de Gauss es importante para el modelado de sistemas dinámicos. Con base en esto, se han aplicado métodos como el de lagrange para modelar estos sistemas. Sin embargo, el modelado de carga suspendida con diferentes configuraciones de agentes conduce a ecuaciones complejas y, por lo tanto, la formulación lagrangiana no es adecuada para esta tarea. El método de [Udwadia and Kalaba (1992)] brinda la posibilidad de encontrar primero la dinámica sin restricciones de los diferentes agentes y luego encontrar la dinámica restringida, así como calcular las fuerzas de restricción directamente.

ISSN en trámite

2. Preliminares

2.1 Modelo matemático de agentes

Existen muchos modelos matemáticos que pueden explicar el comportamiento de los agentes en sistemas multiagente: integrador simple, integrador doble, modelos en espacio de estado lineales y no lineales [Semsar-Kazerooni and Khorasani (2012)]. En este artículo, después de algunas modificaciones descritas, reducimos el modelo de los agentes a un doble integrador descrito por

$$\begin{aligned}\dot{\xi}_\mathbf{i} &= \mathbf{v_i}\\ \dot{\mathbf{v}}_\mathbf{i} &= \mathbf{u_i}\end{aligned} \tag{1}$$

donde $i \in 1,,N$, ξ_i es la posición, v_i la velocidad y u_i la entrada de control del agente i. El modelo de doble integrador se ha utilizado en muchos estudios [Liang et al. (2013), Barve and Nene (2013)].

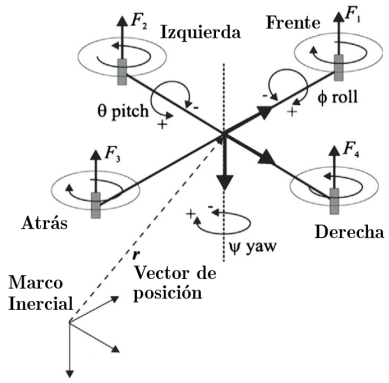


Figura 1. Fuerzas y momentos de un quad-rotor.

2.2 Modelo de un Quad-rotor

La Figura 1 muestra un quad-rotor y sus fuerzas, ϕ, θ y ψ son ángulos de alabeo, cabeceo y guiñada, respectivamente. La dinámica no lineal se puede describir en forma de espacio de estados como en [Bouabdallah (2007)]:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{f}(\mathbf{X}, \mathbf{U}) \tag{2}$$

donde U y X son los vectores de entrada y estado, seleccionados como:

$$\mathbf{X} = [\phi \;\; \dot{\phi} \;\; \theta \;\; \dot{\theta} \;\; \psi \;\; \dot{\psi} \;\; \mathbf{z} \;\; \dot{\mathbf{z}} \;\; \mathbf{x} \;\; \dot{\mathbf{x}} \;\; \mathbf{y} \;\; \dot{\mathbf{y}}] \tag{3}$$

$$\mathbf{U} = [\mathbf{u_1} \;\; \mathbf{u_2} \;\; \mathbf{u_3} \;\; \mathbf{u_4}] \tag{4}$$

Además, la dinámica no lineal del quad-rotor se describe mediante la función no lineal f como:

$$f(X,U) = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta}\dot{\psi}a_1 + \dot{\theta}a_2\Omega_r + b_1u_2 \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi}\dot{\psi}a_3 + \dot{\phi}a_4\Omega_r + b_2u_3 \\ \dot{\psi} \\ \dot{\theta}\dot{\psi}a_5 + b_3u_4 \\ \dot{z} \\ g - \dfrac{cos(\phi)cos(\theta)u_1}{m} \\ \dot{x} \\ \dfrac{u_x u_1}{m} \\ \dot{y} \\ \dfrac{u_y u_1}{m} \end{bmatrix} \tag{5}$$

Donde

$$\begin{aligned} u_x &= cos(\phi)sin(\theta)cos(\phi) + sin(\phi)sin(\psi)\\ u_y &= cos(\phi)sin(\theta)cos(\phi) + sin(\phi)cos(\psi)\end{aligned} \tag{6}$$

ϕ, θ y ψ son los ángulos de Euler con respecto a los ejes xyz; x y z son las coordenadas del quad-rotor con respecto a los ejes xyz (sistema no restringido); u_1, u_2, u_3, u_4 se utilizan para el control de altitud, ϕ, θ y ψ, respectivamente; m es la masa del quad-rotor; g es la constante gravitacional; y $cos(\cdot)$ y $sin(\cdot)$, representan la función coseno y seno, respectivamente. Los coeficientes a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, b_1 b_2 y b_3 son constantes. Además, Ω_r es la velocidad total de las hélices del quad-rotor, obtenida por

$$\Omega_r = -\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4 \tag{7}$$

donde Ω_i es la velocidad de la i-ésima hélice y

$$\begin{aligned}\Omega_1^2 &= \frac{1}{4b}u_1 + \frac{1}{2b}u_3 - \frac{1}{4d}u_4\\ \Omega_1^2 &= \frac{1}{4b}u_1 - \frac{1}{2b}u_2 + \frac{1}{4d}u_4\\ \Omega_1^2 &= \frac{1}{4b}u_1 - \frac{1}{2b}u_3 - \frac{1}{4d}u_4\\ \Omega_1^2 &= \frac{1}{4b}u_1 + \frac{1}{2b}u_2 - \frac{1}{4d}u_4\end{aligned} \tag{8}$$

Aquí, b y d son coeficientes de empuje y arrastre, respectivamente.

3. Modelado del sistema para transporte aéreo

En esta sección, se discute el modelado de múltiples quad-rotores con una carga suspendida (ver Figura 2). Primero, se presenta el modelo de un quad-rotor desde el enfoque Newton-Euler. Por último, se utiliza el método Udwadia-Kalaba para modelar la carga suspendida de los quad-rotores. Además, se utiliza un quad-rotor para esta tarea, aunque, en general, cualquier configuración de UAV se puede ser utilizada.

ISSN en trámite

3.1 Sistema Aéreo Estabilizado

La estabilidad del sistema aéreo (SAE) hace que un quad-rotor sea estable, es decir, mantiene su altitud generando entradas de control adecuadas. Para realizar esta tarea se diseñó un controlador proporcional-derivativo (PD) para la estabilización de cada UAV. Este controlador se puede describir como,

$$\begin{aligned} u_1 &= 1 - \frac{mz}{cos(\phi)cos(\theta)} \\ u_2 &= k_{p\phi}(\phi_d - \phi) - k_{d\phi}\dot{\phi} \\ u_3 &= k_{p\theta}(\theta_d - \theta) - k_{d\theta}\dot{\theta} \\ u_3 &= k_{p\psi}(\psi_d - \psi) - k_{d\psi}\dot{\psi} \end{aligned} \tag{9}$$

donde, ϕ_d, θ_d y ψ_d son los ángulos deseados con respecto a los ejes xyz; $k_{p\phi}$, $k_{p\theta}$, $k_{p\psi}$, $k_{d\phi}$, $k_{d\theta}$ y $k_{d\psi}$ son ganancias proporcionales y derivativas, respectivamente para ϕ, θ y ψ. Las ganancias del controlador se seleccionan tal que, z, ϕ, θ y ψ sean asintóticamente estables. Tenga en cuenta que $\psi_d = 0$. Con esta condición, el movimiento a lo largo de x y y se controla mediante θ y ϕ. Se desea que ϕ, θ y ψ converjan en ϕ_d, θ_d y 0, respectivamente. Entonces, (5) y (6) implican que,

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= -\frac{cos(\phi_d)sin(\theta_d)u_1}{m} \\ \ddot{y} &= \frac{sin(\phi_d)u_1}{m} \\ \ddot{z} &= g - \frac{cos(\phi_d)u_1}{m} \end{aligned} \tag{10}$$

donde u_1, ϕ_d y θ_d se pueden considerar como entradas de control. Por lo tanto, (10) se puede reescribir como,

$$\underbrace{\begin{aligned} \ddot{x} &= u_x(\phi_d, \theta_d, u_1) \\ \ddot{y} &= u_y(\phi_d, u_1) \\ \ddot{z} &= u_z(\phi_d, u_1) \end{aligned}}_{\ddot{q}_u} \tag{11}$$

este modelo tiene la forma de un sistema de doble integrador.

3.2 Método de Udwadia-Kalaba

El método se presenta en [Udwadia and Kalaba (1992)], y se aplica en sistemas multi-agentes aéreos que transportan una carga suspendida, entre otros, [Martina Lippi (2018)] y [Kristian Klausen (2014)]. La siguiente sección resumirá la derivación presentada en estos artículos. El sistema newtoniano dinámico no restringido se da como,

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}_\mathbf{u} = \mathbf{F} \tag{12}$$

donde la matriz de masas $\mathbf{M} \in \mathbf{R^{n \times n}}$ es simétrica y definida positiva y $\mathbf{F} \in \mathbf{R^n}$ son las fuerzas generalizadas aplicadas sobre el sistema.

Entonces, si se establece que el sistema está sujeto a m restricciones linealmente independientes en la forma,

$$\mathbf{A}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{t})\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{b}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{t}) \tag{13}$$

donde las matrices de restricción $\mathbf{A} \in \mathbf{R^{n \times m}}$ $\mathbf{b} \in \mathbf{R^m}$ son conocidas. Al aplicar la ecuación (13), el sistema explícito se ve afectado por las restricciones de las fuerzas generalizadas $\mathbf{F_c} \in \mathbf{R^m}$, de modo que el sistema se puede escribir en la forma,

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}_\mathbf{u} = \mathbf{F} + \mathbf{F_c} \tag{14}$$

las fuerzas generalizadas con restricciones se encuentran explícitamente aplicando el principio de restricción mínima de Gauss. El principio establece que la aceleración restringida $\ddot{\mathbf{q}}(\mathbf{t})$ sigue la aceleración sin restricción más cercana $\ddot{\mathbf{q}}_\mathbf{u}(\mathbf{t})$ que se cumple con la ecuación (13). La función gaussiana $\mathbf{G}$ se define como,

$$\mathbf{G} = [\ddot{\mathbf{q}} - \ddot{\mathbf{q}}_\mathbf{u}]^\mathbf{T}\mathbf{M}[\ddot{\mathbf{q}} - \ddot{\mathbf{q}}_\mathbf{u}] \tag{15}$$

y la solución se encuentra minimizando $\mathbf{G}$ sujeto a la ecuación (13). Se desea obtener la aceleración restringida $\ddot{\mathbf{q}}(\mathbf{t})$, para lo cual se hace uso de la pseudoinversa de Moore-Penrose denotada como $()^\dagger$ obteniendo,

$$\ddot{\mathbf{q}} = \ddot{\mathbf{q}}_\mathbf{u} + \mathbf{M}^{-\frac{1}{2}}(\mathbf{A}\mathbf{M}^{-\frac{1}{2}})^\dagger(\mathbf{b} - \mathbf{A}\ddot{\mathbf{q}}_\mathbf{u}) \tag{16}$$

al combinar los resultados, las fuerzas generales restringidas $\mathbf{F_c} \in \mathbf{R^m}$ se encuentran explícitamente.

$$\mathbf{F_c} = \mathbf{M}^{-\frac{1}{2}}(\mathbf{A}\mathbf{M}^{-\frac{1}{2}})^\dagger(\mathbf{b} - \mathbf{A}\ddot{\mathbf{q}}_\mathbf{u}) \tag{17}$$

3.3 Quad-rotores y modelado de cargas suspendidas

Suponga que una carga suspendida está conectada a n-quad-rotores usando n-cables (ver Figura 2). Los cables agregan n-restricciones al sistema, ya que la distancia entre la carga y cada quad-rotor está limitada por la longitud del cable. Para el modelado de la carga suspendida con múltiples quad-rotores, se asume que los cables no tienen masa y no se elongan. La carga es una masa puntual y las cables están unidos al centro de gravedad de los UAV. El método de Lagrange se puede utilizar para modelar el sistema de carga suspendida. Sin embargo, se ha demostrado que este método conduce a una ecuación compleja cuando se agregan múltiples dinámicas no lineales que restringen al sistema [Bisgaard (2008)].

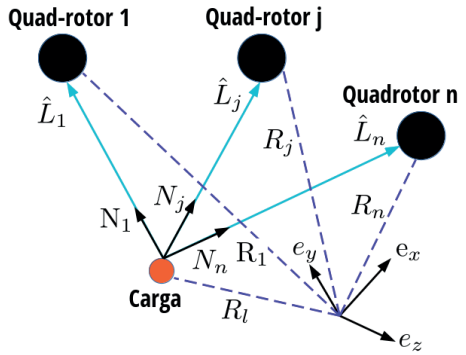


Figura 2. Multi-rotores y carga suspendida.

ISSN en trámite

Otro enfoque para modelar este sistema es el método Udwadia-Kalaba. Este método proporciona ecuaciones explícitas para el modelado de sistemas con diferentes configuraciones y varios agentes que actúan sobre las restricciones [Udwadia and Kalaba (1992), Udwadia and Kalaba (1995)]. En este estudio, utilizamos el método Udwadia-Kalaba para obtener el modelo completo del sistema.

Primero, se define un vector que va de la carga hacia cada quad-rotor como,

$$\widehat{\mathbf{L}}_\mathbf{i} = \eta_\mathbf{i} - \eta_\mathbf{l} = [\mathbf{x_i} - \mathbf{x_l} \;\; \mathbf{y_i} - \mathbf{y_l} \;\; \mathbf{z_i} - \mathbf{z_l}]^\mathbf{T} \tag{18}$$

donde xyz son las coordenadas generalizadas del sistema restringido con el subíndice adecuado. A partir de ahora, el subíndice i se utiliza para el i-ésimo quad-rotor y l para la carga. Por tanto, η_i y η_l son las posiciones del i-esimo quad-rotor y la carga, respectivamente. Al definir la longitud del cable i entre el agente i y la carga como d_i, la restricción i se puede establecer como,

$$\zeta_\mathbf{i} = \| \widehat{\mathbf{L}}_\mathbf{i} \|^\mathbf{2} - \mathbf{d_i^2} \tag{19}$$

con los vectores de aceleración generalizados como,

$$\begin{aligned} \ddot{q}_u &= [u_{x_1} \; u_{y_1} \; u_{z_1} \; \dots \; u_{x_n} \; u_{y_n} \; u_{z_n} \; 0 \; 0 \; g]^T \\ \ddot{q} &= [\ddot{\eta}_1^T \; \ddot{\eta}_2^T \; \dots \; \ddot{\eta}_n^T \; \ddot{\eta}_l^T]^T \end{aligned} \tag{20}$$

$\ddot{q}$ y $\ddot{q}_u$ son los vectores de aceleraciones restringidas y no restringidas, respectivamente de dimensión $3(n+1) \times 1$. Si diferenciamos a la ecuación (19) dos veces, la podemos poner en la forma estándar de la ecuación (13),

$$\frac{\mathbf{d}}{\mathbf{dt}}\zeta_\mathbf{i} = \mathbf{2}\widehat{\mathbf{L}}_\mathbf{j}^\mathbf{T}\dot{\widehat{\mathbf{L}}}_\mathbf{j} \tag{21}$$

$$\frac{\mathbf{d^2}}{\mathbf{dt^2}}\zeta_\mathbf{i} = \mathbf{2}\widehat{\mathbf{L}}_\mathbf{j}^\mathbf{T}\ddot{\widehat{\mathbf{L}}}_\mathbf{j} + \mathbf{2}\dot{\widehat{\mathbf{L}}}_\mathbf{j}^\mathbf{T}\dot{\widehat{\mathbf{L}}}_\mathbf{j} \tag{22}$$

finalmente, los coeficientes de Udwadia-Kalaba A y b, se pueden obtener como,

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{\mathbf{j}_{1\times\mathbf{3(n+1)}}} &= \mathbf{2}\widehat{\mathbf{L}}_\mathbf{j}^\mathbf{T}[\mathbf{0}_{\mathbf{3*3(j-1)}} \; \mathbf{I} \; \mathbf{0}_{\mathbf{3*3(n-j)}} \; -\mathbf{I}] \\ \mathbf{b}_{\mathbf{j}_{1\times1}} &= -\mathbf{2}\dot{\widehat{\mathbf{L}}}_\mathbf{j}^\mathbf{T}\dot{\widehat{\mathbf{L}}}_\mathbf{j} \end{aligned} \tag{23}$$

donde I es la matriz identidad de dimensiones apropiadas. Entonces, el modelo para el transporte de carga suspendida con quad-rotores se representa como,

$$\ddot{\mathbf{q}} = \ddot{\mathbf{q}}_\mathbf{u} + \mathbf{M}^{-\frac{1}{2}}(\mathbf{A}\mathbf{M}^{-\frac{1}{2}})^\dagger(\mathbf{b} - \mathbf{A}\ddot{\mathbf{q}}_\mathbf{u}) \tag{24}$$

donde,

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{\mathbf{n}\times\mathbf{3(n+1)}} &= [\mathbf{A_1} \; \dots \; \mathbf{A_j} \; \dots \; \mathbf{A_n}]^\mathbf{T} \\ \mathbf{b}_{\mathbf{n}\times\mathbf{1}} &= [\mathbf{b_1} \; \dots \; \mathbf{b_j} \; \dots \; \mathbf{b_n}]^\mathbf{T} \end{aligned} \tag{25}$$

y

$$\mathbf{M} = \mathbf{diag}(\mathbf{m_1}, \; \mathbf{m_2}, \; \dots, \; \mathbf{m_n}, \; \mathbf{m_l}) \tag{26}$$

donde $m_1, \; \dots, \; m_n$ son las masas de los cuadrotores y m_l es la masa de la carga.

4. Validación del modelo

Para validar el modelo se propone un escenario de simulación, el cual consiste en una flota de 4 vehículos aéreos no tripulados del tipo multi-rotor y una carga suspendida por medio de cables. Se desea que cada agente mantenga su formación como en la Figura 3. Analizando las interacciones que afectan la dinámica no lineal del sistema de carga suspendida a la dinámica de los UAV. En otras palabras; se observará la altitud del sistema aéreo con carga, la posición en xyz, la velocidad de la carga respecto a los agentes, las distancias entre agente-carga, agente-agente y la velocidad de cada agente. El software de MATLAB hizo posible esta tarea. Para la simulación, los valores deseados para la velocidad del grupo son $(V_xd, V_yd, V_zd) = (3, 0, \dot{h}_d)$ y se define una ruta parabólica para la altitud, $\dot{h}_d$ es la derivada en el tiempo de la ruta deseada. Cabe señalar que no existen en este trabajo leyes de consenso, es decir, no hay un medio de comunicación entre cada agente, agente-carga para realizar el objetivo de transportar una carga suspendida con múltiples quad-rotores ya que el objetivo principal es ver cómo se obtiene un modelo para el problema del transporte aéreo y así poder en trabajos futuros diseñar los algoritmos de control cooperativo que satisfagan todas estas necesidades.

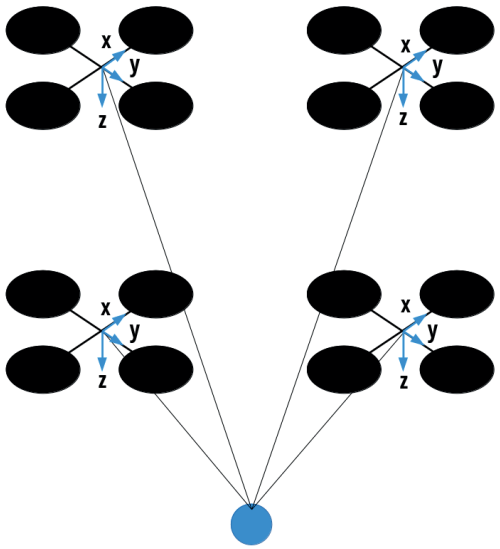


Figura 3. Flota de 4 vehículos con carga suspendida.

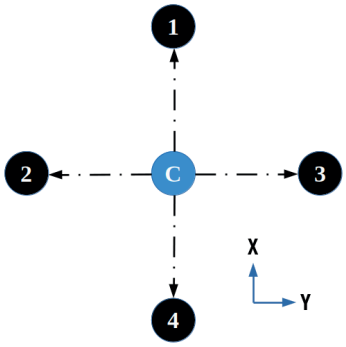


Figura 4. Formación deseada del grupo.

ISSN en trámite

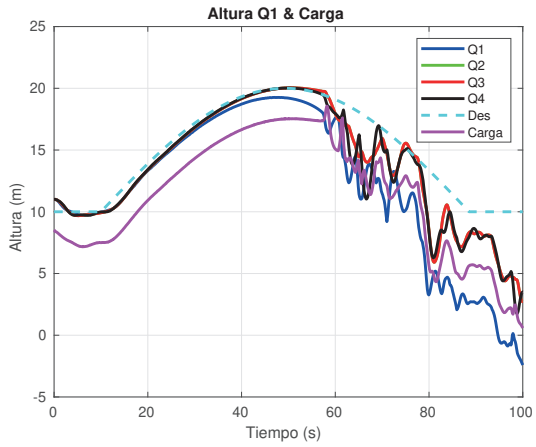


Figura 5. Altitudes de los quad-rotores.

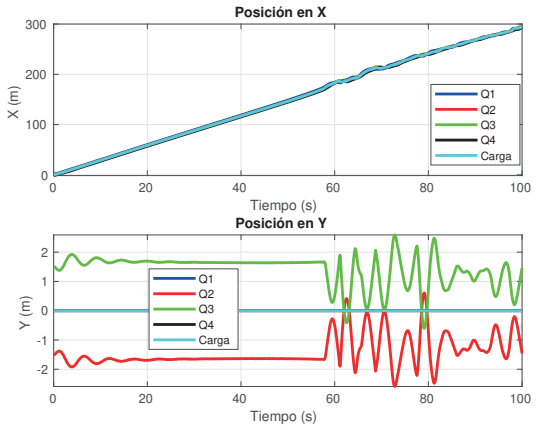


Figura 6. Posición de los quad-rotores en x y y.

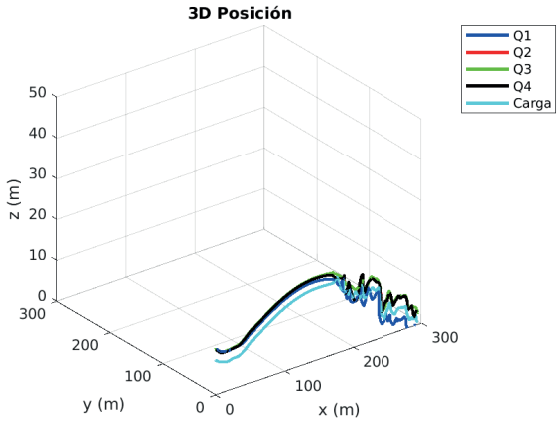


Figura 7. Posición 3D de los quad-rotores.

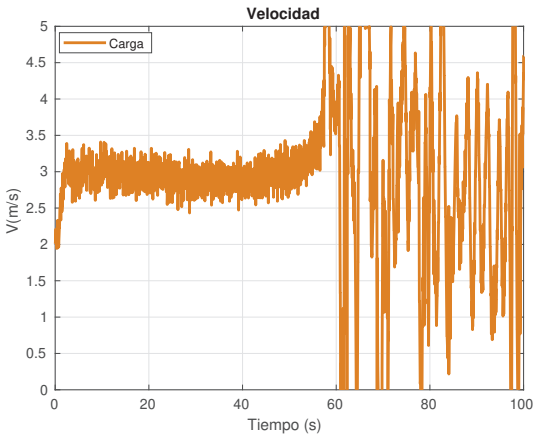


Figura 8. Velocidad de la carga a lo largo de x.

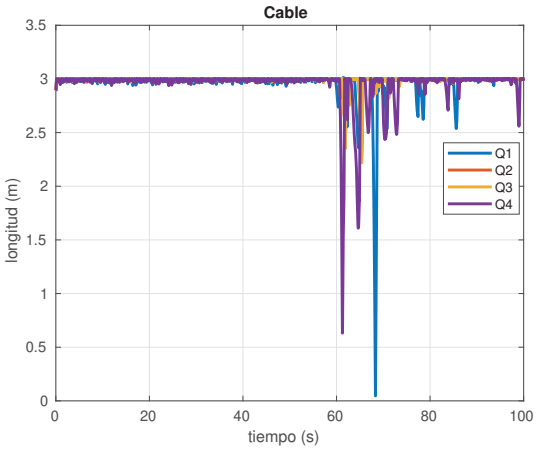


Figura 9. Longitud de los cables.

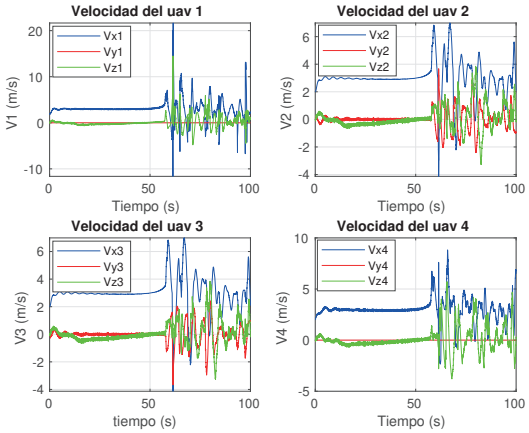


Figura 10. Velocidad de los vehículos en xyz.

ISSN en trámite

La Figura 5 muestra las altitudes de los quad-rotores después de la simulación. Está claro que durante el inicio con desplazamientos suaves los quad-rotores intentan seguir la altitud deseada y la carga trata de mantener el mismo comportamiento con respecto de su altitud a cierta distancia de los quad-rotores, pero no logra el objetivo debido a que no existe un algoritmo de consenso. La posición del grupo a lo largo de los ejes xy se ilustra en la Figura 6. Muestra que cada quad-rotor no mantiene su distancia con respecto al centro del grupo. La Figura 7 ilustra la posición 3D en xyz. También la velocidad de la carga a lo largo del eje x se muestra en la Figura. 8. Como puede verse, la velocidad de la carga es aproximadamente constante e igual al valor deseado en un lapso de tiempo, poco después se hace completamente inestable. La Figura 9 muestra las longitudes de los cables. Como se mencionó anteriormente, debido a errores de integración numérica, la longitud calculada de los cables puede ser diferente del valor real. Sin embargo, para este ejemplo de validación del modelo no se toma en cuenta ese detalle, por tanto como no existe una ley de consenso las longitudes de los cables varian de manera drástica y el sistema se hace inestable. La Figura 10 ilustra las velocidades de los quad-rotores a lo largo de los ejes xyz, respectivamente, se puede observar claramente que la velocidad deseada no satisface el objetivo, llevando al sistema a un escenario inestable.

Tabla 1. Parámetros de simulación

Parámetro	Valor	Unidad	Descripción
m_q	1	kg	Masa del quad-rotor
m_l	0.5	kg	Masa de la carga
g	9.81	N/kg	Constante gravitacional
x_{1_0}	(1.5, 0, -11)	m	Posición del UAV 1
x_{2_0}	(0, -1.5, -11)	m	Posición del UAV 2
x_{3_0}	(0, 1.5, -11)	m	Posición del UAV 3
x_{4_0}	(1.5, 0, -11)	m	Posición del UAV 4
x_{l_0}	(0, 0, -11)	m	Posición de la carga
$V_{x_0}, V_{y_0}, V_{z_0}$	(2, 0, 0)	m/s	Velocidad deseada (UAV)

5. **Conclusión**

En este artículo, se analizó el modelado del problema de transporte aéreo para múltiples quad-rotores con carga suspendida; donde mediante la ecuación de Udwadia-Kalaba se obtuvieron las fuerzas que ejerce la dinámica no lineal de los cables y la carga en los quad-rotores, resultando, un modelo que utiliza diferentes estructuras de formación y un número arbitrario de agentes. El modelo obtenido se simuló en un escenario, donde se observan que las interacciones entre los agentes se ven afectadas debido a la conexión física de la carga suspendida y la inexistencia de leyes de consenso para lograr los objetivos deseados. De las respuestas obtenidas de la simulación, se notó el surgimiento de diversos problemas a resolver dentro del modelo dinámico presentado, tales como, la flexibilidad en los cables, la pérdida de tensión durante el transporte de la carga, la rotura de los cables, la integración de elasticidad de cables muy grandes en el modelo, fallas en los rotores, fuerzas aerodinámicas externas, efecto del empuje del UAV sobre las cargas útiles especialmente en consideración de la oscilación, entre otros. Estas situaciones mencionadas, así como, la pérdida de estabilidad, trae como consecuencia varios problemas de interés a tratar en estudios futuros, y que podrían solucionarse diseñando algoritmos de control cooperativo robustos.

REFERENCIAS

Barve, A. and Nene, M.J. (2013). Survey of flocking algorithms in multi-agent systems. *International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)*, 10(6), 110.

Bisgaard, M. (2008). *Modeling, estimation, and control of helicopter slung load system.* Department of Control Engineering, Aalborg University.

Bouabdallah, S. (2007). Design and control of quadrotors with application to autonomous flying. Technical report, Epfl.

Klausen, K., Fossen, T.I., and Johansen, T.A. (2017). Nonlinear control with swing damping of a multirotor uav with suspended load. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 88(2), 379–394.

Kristian Klausen, Thor I Fossen, T.A.J. (2014). Suspended load motion control using mulcopters. *22nd Mediterranean Conference on Control and Automation. IEEE*, 1371–1376.

Lee, T. (2017). Geometric control of quadrotor uavs transporting a cable-suspended rigid body. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 26(1), 255–264.

Li Y, Sun Y, P.B. (2016). Dynamic modeling of a high speed over constrained press machine. *Journal of Mechanical Science and Technology.*

Liang, H., Su, H., Wang, X., and Chen, M.Z. (2013). Distributed leader-following swarm of heterogeneous multi-agent systems. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(13), 13–18.

Martina Lippi, A.M. (2018). Cooperative object transportation by multiple ground and aerial vehicles: modeling and planning. *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 21-25, Brisbane, Australia.*

Semsar-Kazerooni, E. and Khorasani, K. (2012). *Team cooperation in a network of multi-vehicle unmanned systems: synthesis of consensus algorithms.* Springer Science & Business Media.

Tartaglione, G., D'Amato, E., Ariola, M., Rossi, P.S., and Johansen, T.A. (2017). Model predictive control for a multi-body slung-load system. *Robotics and Autonomous Systems*, 92, 1–11.

Udwadia, F.E. and Kalaba, R.E. (1995). An alternate proof for the equation of motion for constrained mechanical systems. *Applied mathematics and computation, 70(2-3), 339-342.*

Udwadia, F.E. and Kalaba, R.E. (1992). A new perspective on constrained motion. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 439(1906), 407–410.

ISSN en trámite

Modelado de convertidor bidireccional Buck-Boost en MCC y MCD con intercambio de energía entre batería y bus de CD para aplicaciones de control robusto

Pedro A. Vilchis * **Victor M. Alvarado** ** **Carlos Aguilar** ***

* *Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, México (e-mail: m20ce025@cenidet.tecnm.mx).*
** *Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, México (e-mail: victor.am@cenidet.tecnm.mx).*
*** *Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, México (e-mail: carlos.ac@cenidet.tecnm.mx).*

Abstract: En este artículo se presenta el modelo matemático promediado del convertidor bidireccional Buck-Boost, durante su operación en ambos modos de conducción: continua y discontinua. El convertidor es el encargado del intercambio de energía entre una batería de ion-litio y un bus de CD para aplicaciones de micro-redes de distribución de energía. Este modelo fue obtenido para su uso en el diseño y control robusto de convertidores, en donde se analiza estabilidad bajo variaciones en los parámetros del convertidor, variaciones en el inductor que pueden causar que el convertidor opere en conducción discontinua y su modelo debe ser obtenido para su análisis y simulación.

Keywords: Convertidor Bidireccional, Modo de conducción discontinua, Microred, Bus de CD, Baterías.

1. INTRODUCTION

El uso de microredes y generación distributiva de energía eléctrica será de gran importancia en el futuro de la distribución eléctrica, ya que a diferencia de la distribución centralizada utilizada actualmente, las microredes permiten la generación, almacenamiento y uso de energía de manera local lo cual es imperativo para eficientar y ampliar el uso de energías renovables.

Una microred como se muestra en la figura 1 es la interconexión de distintas fuentes/almacén de energía conectadas a un bus de CD con la función de generar, almacenar y distribuir la energía eléctrica de manera local, mediante un sistema de administración de energía. Uno de los bloques mas importantes dentro de una microred es el almacenamiento de energía que está típicamente compuesto de un convertidor bidireccional Buck-Boost y uno o más elementos almacenadores (supercapacitores o baterías). El convertidor permite el intercambio de energía entre estos dispositivos almacenadores y el bus de CD donde se conectan todos los dispositivos que componen la microred.

Para aplicar control robusto en esta etapa almacenadora es necesario obtener su modelo matemático, partiendo de la simulación propuesta por Saleh et al. (2016) construimos el circuito de la figura 2 en donde se tiene el convertidor bidireccional, un arreglo de fuente de corriente y resistencia en paralelo conectado en el lado de alto voltaje, esto para simular la demanda de energía por la carga, y un bloque de batería conectado en el lado de bajo voltaje.

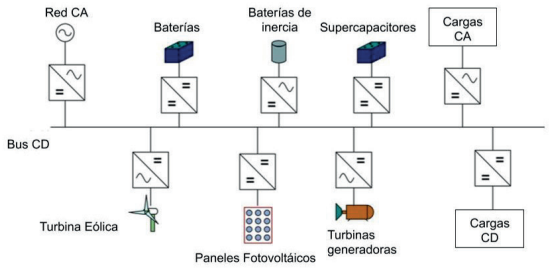


Fig. 1. Ejemplo de microred

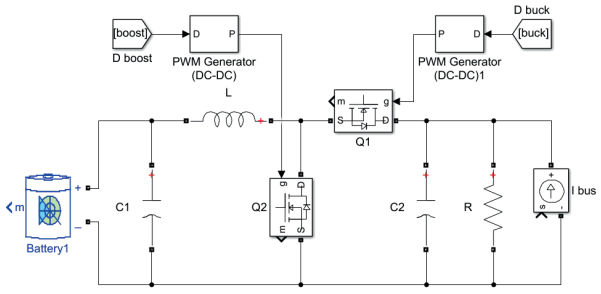


Fig. 2. Circuito de batería-convertidor-bus

El modelo promediado de este circuito puede ser obtenido analizando los circuitos equivalentes dados los tiempo de encendido y apagado de Q1 y Q2, los circuitos equivalentes se observan en la figura 3. Para el modelo de batería se eligió el de Thévenin presentado en Rodríguez and Tinaut (2017), con los parámetros de la batería y esti-

 ISSN en trámite

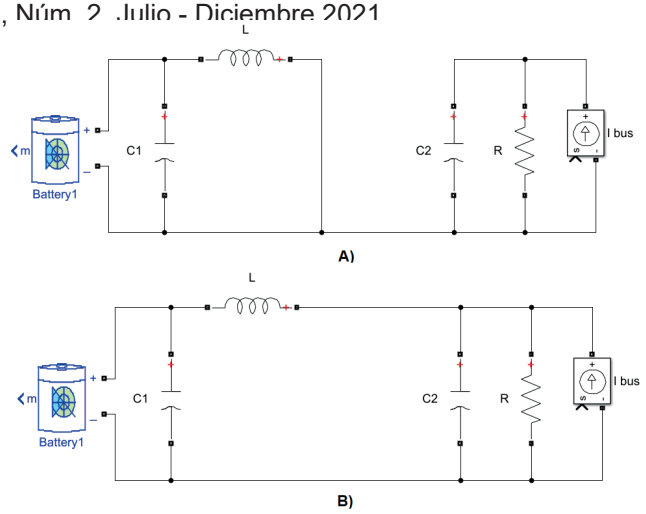


Fig. 3. Circuitos equivalentes cuando A) Q1 encendido, Q2 apagado y B) Q1 apagado, Q2 encendido

mación del SOC de Flores (2020), este modelo de Batería-Convertidor-Bus esta compuesto por las ecuaciones 1-7.

$$\frac{dV_{C1}}{dt} = \frac{1}{C_1}\left(I_L - I_{bat}\right) \tag{1}$$

$$\frac{dV_{C2}}{dt} = \frac{1}{C_2}\left(I_{bus} - I_L U - \frac{V_{C2}}{R}\right) \tag{2}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}\left(V_{C2}U - V_{C1}\right) \tag{3}$$

$$UOC = a_0 + a_1 Soc + a_2 Soc^2 + a_3 Soc^3 + \frac{a_4}{Soc} + a_5 \log(Soc) + a_6(1 - Soc) \tag{4}$$

$$I_{bat} = \frac{N_p}{R_{th}}\left(\frac{V_{C1}}{N_s} - UOC - V_{th}\right) \tag{5}$$

$$\frac{dV_{th}}{dt} = -\frac{V_{th}}{R_{th}C_{th}} + \frac{I_{bat}}{N_p C_{th}} \tag{6}$$

$$\frac{dSoC}{dt} = \frac{\eta I_{bat}}{3600 N_p Q} \tag{7}$$

Se tienen 5 variables de estado: el voltaje en el capacitor del lado de bajo voltaje V_{C1}, el voltaje en el capacitor del lado de alto voltaje V_{C2}, la corriente a través del inductor i_L, el voltaje en la malla de Thévenin dentro del modelo de batería V_{th} y el estrado de carga de la batería (Soc) de 0 a 1 ; como entrada tenemos U que es igual al ciclo de trabajo D de la señal de conmutación usada para la operación en modo Buck, mientras que en modo Boost $U = 1-D$. Otros parámetros son la capacitancia del lado de bajo voltaje C_1, la capacitancia del lado de alto voltaje C_2, la corriente de la fuente que representa al bus de CD I_{bus}, el voltaje de la fuente interna de la batería UOC, los parámetros a_{1-6} para la estimación de UOC,el número de celdas en paralelo N_p y en serie N_s que componen la batería, el valor de resistencia R_{th} y capacitencia C_{th} de la malla de Thévenin dentro del modelo de batería, la capacidad de la batería Q en Ah, el coeficiente de Coulomb η que idealmente es 1 y la variable I_{bat} que representa la corriente a través de la batería.

El modelo anterior representa el convertidor operando en modo de conducción continua (MCC) y es suficiente para muchas aplicaciones, sin embargo al analizar su estabilidad, sus margenes de estabilidad, su repuesta a cambios en la energía disponible, así como también la incertidumbre paramétrica en el inductor debido a las tolerancias del valor de fabrica y fenómenos como la saturación, el convertidor podría trabajar en el modo de conducción discontinua (MCD) y este modelo ya no seria valido, por eso la necesidad de obtener también el modelo representativo del MCD.

En la literatura existen trabajos sobre el modelado de convertidores en MCD, Vorpérian (1990) y Chen and Ngo (2001) presentan formas generales de modelar la conmutación PWM promediada, también existen trabajos de distintas topologías como Wu (2004) sobre el convertidor flyback, Swaminathan et al. (2021) sobre el convertidor cuadrático o Reatti and Balzani (2005) sobre el Buck-Boost. Sin embargo para el fin de representar la dinámica de la carga y descarga de una batería dentro de una microred se requiere que el modelo a usar sea bidireccional y permita añadir la dinámica de un batería de ion-litio, existe el trabajo realizado por Jianhua et al. (2011) que presenta ambos requisitos pero la batería es modelada como una fuente de voltaje en modo Boost y como una carga resistiva en modo Buck conmutando entre ambos modelos según el modo de operación, esto presenta limitaciones durante simulación y existe la posibilidad de obtener una respuesta mas conforme con la realidad al utilizar un modelo mas completo de batería, de ahí que surge la necesidad de la obtención del modelo presentado en este trabajo.

2. MODELO EN MODO DE CONDUCCIÓN DISCONTINUA

La diferencia entre MCC y MCD se aprecia en la figura 4, para ambas etapas Buck y Boost, durante el MCC el inductor se carga un tiempo DT y se descarga en el tiempo $(1-D)T$, sin descargarse por completo, durante el MCD el inductor se descarga completamente y la corriente del inductor se vuelve 0, el tiempo que dura su descarga completa se denomina como D_2T.

Para el modelado de este circuito trabajando en modo MCD se promedia la conmutación PWM siguiendo el modelo propuesto por Vorpérian (1990), donde se parte del circuito conmutado mostrado en la figura 5 y se modela la respuesta promediada del dispositivo de conmutación como el arreglo de la figura 6 compuesto por una fuente de corriente y otra de voltaje cuyos valores dependen de la variable μ definida por la ecuación 8.

$$\mu = \frac{D^2 V_{ac}}{2L f_s i_a} \tag{8}$$

Donde D es el ciclo de trabajo de 0 a 1, V_{ac} es el voltaje del nodo a al nodo c, L es el valor de inductancia del inductor, fs es la frecuencia de conmutación y i_a es la corriente a través del nodo a.

Aplicando el arreglo anterior se obtiene el circuito de la figura 7 para la etapa Buck y la figura 8 para la etapa Boost. De estos circuitos se obtienen las misma ecuaciones 1-6 vistas anteriormente pero ahora $U = \frac{\mu}{1+\mu}$ para la etapa Buck y $U = -\frac{1}{1+\mu}$ para la etapa Boost. Combinando los

 ISSN en trámite

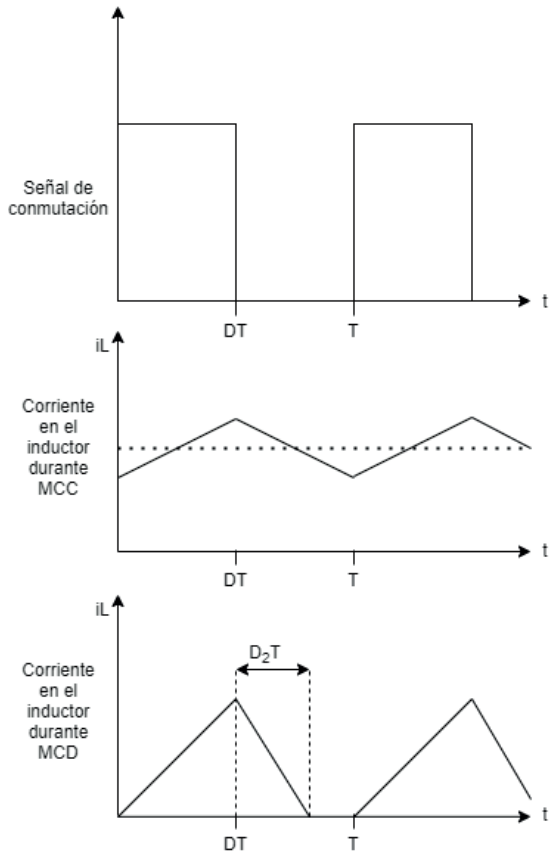


Fig. 4. Corriente en L durante MCC y MCD

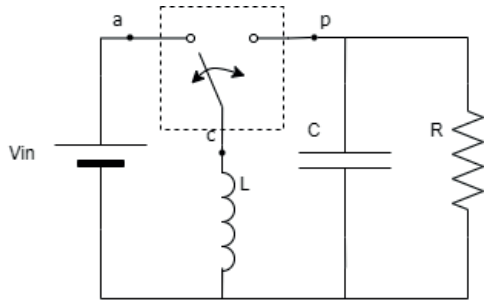


Fig. 5. Circuito de conmutación PWM

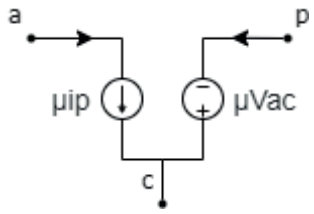


Fig. 6. Respuesta promediada del PWM

modelos para MCC y MCD se obtiene la tabla 1 donde se define U para cada etapa (buck y boost) y para cada modo de operación (MCC y MCD), mientras que aplicando la ecuación 8 a los circuitos de las figuras 7 y 8 se obtiene la ecuación 9 la cual ahora esta en términos del voltaje en el capacitor de alto voltaje V_{C2} y la corriente en el inductor i_L.

	MCC	MCD
Buck	D	$\frac{\mu}{1+\mu}$
Boost	$1-D$	$-\frac{1}{1+\mu}$

Table 1. Valor de U para los diferentes modos de operación

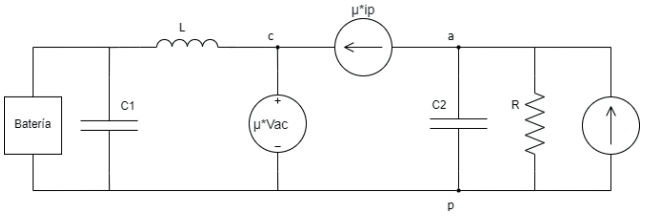


Fig. 7. Etapa buck con PWM simplificado

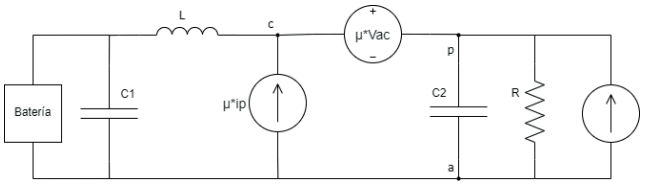


Fig. 8. Etapa boost con PWM simplificado

$$\mu = \frac{D^2 V_{C2}}{2 L f_s i_L} \tag{9}$$

3. SIMULACIONES

Para verificar la respuesta del modelo obtenido se compara la corriente en el inductor (I_L) del modelo contra la simulación por componentes del circuito de la figura 2 en SimScape de la plataforma Matlab/Simulink, como parámetros del convertidor se utilizan los valores de la tabla 2 y para la batería se utilizan los estimados por Flores (2020) de la tabla 3. En la figura 9 se observa esta comparación durante la etapa Buck con un ciclo de trabajo de $D = 50\%$, para MCC $I_{bus} = 3.8A$ y $L = 1.5mH$ y para MCD $I_{bus} = 3.5A$ y $L = 1mH$; por otro lado en la figura 11 se observa la simulación del modo Boost con $D = 50\%$, para MCC con $I_{bus} = 3.5A$ y $L = 1mH$ y para MCD con $I_{bus} = 3.8A$ y $L = 0.4mH$, en las figuras 10 y 12 se realiza un acercamiento a estas simulaciones y se observa con detalle cuando el convertidor opera en MCD ya que existe un momento cuando la corriente se vuelve 0.

Parámetro	Valor
Frecuencia de conmutación fs	100 kHz
Capacitor de etapa boost C_1	812 nf
Capacitor de etapa buck C_2	812 nf
Carga en el bus de CD R_1	23 Ω
Voltaje en la batería $Vbat$	43 v
Ciclo de trabajo R_2	50%
Capacidad de la batería Q	100 Ah

Table 2. Parámetros de simulación

Existe una pequeña diferencia en el modelo Buck MCC y también en el modelo Boost MCD pero esto es debido a la diferencia entre los modelos de baterías usados, uno utiliza el bloque de batería de Simulink y el otro el modelo estimado de Flores (2020), también se observa que la corriente es negativa en la gráfica de la etapa Boost por que cambia de sentido y la energía ahora va de la batería

ISSN en trámite

Parámetro	Valor
a_0	3.77707
a_1	-1.1766
a_2	1.3843
a_3	-0.6691
a_4	-0.0017
a_5	0.1842
a_6	-0.0195
R_0	0.2757Ω
R_1	0.01048Ω
C_{th}	$5657f$

Table 3. Parámetros del modelo de batería

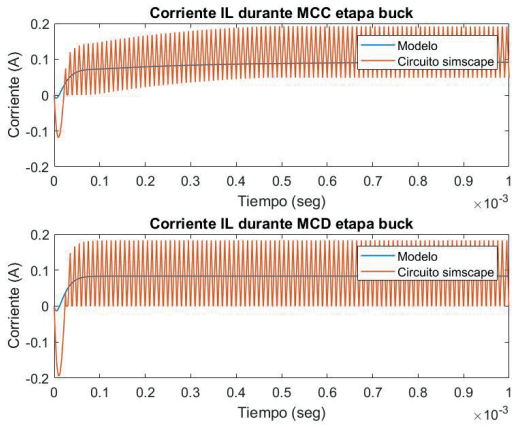


Fig. 9. Simulación etapa Buck

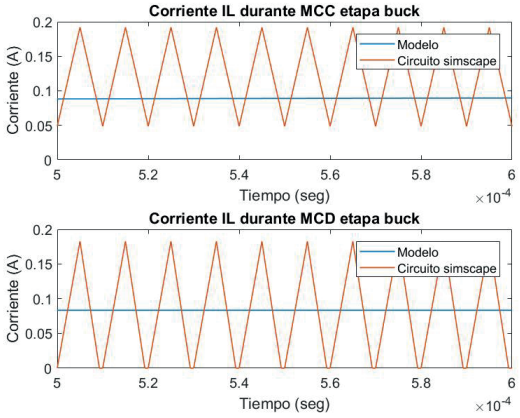


Fig. 10. Acercamiento de simulación etapa Buck

hacia el bus de CD, por otra parte la respuesta del modelo corresponde adecuadamente a la respuesta promediada del circuito construido con bloques de Simscape.

4. CONCLUSIONES

La diferencia de la corriente i_L de los modelos aquí descritos es alrededor de $0.1A$ de la respuesta promediada de sus circuitos simulados por componentes de Simscape, esto como ya se mencionó es por la diferencia entre modelos de baterías, por lo que se puede decir que se obtuvo un modelo adecuado del circuito Bateria-Convertidor Bidireccional-Bus de CD cuya señal de entrada U fue definida para

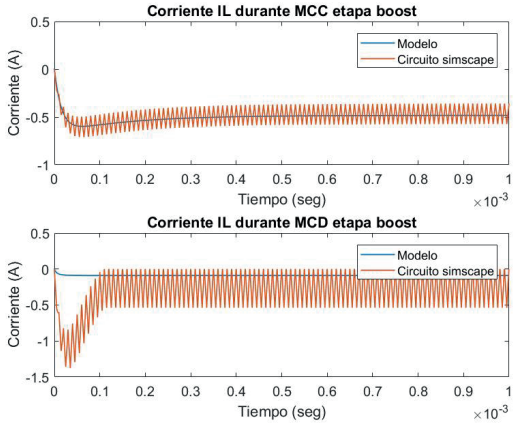


Fig. 11. Simulación etapa Boost

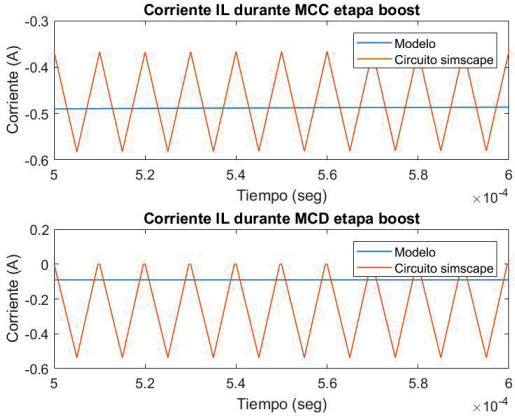


Fig. 12. Acercamiento de simulación etapa Boost

cada etapa de operación (Buck o Boost) y cada modo de conducción (MCC o MCD) esto nos permite simular su respuesta bajo cualquier parámetro, lo que a su vez permitirá su análisis y diseño bajo principios de control robusto sin limitarse solo a MCC especialmente en la selección del inductor a utilizar.

Este modelado de MCD es poco reportado en la literatura por lo que podría verse como irrelevante o poco usado, sin embargo resulta en un mejor diseño en aplicaciones de control robusto ya que al aplicar el modelo MCC a un convertidor operando en MCD la respuesta seria totalmente diferente y se podría concluir de forma errónea que el circuito es inestable o esta fuera de parámetros cuando simplemente se esta trabajando en MCD.

REFERENCES

Chen, J. and Ngo, K.D.T. (2001). Alternate forms of the pwm switch model in discontinuous conduction mode [dc-dc converters]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*.

Flores, D. (2020). *Comparación de modelos de circuito eléctrico equivalente para una batería de Ion-Litio con validación experimental*. Master's thesis, Centro Na-

ISSN en trámite

cional de Investigación Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca Morelos, México.

Jianhua, W., Fanghua, Z., Chunying, G., and Ran, C. (2011). Modeling and analysis of a buck/boost bidirectional converter with developed pwm switch model. *8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia*.

Reatti, A. and Balzani, M. (2005). Pwm switch model of a buck-boost converter operated under discontinuous conduction mode. *48th Midwest Symposium on Circuits and Systems*.

Rodríguez, A.I. and Tinaut, F.V. (2017). *Modelo para la Bateria de Ion de Litio de un Vehículo Eléctrico*. Master's thesis, Universidad de Valladolid, Valladolid.

Saleh, M., Esa, Y., Mhandi, Y., Brandauer, W., and Mohamed, A. (2016). Design and implementation of ccny dc microgrid testbed. *IEEE Industry Applications Society*.

Swaminathan, N., N, L., and Cao, Y. (2021). Dcm and ccm operation of buck-boost full-bridge dc-dc converter. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*.

Vorpérian, V. (1990). Simplified analisys of pwm converters using model of pwm switch part ii: Discontinuous conduction mode. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*.

Wu, K.C. (2004). A comprehensive analysis of current-mode control for dcm buck-boost converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*.

ISSN en trámite

Discriminación de la tolerancia a fallas en lazos de control ⋆

José A. Carrazana * **Efrain Alcorta Garcia** *

* *Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, San Nicolás de los Garza, N. L. México, (e-mail: joseacp920821@gmail.com efrain.alcortagr@uanl.edu.mx).*

Resumen
El control tolerante a fallas (FTC) busca evitar el deterioro del desempeño de un sistema al momento en que hay un cambio de uno o más parámetros fuera de los límites de tolerancia, es decir, en el momento en el que ocurre una falla. Cuando la corrección del desempeño ocurre una vez que se detecta la presencia de una fallas (control activo tolerante a fallas) se hace necesario que la acción de corrección se aplique para la parte de la falla que produce una desviación fuera de los límites de comportamiento nominal del sistema. El control nominal presenta un cierto grado de tolerancia a fallas (control tolerante pasivo a fallas) y solo se requiere de una acción correctiva cuando el nivel de la falla produce desviaciones fuera de los limites tolerables de operación del sistema. En este trabajo se utilizan observadores intervalo para delimitar los limites de operación aceptables, aún en la presencia de fallas. Esto indica que el control esta tolerando la falla en cuestión. Cuando las variables del sistema sobrepasan las delimitaciones obtenidas, decretamos que la falla correspondiente no es tolerada por el control. Esto nos da pie a poder implementar alguna estrategia de control adicional. Esta última parte no es parte del presente trabajo. Se utiliza un sistema de control de velocidad con carga variable para mostrar el esquema propuesto.

Keywords: Control tolerante a fallas, falla tolerada, falla no tolerada, observador intervalo.

1. INTRODUCCIÓN

En el control tolerante a fallas, se buscan técnicas eficientes para prevenir, primero, que una falla extienda sus efectos en el sistema y luego mantenga el desempeño lo más cercano posible al nominal (manteniendo primero la operación segura, luego tanto como sea posible, también la actuación). Una falla puede causar un comportamiento inaceptable o incluso perjudicial para el sistema.

Diversos esfuerzos por hacer que el lazo de control pueda responder adecuadamente al efecto de fallas incluyen: leyes de control adaptables, con controladores robustos, reconfigurando el control, etc. Sin embargo, la mayor parte de los esfuerzos por realizar tolerancia a fallas modifican el lazo de control nominal. Otro aspecto es el requerimiento explícito de conocer el tamaño de la falla para poder compensar su efecto, ver por ejemplo Blanke et al. (2016), o utilizando algunas técnicas no linelaes Patan (2019), Shen et al. (2017) o bien herramientas de la estadística Ding (2020).

En la ultima década se propuso un esquema de tolerancia a fallas denominado enfoque cascada, ver Rodriguez-Alfaro et al. (2013), Acosta-Santana et al. (2013), al control tolerante a fallas. Mediante este esquema se mantiene el control nominal y no se requiere conocer explícitamente el tamaño de la falla. El efecto de perturbaciones es también corregido. Este es el esquema que se utiliza en el presente trabajo.

El esquema antes mencionado requiere de poder discriminar entre fallas que pueden ser toleradas por el control nominal y las que requieren de una acción de control suplementario Gonzalez Martinez and Alcorta-Garcia (2021). Esta actividad ha sido reconocida previamente por el equipo de trabajo alrededor del profesor Staroswieci, ver por ejemplo el trabajo: Staroswiecki and Berdjag (2010). En el trabajo antes citado se propone una medida de tolerancia basado en un índice de desempeño semejante a los utilizados en control óptimo. Lo cual funciona bien cuando se tienen averías, pero no cuando se analizan fallas.

Dado que el control nominal presenta un cierto grado de tolerancia a fallas (control tolerante pasivo a fallas) y solo se requiere de una acción correctiva cuando el nivel de la falla produce desviaciones fuera de los limites tolerables

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

ISSN en trámite

de operación del sistema. En este trabajo se utilizan observadores intervalo, como los considerados en Efimov and Raïssi (2016) para delimitar los limites de operación aceptables, aún en la presencia de fallas. Esto indica que el control esta tolerando la falla en cuestión. Cuando las variables del sistema sobrepasan las delimitaciones obtenidas, decretamos que la falla correspondiente no es tolerada por el control. Esto nos da pie a poder implementar alguna estrategia de control adicional. Esta última parte no es parte del presente trabajo. Se utiliza un sistema de control de velocidad con carga variable para mostrar el esquema propuesto.

En la siguiente sección se presentan algunos preliminares que son útiles para el desarrollo subsecuente. En la sección 3 se el uso de los observadores intervalo para determinar si una falla esta siendo tolerada por el control nominal. En la sección 4 se presenta la descripción del sistema sujeto a estudio. En la sección 5 se presenta un ejemplo de aplicación. En la sección 6 se presentan conclusiones.

2. PRELIMINARES

El objetivo del Control Tolerante a Fallas (FTC) es eliminar el efecto de las fallas que se producen en las unidades funcionales del sistema de control, así como evitar que el efecto de la falla se propague y mantener el desempeño del sistema con falla lo más cercano posible al nominal, manteniendo así una operación segura y continua en las aplicaciones de control. El material de esta sección ha sido tomada principalmente de Ding (2020)

Las diferentes estrategias para la implementación del control tolerante a fallas se pueden clasificar en dos enfoques generales:

Control tolerante a fallas pasivo. El cual se enfoca en utilizar la propiedad que tienen los sistemas retro-alimentados de hacer frente a perturbaciones o cambios en la dinámica del sistema para atenuar los efectos de las fallas. Prácticamente consiste en un diseño robusto del sistema de control retro-alimentado para hacerlo inmune a determinadas fallas. Ver figura 1.

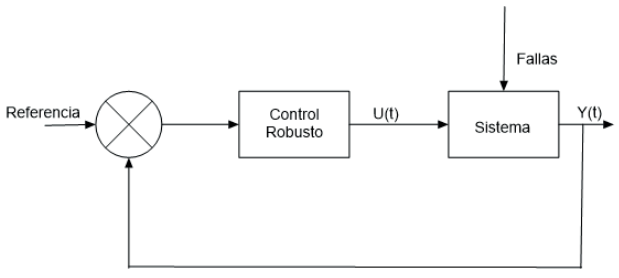


Figura 1. Control tolerante a fallas pasivo.

Control tolerante a fallas activo. Este enfoque consiste en utilizar la información del sistema de diagnóstico de fallas, para activar el mecanismo de reconfiguración del control, diseñado para compensar el efecto de las fallas. El control activo supone un mayor costo de implementación al necesitar capacidades de supervisión y diagnóstico, pero ofrece una mejor solución para fallas específicas. Ver figura 2

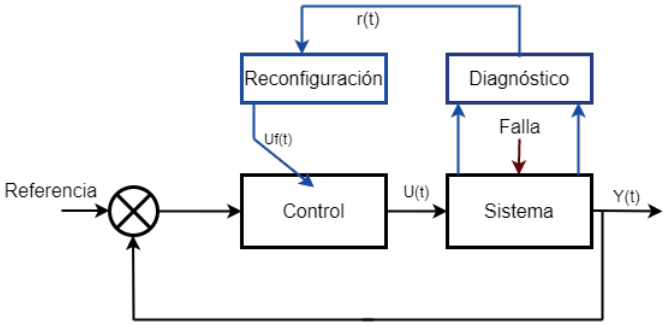


Figura 2. Control tolerante a fallas activo.

2.1 Modelo de Fallas

Sea un sistema de control nominal, es decir, sin fallos está representado por:

$$\dot{x}_n(t) = A_n x_n(t) + B_n u(t)$$
$$y_n(t) = C_n x_n(t)$$

Donde el subíndice n indica que el sistema es libre de fallas.

Falla: desviación no permitida de, al menos, una propiedad característica o parámetro de un sistema de su condición aceptable, usual o estándar.

Las fallas que afectan a un sistema a menudo son representadas por una variación de los parámetros del sistema. Por lo que, en presencia de una falla, el modelo del sistema puede ser escrito como:

$$\dot{x}_f(t) = A_f x_f(t) + B_f u(t)$$
$$y_f(t) = C_f x_f(t)$$

donde las nuevas matrices del sistema con falla están definidas como:

$$A_f = A_n + \Delta A.$$
$$B_f = B_n + \Delta B.$$
$$C_f = C_n + \Delta C.$$

y $\Delta A, \Delta B, \Delta C$ corresponden a la desviación de los parámetros del sistema con respecto a los valores nominales.

Diferentes tipos de fallas pueden presentarse, desde fallas típicas que cambian solo una pequeña parte de la planta o hasta una la perdida completa de la operación de alguno o varios componentes. Por lo que del modelo con falla se distinguen tres tipos de fallas a ser tratadas.

ISSN en trámite

- **Fallas en los Sensores**. Son representadas en el modelo con falla por la matriz de salida C_f y su diferencia con respecto a la matriz de salida nominal C_n caracteriza el tamaño de la falla.

- **Fallas en los Actuadores**. Al igual que las fallas en los sensores, las fallas en los actuadores tienen una representación en la matriz de entrada B_f.

- **Fallas en los componentes**. Se representan en el modelo con falla como la matriz A_f del sistema.

3. DISCRIMINACIÓN DE FALLAS EN LAZOS DE CONTROL

Como se ha mencionado previamente, el control activo tolerante a fallas requiere el poder discriminar entre las fallas que pueden ser toleradas por el control nominal del sistema de las que requieren ser compensadas mediante una acción adicional a la nominal Gonzalez Martinez and Alcorta-Garcia (2021). Inspirado en el trabajo de Staroswiecki and Berdjag (2010), se proponen las siguientes definiciones y procedimientos para lograr la discriminación buscada.

Definición 1. *Considerar un sistema en lazo cerrado y una falla $f_i(t)$. Esta falla se denomina* ***tolerada*** *(tal que el sistema sea tolerante a esta falla) si en presencia de esta falla se satisface lo siguiente:*

1) *El sistema de retroalimentación permanece estable.*
2) *La salida del sistema permanece dentro de un margen de tolerancia admisible alrededor de la salida nominal del sistema.*
3) *La ley de control nominal $u(t)$ se mantiene limitada y físicamente realizable.*

△

Definición 2 *Una falla $f_i(t)$ que hace que el sistema nominal (lazo cerrado) no sea tolerante a fallas, se denomina* ***recuperable*** *si existe un esfuerzo de control suplementario que cuando se aplica en forma de un nuevo lazo de control, el lazo cerrado resultante es tolerante a fallas con respecto a la falla considerada.*

△

De acuerdo a la definición 1, se requiere poder medir desviaciones de la salida con respecto a la nominal para poder determinar si la falla en cuestión puede ser considerada tolerada. Con esta finalidad se propone utilizar una herramienta conocida como observador intervalo de la salida, a partir de un observador intervalo de los estados. Para este fin se utilizan los resultados descritos principalmente en Efimov and Raïssi (2016) y las referencias contenidas ahí.

El observador intervalo esta fundamentado en el concepto de sistemas cooperativos:

Sistema de control cooperativo: es un sistema en el cual la matriz **A** es una matriz Metzler.

Matriz Metzler: es una matriz cuyos elementos de la diagonal principal son no negativos (mayores o iguales que cero).

En base a estos conceptos es posible definir dos observadores, uno que puede estimar la cota superior de la salida y otro que puede estimar la cota inferior. El intervalo de las cotas se puede fijar mediante un porcentaje de variación de algunos elementos de las matrices del sistema. El diseño no es trivial y requiere satisfacer algunos requerimientos técnicos Efimov and Raïssi (2016).

La estructura de los observadores así como el diseño para el caso particular del sistema de control de velocidad con carga variable es discutido en la sección 5.

4. SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD CON CARGA VARIABLE DR300

Como caso de estudio se considera el sistema de control de velocidad de un motor con carga variable, DR300 de la firma **AMIRA**. Ver figura 3

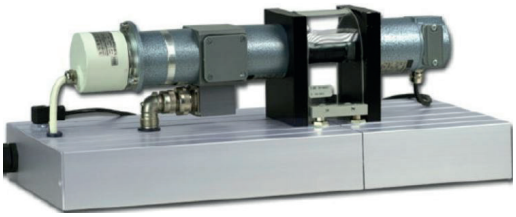


Figura 3. Caso de estudio.

La planta está representada por un motor de CD de excitación permanente (M1) donde la señal de entrada (corriente de armadura) es provista por un lazo de control de corriente. Los sensores para la señal de salida (velocidad) son un tacogenerador (T) y un encoder incremental (I). El extremo libre del eje del motor está firmemente acoplado (K) al eje de un segundo motor idéntico (M2). Ver la figura 4.

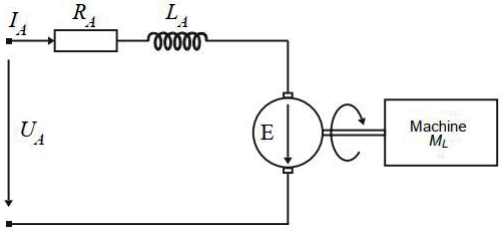


Figura 4. Descripción electromecánica del sistema.

Al determinar la terminal de voltaje (U_A) como entrada, la carga (M_L) como perturbación y la velocidad del eje del

ISSN en trámite

motor Ω como salida, se obtiene el diagrama de bloques de la figura 5.

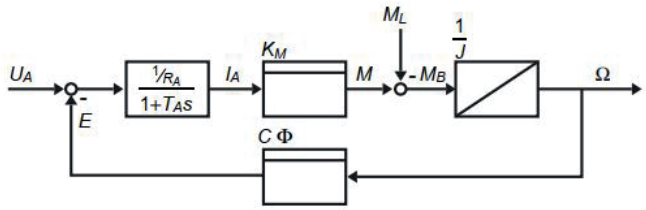


Figura 5. Diagrama en bloques del motor con carga.

Cuando el motor DC, como se describe anteriormente, está conectado a una tensión de alimentación, la velocidad del motor se puede ajustar fácilmente a los valores deseados. Pero esta estructura es simplemente un control a lazo abierto porque los cambios de la carga pueden resultar en cambios de la velocidad ya que el voltaje del inducido no se ajusta automáticamente. Mientras que la característica fundamental de un control de lazo cerrado es que la variable de referencia (punto de ajuste) no cambiará incluso en caso de influencias externas perturbadoras (cambios de carga). Por tanto, se requiere que la variable controlada Ω sea medida continuamente y comparado con la variable de referencia. En caso de desviaciones, la tensión de control U_s del actuador debe ajustarse mediante un controlador adecuado.

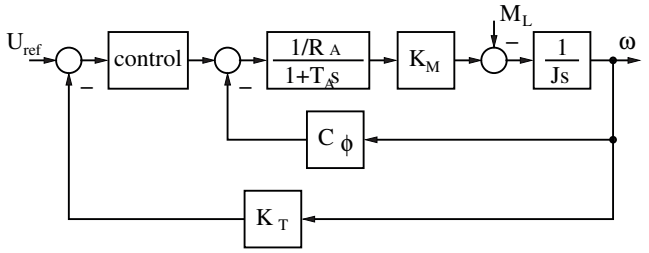


Figura 6. Diagrama en bloques del lazo de control de velocidad.

5. EJEMPLO DE APLICACIÓN

En el ejemplo a continuación se suponen fallas en el actuador y los valores de los parámetros están resumidos en la siguiente tabla.

Cuadro 1. Parámetros(valores)

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Inercia Total	J	$80{,}45 * 10^{-}6$	$kg * m^2$
Constante de Voltaje	CΦ	$6{,}27 * 10^{-}3$	V/Rpm
Constante del Motor	K_M	0.06	Nm/A
Induc. de Armadura	L_A	0.003	H
Resistencia	R_A	3.13	Ohm
Voltaje del Tacómetro	K_T	$2{,}5 * 10^{-}3$	V/Rpm
Constante de tiempo	T_A		

Las simulaciones se realizaron en la herramienta Simulink de Matlab donde se implementa el lazo de control de velocidad mostrado en el la figura 6 que representa el control nominal de velocidad.
La trayectoria de la salida de velocidad nominal está acotada por una cota superior y una cota inferior que delimitan la región en la que el control nominal es tolerante a determinadas fallas. Estas cotas se obtienen usando observadores a intervalos mediante las siguientes ecuaciones.

El primer par de ecuaciones pertenece a la cota inferior del observador a intervalos.

$$\dot{\underline{x}}(t) = (\underline{A} - L\underline{C})\underline{x}(t) + (\underline{B} - L\underline{D})u(t) + L(y(t) + \underline{\epsilon})$$
$$\underline{y}(t) = \underline{C}\underline{x}(t) + \underline{D}u(t)$$

Mientras que el segundo par representa la cota superior.

$$\dot{\overline{x}}(t) = (\overline{A} - L\overline{C})\overline{x}(t) + (\overline{B} - L\overline{D})u(t) + L(y(t) + \overline{\epsilon})$$
$$\overline{y}(t) = \overline{C}\overline{x}(t) + \overline{D}u(t)$$

Los resultados de las simulaciones se muestran a continuación, en la figura 7 se aprecia la trayectoria de velocidad nominal cuando el sistema está libre de fallas así como las cotas superior e inferior que delimitan el umbral en el que el sistema nominal es tolerante a fallas. El diseño de la ganancia L fue realizado de manera directa, pues en el caso de nuestro ejemplo no se consideran intervalos en A, es decir, $\bar{A} = \underline{A}$ al igual que con la matriz C ($\bar{C} = \underline{C}$). La diferencia en los dos observadores de nuestro ejemplo se encuentra en la matriz B.

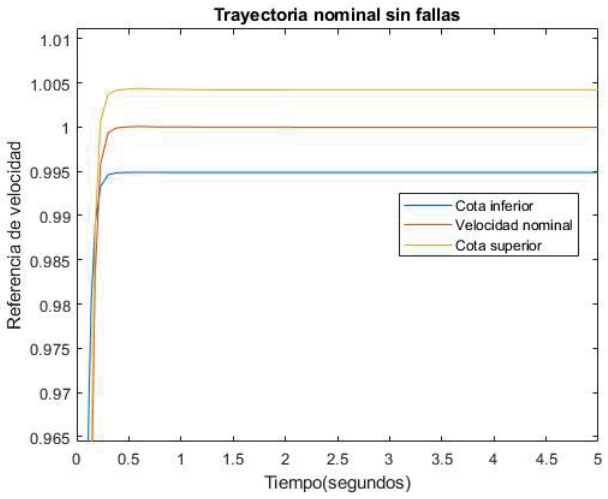


Figura 7. Trayectoria de velocidad nominal

En la figura 8 se observa el efecto de una falla del 10 % del actuador en la que se aprecia que el control nominal de velocidad es tolerante a fallas de esta magnitud y la respuesta se encuentra dentro del umbral permitido.

En la figura 9 se aprecia como la trayectoria de velocidad nominal sale de los limites establecidos lo que quiere

ISSN en trámite

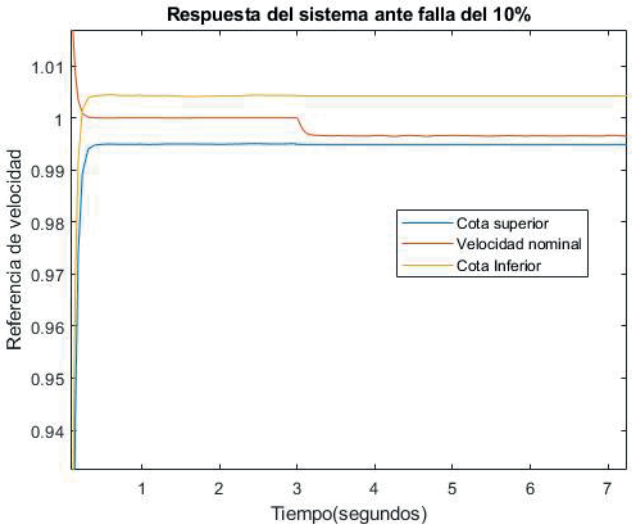


Figura 8. Trayectoria nominal ante falla del 10 %

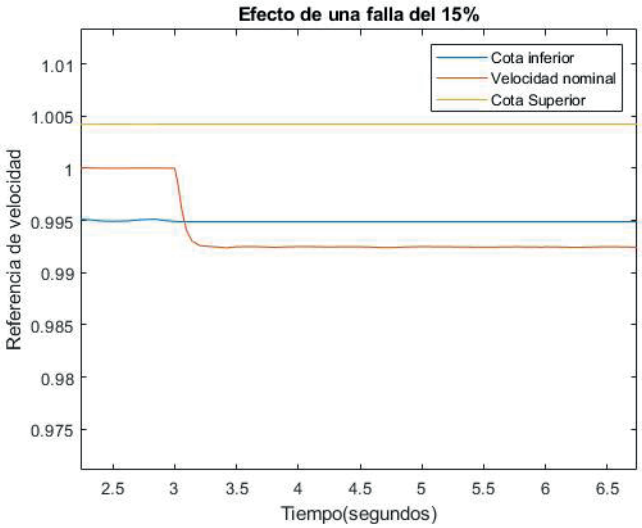


Figura 9. Trayectoria nominal ante falla de 15 %

decir que el control nominal no es tolerante a fallas en el actuador mayores o iguales al 15 %.

6. CONCLUSIÓN

En el presente trabajo se propone utilizar observadores intervalo de la salida para discriminar entre fallas tolerables y las que no lo son. Note que el hecho de que una falla sea tolerable esta asociada con un control específico así como con la especificación de desviación aceptable. Este último hecho esta asociado con la aplicación específica y puede cambiar de usuario en usuario. El esquema propuesto con las definiciones asociadas es implementado en un sistema de control de velocidad con carga variable. Como se muestra en los resultados, el esquema propuesto permite hacer las discriminaciones de los diferentes niveles de falla estudiados. En el trabajo futuro se esta construyendo una solución de software para el diseño de los observadores intervalo.

AGRADECIMIENTO

El primer autor agradece el apoyo brindado por el Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACYT)

REFERENCIAS

Acosta-Santana, P., Rodriguez-Alfaro, L.H., and Alcorta-Garcia, E. (2013). A cascade structure approach to controler configuration. In *Proc. 2nd Int. Conf. On Control and Fault-Tolerant Systems SysTol'13*.

Blanke, M., Kinnaert, M., Lunze, J., and Staroswiecki, M. (2016). *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*. Springer.

Ding, S.X. (2020). *Advanced methods for fault diagnosis and fault-tolerant control*. Springer.

Efimov, D. and Raïssi, T. (2016). Design of interval observers for uncertain dynamical systems. *Automation and Remote Control / Avtomatika i Telemekhanika, MAIK Nauka/Interperiodica*, 77(2), 191–225.

Gonzalez Martinez, J.L. and Alcorta-Garcia, E. (2021). Fault-tolerant supplementary control synthesis for dc motor with variable load. In *Memorias del 2021 Congreso Nacional de Control Automático1, 3-15 de Octubre, Guanajuato, México*.

Patan, K. (2019). *Robust and Fault-Tolerant Control: Neural-Network-Based Solutions*. Springer.

Rodriguez-Alfaro, L., Alcorta-Garcia, E., and Espinosa-Pérez, G. (2013). Un enfoque cascada para control activo tolerante a fallas en msip. *Congreso Nacional de Control Automático*.

Shen, Q., Jiang, B., and Shi, P. (2017). *Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control Based on Adaptive Control Approach*. Springer.

Staroswiecki, M. and Berdjag, D. (2010). A general fault tolerant linear quadratic control strategy under actuator outages. *International Journal of Systems Science*, 41(8), 971–985.

ISSN en trámite

Convertidor resonante LLC para la descarga de una batería de flujo

Brandon Eduardo Garay Ariza*.
Miguel Ángel Zapata Azarcoya.**
Carlos Aguilar Castillo*.**

**Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, México (Tel: 2292472234; e-mail: M20CE016@cenidet.tecnm.mx).*
***Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, México (e-mail: mzapata@ineel.mx)*
****Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, México (e-mail: carlos.ac@cenidet.tecnm.mx)*

Resumen: Se propone el uso de un convertidor resonante LLC como alternativa para la descarga de una batería de flujo conectada a la red con capacidad de integrarse en la familia de sistemas de almacenamiento de energía en cantidades industriales. El uso de estos sistemas de almacenamiento es cada vez más visto en sistemas de generación de energía limpia y renovable con el fin de solventar la intermitencia que estos presentan.

El convertidor resonante es capaz de brindar eficiencias elevadas en diferentes puntos de operación de la batería en estado estacionario, esta ventaja y sus amplios métodos de diseño que proporcionan ciertos beneficios dependiendo la aplicación lo hacen factible para la descarga de una batería de flujo.

Palabras clave: Convertidor resonante LLC, energías renovables, batería de flujo, DC-DC, SIMetrix.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años la contaminación del medio ambiente, que es atribuida directa o indirectamente a las actividades humanas, ha ido en aumento. Esto ha generado una alteración en la composición global de la atmósfera y variabilidad climática debido al incremento de la concentración de gases de efecto invernadero (Naciones unidas, 2008).

Una alternativa para disminuir el calentamiento global es la implementación de energías renovables. Las principales ventajas de este tipo de energías son una mejor eficiencia, uso de los recursos naturales y un mejor ambiente (Dincer & Acar , 2015). Sin embargo, la principal desventaja de este tipo de energías es la intermitencia, ya que dependen principalmente de las condiciones climáticas (Gowrisankaran et al., 2016). Para hacer frente a esta limitación y a la creciente demanda de energía renovable se han implementado sistemas de almacenamiento de energía, con el propósito de ser aprovechada durante una baja producción o la alta demanda por ciertos periodos de tiempo.

En la Fig. 1 se muestran diferentes tecnologías de almacenamiento de energía clasificadas de acuerdo con el tiempo de descarga y capacidad de almacenamiento que poseen. Las celdas de combustible y las baterías de ion de litio se encuentran en el rango de 1 kW hasta casi 10 MW. Sus aplicaciones van desde calidad de la energía hasta integrarse al uso en energías renovables. Están las baterías de flujo que se encuentran en un rango de los 100 kW a decenas de megawatts en aplicaciones de energías renovables, característica que las hace adecuadas para su integración a la red eléctrica de potencia para el almacenamiento masivo de energía desarrollando funciones de "*Capacity Firming*"[1].

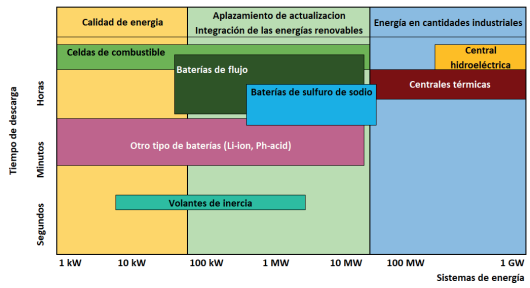


Fig. 1 Tecnologías de almacenamiento de energía (Jain, 2017).

El uso de baterías de flujo como tecnología de almacenamiento es una buena opción para integrar fuentes renovables a la red eléctrica ya que puede ayudar a equilibrar la oferta y la demanda, prevenir interrupciones y satisfacer los requisitos de carga variable de la red (Bryans et al., 2018). El estudio de este sistema de almacenamiento ha continuado y se han realizado avances significativos hasta almacenar grandes cantidades de energía.

[1] El sistema de almacenamiento de energía suaviza la salida y controla la tasa de MW/min para eliminar las rápidas oscilaciones de tensión y potencia en la red eléctrica.

ISSN en trámite

En la Fig. 2 se muestra que el diseño y configuracion de una bateria de flujo es simple. La batería de flujo consta de dos electrolitos líquidos que reaccionan dentro de una celda electroquímica generando una tensión entre terminales de corriente directa que posteriormente son conectadas a un inversor y una carga (Lucas & Stamatios , 2016).

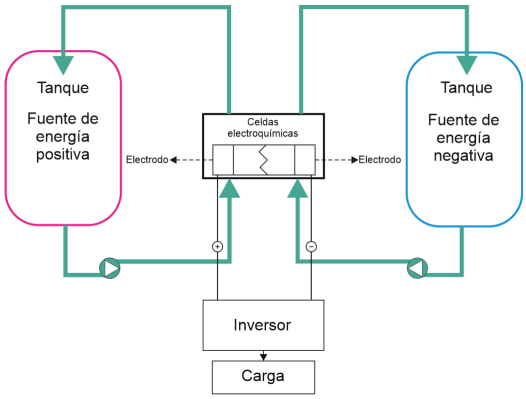


Fig. 2 Diagrama genérico de baterías de flujo de vanadio (Konig et al., 2015).

Dentro de las principales ventajas de las baterías de flujo se encuentran (Cunha et al,. 2014):

- Capacidad de almacenamiento a gran escala con bajo nivel de auto descarga.
- Rapida respuesta de potencia: util para aplicaciones de calidad de energia y control de frecuencia.
- Vida util estimada en 20 años con mas de 15,000 ciclos de descarga sin degradacion del electrolito (Q & T, 2015).
- La capacidad de almacenamiento y la potencia están desacoplados (Lou et al,. 2015).

A pesar de las ventajas de las baterías de flujo que las hacen adecuadas para la integración de fuentes renovables a la red, estas baterías presentan el inconveniente de tener una salida de tensión que varía ampliamente en función del estado de carga.

En la Fig. 3, se muestra la curva de polarización de una batería de flujo donde se observa que la tensión entre terminales es dependiente del estado de carga, del flujo del electrolito y de la densidad de corriente. Adicionalmente, se puede observar, que el nivel de tensión durante el proceso de carga es superior a la tensión entre terminales durante el proceso de descarga (Zhang et al., 2015).

Las variaciones de la tensión de la batería de flujo durante el proceso de descarga constituyen un reto en la operación del convertidor CD-CD intermedio que debe mantener una tensión de salida cuasiestable en el bus que finalmente será empleado para inyectar la energía a la red.

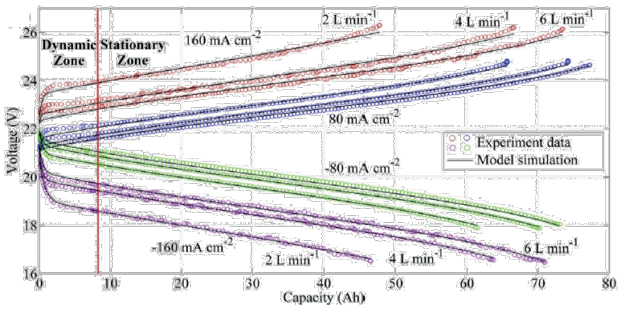


Fig. 3 Curva de polarización de una batería de flujo en estado estacionario.

Debido a que el uso de sistemas de almacenamiento se ha hecho popular, hay muchas alternativas en convertidores para su descarga. En (Shen et al, 2018) se emplea un convertidor resonante LLC pero tiene una ganancia limitada y opera con potencia pequeña. En (Yang et al., 2018) utilizan un convertidor resonante para la carga y descarga de una bateria con integracion a la red el cual opera con un voltaje de entrada limitado al igual que la ganancia.

Dado el continuo desarrollo de las baterías de flujo y al incremento en la integración de fuentes renovables a la red eléctrica, este trabajo presenta el desarrollo de un convertidor LLC, para la descarga de la batería que permita la regulación de un bus de CD cuando la tensión de entrada varía ampliamente como se muestra en la Fig. 3 (ver Tabla I de la sección 3).

2. CONVERTIDOR RESONANTE LLC

En los últimos años, el uso de convertidores resonantes se ha hecho popular y son utilizados ampliamente en aplicaciones como servidores, telecomunicaciones y electrónica de consumo. Entre las principales características del convertidor resonante están: entrada de tensión variable (como es el perfil de descarga de la batería de flujo), frecuencia de operación elevada (lo que le permite alcanzar altas densidades de potencia), y conmutación suave de tensión (ZVS) en un amplio rango de operación (Yu et al,. 2018).

En esta sección, se analiza la configuración de un convertidor resonante como el que se muestra en la Fig. 4, el cual está conformado por tres secciones: el inversor basado en MOSFET´s operando con conmutación suave de tensión (ZVS); el tanque resonante integrado por un capacitor resonante C_r, un inductor resonante L_r y la inductancia de magnetización del transformador L_m. y el rectificador de onda completa. Por último, R_l representa la carga en el BUS de tensión de salida.

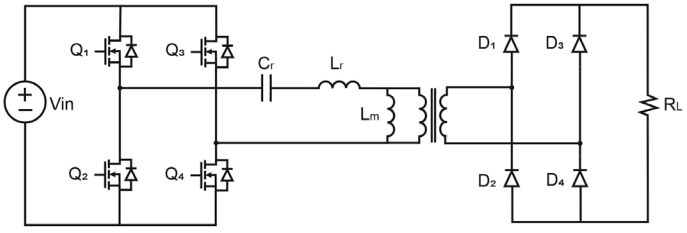


Fig. 4 Diagrama eléctrico del convertidor resonante LLC.

ISSN en trámite

Para realizar el análisis del convertidor resonante se reduce a un circuito equivalente como el que se muestra en la Fig. 5.

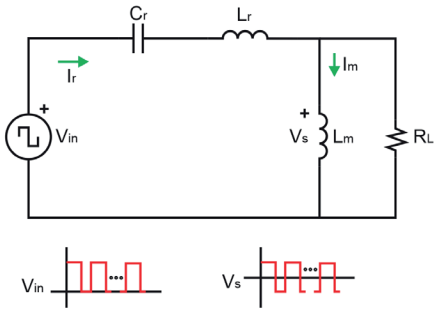


Fig. 5 Circuito simplificado del convertidor LLC.

El circuito de la Fig. 5 opera en f_0 (1) que es la frecuencia de resonancia serie entre Lr y Cr, pero, a medida que disminuyes la frecuencia de operación (f_{sw}) la frecuencia de resonancia del circuito es (2).

$$f_0 = \frac{1}{(2\pi)(\sqrt{L_r C_r})} \tag{1}$$

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_r(L_r + L_m)}} \tag{2}$$

En la ecuación anterior, se puede observar que, a medida que la frecuencia de operación disminuye, la inductancia de magnetización participa en el proceso resonante y la ganancia del tanque es mayor que 1 como se muestra en la Fig. 7. De esta manera la frecuencia de operación (f_{sw}) del circuito se encuentra entre f_0 y f_p. Cuando se opera cerca de f_0, la ganancia se aproxima a 1 y cuando se opera cerca de f_p, la ganancia es mayor que 1.

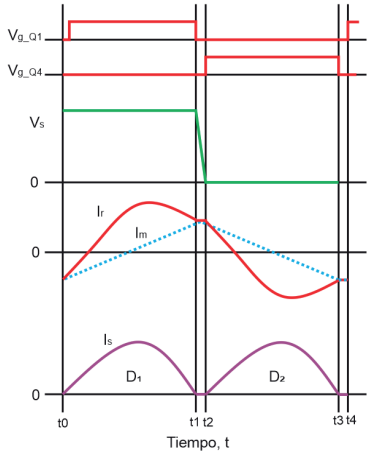


Fig. 6 Curvas de operación a diferentes frecuencias.

En la Fig. 6 se muestra las curvas de tensión y corriente en un tanque LLC cuando el tanque opera a la frecuencia de resonancia. La corriente de magnetización I_m se encuentra en el tiempo muerto con la corriente de resonante I_r, por lo que se logra conmutación cero de tensión en el primario y conmutación suave en el rectificador.

De acuerdo con el circuito simplificado de la Fig. 5, se considera que la tensión de entrada es la fundamental de la tensión cuadrada (3) y el valor RMS (4) para un convertidor puente completo es:

$$V_{ge}(t) = (\frac{4}{\pi})(V_{DC})(sen)(2\pi f_{sw} t) \tag{3}$$

$$V_{ge} = (\frac{\sqrt{4}}{\pi})(V_{DC}) \tag{4}$$

La tensión de salida, vista a la entrada del rectificador donde φ es el ángulo de desfasamiento entre V_{oe} y V_{ge}(5) y su valor RMS (6), es:

$$V_{oe}(t) = (\frac{4}{\pi})(\mathrm{n})(\mathrm{V}_o)(sen)(2\pi f_{sw} t - \varphi_V) \tag{5}$$

$$V_{oe} = (\frac{2\sqrt{2}}{\pi})(n)(V_o) \tag{6}$$

La corriente de CA a la entrada del rectificador reflejada en el primario del transformador de acoplamiento (7) y su valor RMS (8) es:

$$i_{oe}(t) = (\frac{\pi}{2})(\frac{1}{n})(I_o)(sen)(2\pi f_{sw} t - \varphi_i) \tag{7}$$

$$i_{oe} = (\frac{\pi}{2\sqrt{2}})(\frac{1}{n})(I_o) \tag{8}$$

Y la resistencia de CA equivalente vista desde el primario del transformador de acoplamiento (9):

$$R_e = \frac{V_{oe}}{I_{oe}} = \frac{(8)(n^2)}{\pi^2} x \frac{V_o}{I_o} = \frac{(8)(n^2)}{\pi^2} x R_L \tag{9}$$

Mientras que R_L (10) es la resistencia equivalente de la carga.

$$R_L = \frac{V_{out}^{\ 2}}{P} \tag{10}$$

Para determinar R_L se considera el valor mínimo de tensión de la batería y la potencia máxima de salida.

La relación de transformación n (11) está dada por la razón de la tensión de entrada nominal y tensión de salida objetivo.

$$n = \frac{V_{in\_nom}}{V_o} \tag{11}$$

Posteriormente se calcula la ganancia normalizada Mg (12) del circuito resonante simplificado que se muestra en la Fig. 5.

$$M_g = \frac{V_{oe}}{V_{ge}} = \left| \frac{L_n \| f_n^2}{\left[(L_n + 1)(f_n^2 - 1)\right] + j\left[(f_n^2 - 1)(f_n)(Q_e)(L_n)\right]} \right| \tag{12}$$

Donde L_n es la razón de la inductancia de magnetización y la inductancia de resonancia.

$$L_n = \frac{L_m}{L_r} \tag{13}$$

ISSN en trámite

Qe es el factor de calidad (14)

$$Q_e = \frac{\sqrt{L_r / C_r}}{R_e} \tag{14}$$

La frecuencia normalizada fn (15)

$$f_n = \frac{f_{sw}}{f_0} \tag{15}$$

La ganancia normalizada M_g está en función de tres factores f_n, L_n y Q_e como se muestra en la Fig. 7. Para determinar el factor de calidad y L_n, primero se proponen los parámetros de operación del circuito resonante, posteriormente se fija la ganancia máxima y mínima de la aplicación, con el objetivo de seleccionar el valor final del factor de calidad y de L_n.

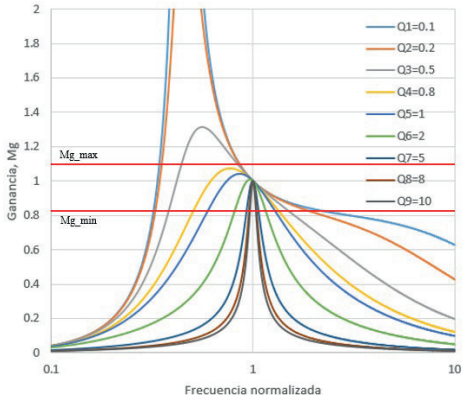


Fig. 7 Ganancia y factor de calidad.

La ganancia máxima (16) y la ganancia mínima (17) se determinan por:

$$M_{g\_}\max = \frac{V_o}{(V_{in\_\min})(n)} \tag{16}$$

$$M_{g\_}\min = \frac{V_o}{(V_{in\_\max})(n)} \tag{17}$$

Una vez seleccionado un factor de calidad se puede calcular el valor de C_r (18), L_r (19) y L_m (20).

$$C_r = \frac{1}{(2\pi)(Q)(f_{sw})(R_e)} \tag{18}$$

$$L_r = \frac{1}{(2\pi x f_{sw})^2 (C_r)} \tag{19}$$

$$L_n = \frac{L_m}{L_r} \tag{20}$$

Una ventaja de la topología resonante LLC, es que ambos inductores pueden estar integrados físicamente dentro de un mismo inductor que incluya la inductancia de resonancia y la inductancia de magnetización, esto en la práctica facilita el diseño del convertidor ya que lo hace menos dependiente de la técnica de construcción del transformador de aislamiento.

3. PARÁMETROS DE DISEÑO DEL CONVERTIDOR RESONANTE

El diseño del convertidor da inicio con el análisis de la curva de polarización de una celda real de una batería de flujo, en estado estacionario, durante el proceso de carga y descarga (Zhang et al,. 2015). En la Tabla I se muestran 4 puntos de operación en estado estacionario A, B, C y D de una batería construida con una celda cuya curva de polarización se muestra en la Fig. 3. La batería propuesta está integrada por 6 celdas individuales en serie con un área transversal de 600 cm^2 operando con un flujo de electrolito y densidad de corriente de hasta 6 lts/min 160 mA/cm^2 respectivamente. Con los puntos de operación estacionaria de la batería se determina la tensión y potencia mínima y máxima que debe manejar el convertidor.

Tabla I Parámetros de operación del modelo de una batería de flujo en estado estacionario.

Punto	Celdas en serie	Tensión de salida por celda (V_{CD})	Tensión suministrada (V_{CD})	Potencia total (W)
A	6	21.5	129	6,192.00
B	6	19	114	10,944.00
C	6	16.6	99.6	9,561.60
D	6	18	108	5,184.00

Con ayuda de Tabla I y considerando una tensión de salida (tensión de bus) de 400V, se seleccionan los parámetros de diseño del convertidor que se muestran en la Tabla II.

Tabla II Parámetros de diseño del tanque resonante.

Parámetros del convertidor resonante	
Tensión de entrada (V_{in})	99.6-129 V
Tensión nominal de entrada ($V_{in\ nom}$)	114.3 V
Tensión de salida (V_{out})	400 V
Potencia máxima de salida (P_{out})	10 944 W
Factor de calidad (Q)	0.5
Frecuencia (f)	10 kHz

En la Tabla III se muestran las ecuaciones de diseño para el convertidor resonante.

Con base en la Fig. 7 y los valores mínimo y máximo de ganancia requeridos por la aplicación, se selecciona L_n= 5 y Q= 0.5. Una vez seleccionados L_n y Q, se calculan los valores de los componentes del convertidor como se muestra en la Tabla III.

Tabla III Parámetros de diseño del tanque resonante.

Parámetro	Formula	Valor
Relación de transformación	$n = \frac{V_{in\_nom}}{V_o}$	n=0.28575 1:3.5
Ganancia máxima	$M_{g\_}\max = \frac{V_o}{(V_{in\_\min})(n)}$	M_{g_max}=1.14
Ganancia mínima	$M_{g\_}\min = \frac{V_o}{(V_{in\_\max})(n)}$	M_{g_min}=0.88
Circuito resonante		
Capacitor resonante	$C_r = \frac{1}{(2\pi)(Q)(f_{sw})(R_e)}$	C_r=32.81 µF

ISSN en trámite

Inductor resonante	$L_r = \frac{1}{(2\pi x f_{sw})^2 (C_r)}$	L_r=7.72 µH
Inductor de magnetización	$L_n = \frac{L_m}{L_r}$	L_m=38.60 µH

4. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Para alcanzar la eficiencia requerida por la aplicación es necesario reducir la resistencia de conducción de los MOSFET´s por lo que se emplearon 4 SCTW100N65G2AG en paralelo para obtener una resistencia de conducción de 5 mΩ.
Se simuló el convertidor propuesto con los puntos de operación de la batería mostrados en la TABLA I. Los resultados se muestran en la Tabla IV y las figuras 8 a la 13.

Tabla IV Resultados obtenidos.

Tensión de entrada	Tensión de salida actual	Potencia de salida actual (kW)	Eficiencia (%)
129	400.07	6.19	93.18
114	400.02	10.94	94.36
99.6	400.04	9.56	94.03
108	400.09	5.2	93.10

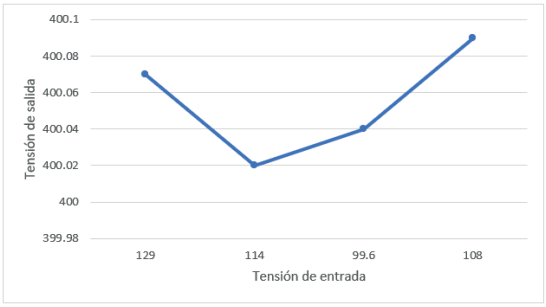


Fig. 8 Tensión de salida en función de la tensión de entrada.

En la Fig. 8 se muestra que en el punto donde la batería entrega la mayor tensión es donde la tensión en el bus de salida es menor, pero en la Fig. 9 se observa que el mayor punto de eficiencia obtenido es cuando la batería entrega 114 V y 10.94 kW.

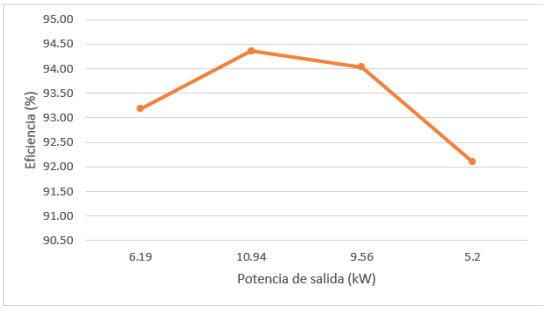


Fig. 9 Eficiencia en función de la potencia de salida.

Para el primer punto de operación donde la batería entrega 129 V se obtuvo una tensión de salida de 400.07 V y una eficiencia de 94.18 % con una frecuencia de conmutación de 12.58 kHz. En la parte superior de la Fig. 10 se muestran las formas de onda de la corriente del MOSFET Q_1 y Q_2 (color azul y color rosa respectivamente) en las que se opera con conmutación suave al encendido debido al diodo en antiparalelo y la corriente negativa resonante. En la parte inferior de la figura, se observa la corriente del rectificador (color rojo) y la corriente del inversor (color verde), sus formas de onda se deben a que el periodo de conmutación es más pequeño que el periodo de la frecuencia de resonancia f_r.

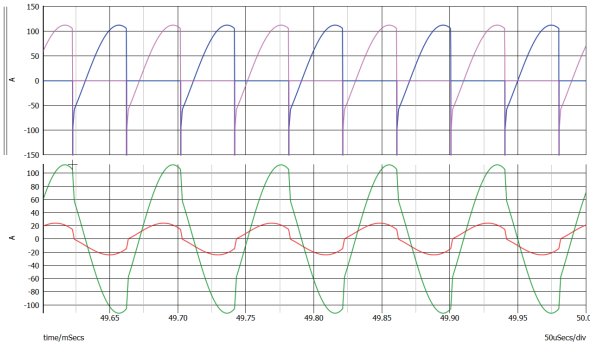


Fig. 10 Corriente en los MOSFET´s en la parte superior, corriente del inversor y corriente del rectificador en la parte inferior corriente en los MOSFET´s.

En otro punto de operación de la batería donde esta entrega 114 V y su punto máximo de potencia de 10.94 kW, se obtuvo una eficiencia del 94.36 % a una frecuencia de operación de 9.5 kHz que es un valor por debajo de la frecuencia de diseño. En este punto donde se opera muy cerca de la frecuencia de diseño es donde se obtuvo la mayor eficiencia. En la Fig. 11 se observa que la corriente del rectificador (color verde) entra en el modo discontinuo debido a que la frecuencia f_{sw} está por debajo de f_r mientras que la forma de onda de la corriente del inversor (color rojo) es típica como se muestra en la Fig. 6. La corriente en los MOSFETS (color azul y color rosa) indica que éstos operan en conmutación suave.

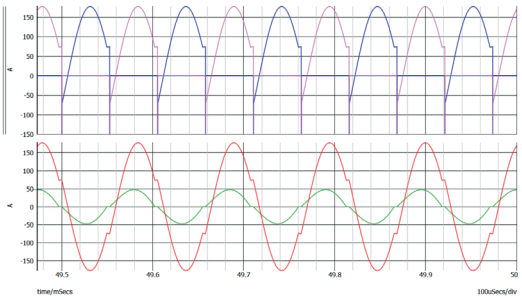


Fig. 11 Corriente en los MOSFET´s en la parte superior, corriente del inversor y corriente del rectificador en la parte inferior.

En la Fig. 12 se muestran las formas de onda en convertidor cuando la bateria opera a 99.6 V y 9.56 kW. En esta ocasión, se obtuvo una tension de salida del convertidor de 400.04 V y una eficiencia de 94.03% con una frecuencia de operación de 7.647 kHz. Las formas de onda de corriente son semejantes a las mostradas en la Fig. 10 con el rectificador operando en modo discontínuo. En la Fig. 10 se puede observar también que los MOSFETs operan en conmutación suave.

ISSN en trámite

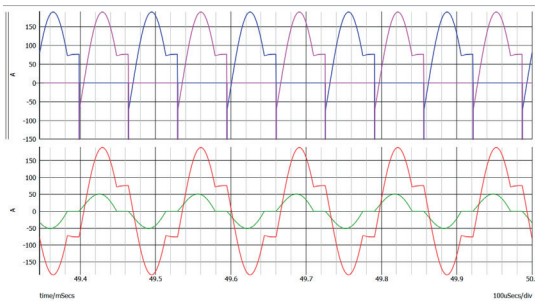


Fig. 12 Corriente en los MOSFET´s en la parte superior, corriente del inversor y corriente del rectificador en la parte inferior.

Cuando la batería entrega 108 V, en el bus se entregan 400.09 V y una potencia de 5.2 kW siendo así la eficiencia más baja obtenida a una frecuencia de 8.8 kHz. En la Fig. 13 se observa que la corriente del rectificador (color verde) entra en el modo discontinuo debido a que la frecuencia f_{sw} está por debajo de f_r mientras que la forma de onda de la corriente del inversor (color rojo) es típica. La curva de corriente en los MOSFET´s (azul y rosa) indica que se opera en conmutación suave.

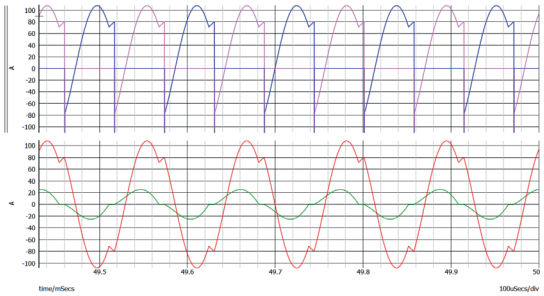


Fig. 13 Corriente en los MOSFET´s en la parte superior, corriente del inversor y corriente del rectificador en la parte inferior.

5. CONCLUSIONES

En la literatura se han reportado numerosas aplicaciones de convertidores resonantes LLC; sin embargo, pocas son enfocadas a las energías renovables. En general, los convertidores resonantes tienen eficiencias superiores al 96% pero los diseños mostrados trabajan con bajas potencias y con rangos de tensión de entrada limitados. En este artículo, se presentó el diseñó y simulación un convertidor resonante LLC capaz de mantener la conmutación suave, operando con amplia variación de la potencia y tensión de entrada y manteniendo la tensión de salida estable. El convertidor resonante diseñado opera con potencias elevadas y, al integrar el inversor con MOSFET´s en paralelo, se logró disminuir las pérdidas a pesar de que la corriente resonante mantiene niveles elevados debido a la potencia. En los puntos de operación de la batería simulados se obtuvieron eficiencias por arriba del 94%.

Esta topología, al operar con potencias y bajas pérdidas, permite un uso eficiente de la energía almacenada en baterías de flujo. De esta manera, es posible incursionar en el almacenamiento masivo de energía y mejorar las oportunidades de negocio para la integración de fuentes renovables de energía, como es el caso del *"Capacity Firming"*.

En este artículo, se analizó el convertidor configurado para la descarga de una batería de flujo, por lo tanto, un reto futuro es lograr la bidireccionalidad del convertidor manteniendo la conmutación suave, la alta eficiencia a elevadas potencias y los valores de ganancia requeridos para el proceso de carga de la batería.

6. REFERENCIAS

Bryans, D., Amstuz, V., Girault, H., & Berlouis, L. (2018). Charecterisation of a 200 kW/400 kWh Vanadium Redox Flow Battery. *Journal of batteries*.

Cunha, Á., Martins, J., Rodrigues, N., & Brito, F. (2014). Vanadium redox flow batteries: a technology review. *International Journal of Energy Research*, 889-918.

Dincer, I., & Acar , C. (2015). A review on clean energy solutions for better sustainability. *International Journal of Energy Research*.

Gowrisankaran, G., S Reynolds, S., & Samano, M. (2016). Intermittency and the Value of Renewable Energy. *Journal of Political Economy*, 1187-1234.

Konig, S., M. R, S., & T, L. (2015). Model based examination on influence of stack series connection and pipe diameters on efficiency of vanadium redox flow batteries under consideration of shunt currents. *Journal of Power Sources*, 272-284.

Lou, X., Wang, J., Dooner, M., & Clarke, J. (2015). Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy*, 511-536.

Lucas, A., & Stamatios , C. (2016). Smart grid energy storage controller for frequency regulation and peak shaving, using a vanadium redox flow battery. *Electrical Power and Energy Systems*, 26-36.

Naciones unidas. (2008). *Protocolo de Kyoto.* Kyoto.

Q, X., & T, Z. (2015). Fundamental models for flow batteries. *Progress in Energy and Combustion Science*, 40-58.

Shen, Y., Wang, H., Al-Durra, A., Qin, Z., & Blaajbjerg, F. (2018). A bidirectional resonant dc-dc converter suitable for wide voltage gain range. *IEE Trans. Power Electron*, 2957 - 2975.

Yang, D., W, D., & J, D. (2018). A bidirectional LLC-C resonant DC-DC converter based on normalized symmetry resonant tank. International Federation of Automatic Control, 685-689.

Yu, S., Chen, R., & Viswanathan, A. (2018). Survey of Resonant Converter Topologies. Power Supply Desing Seminar.

Zhang, Y., Zhao, J., Wang, P., Skyllas, M., Xiong, B., & Badrinarayanan, R. (2015). A comprensive equivalent circuit model of all-vanadium redox flow battery for power system analysis. Journal of Power Sources, 14-24.

ISSN en trámite

Robot móvil para la desinfección de interiores mediante luz UV-C

Haydee Patricia Martínez Hernández*. Hugo Morales Hernández*
Raúl Cortés Maldonado*, Roberto Morales Caporal* Rafael Ordoñez Flores*

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Apizaco, Carretera Apizaco-Tzompantepec, Esquina con Av. Instituto Tecnológico S/N. Conurbado Apizaco-Tzompantepec, Apizaco 90300, México (Tel:241-41-7-20-10, ext.245; e-mail: haydee.mh@apizaco.tecnm.mx).

Abstract: El 11 de marzo de 2020, la Organización Mundial de la Salud (OMS) calificó como pandemia al brote de coronoavirus tipo 2 que produce el síndrome respiratorio agudo severo (SARS-CoV-2). A partir de esta situación, el gobierno mexicano instruyó a las instituciones públicas y privadas a establecer medidas restrictivas para evitar la propagación del virus, por ejemplo, cuarentenas, cancelación de eventos masivos, aforos máximos en lugares cerrados, cierre de escuelas, así como evitar el uso de espacios comunes, entre otras. Los retos que trajo consigo la pandemia han motivado a académicos e investigadores a desarrollar propuestas tecnológicas que permitan hacer uso de espacios y objetos comunes, reduciendo el riesgo de contagio por la presencia de SARS-CoV-2 en entornos cerrados. En este trabajo se presenta el diseño de un robot móvil que permite desinfectar espacios cerrados a través de luz ultravioleta C (UV-C). El robot móvil es operado a distancia vía bluetooth mediante una application para Android que permite encender y apagar las lámparas UV-C, así como regular la altura a la que se hace incidir la radiación.

Keywords: luz UV-C, robot, aplicación, COVID-19, .

1. INTRODUCCIÓN

La pandemia COVID-19 causada por el virus SARS-CoV-2 ha provocado cerca de cinco millones de muertes en todo el mundo. Al día de hoy, México reporta más de 280 mil muertes y 354 mil casos activos (Worldometer, 2021). Dentro de las medidas adoptadas por los gobiernos del mundo para reducir el esparcimiento del virus se encuentran: (1) pruebas masivas, (2) cuarentenas, (3) desinfección, (4) distanciamiento social y (5) medidas sanitarias (Guettari et al, 2021). En particular, la desinfección de espacios comunes y superficies considera el uso de hipoclorito de sodio en concentraciones de 0.1% o 1000 ppm, alcohol al 70-90%, formaldehído, entre otros compuestos químicos (Megalingam et al, 2021). Sin embargo, debido a que el SARS-CoV-2 es un virus altamente contagioso que puede permanecer activo en superficies desde algunas horas hasta días, es recomendable aplicar tecnologías de desinfección que no requieren contacto. De manera particular, se ha comprobado que la radiación ultravioleta tipo C (longitud de onda de 200-280 nm) es capaz de inactivar diferentes tipos de virus, entre ellos el que produce COVID-19. Uno de los principales mecanismos viricidas asociados a la radiación UV-C es la absorción directa del fotón por la base del ácido nucleico y/o proteínas de la cápside, lo que conduce a la generación de foto productos que inactivan el virus (Biasin et al, 2021).

La eficiencia de la radiación UV-C depende del tipo de microorganismo, la suciedad, la energía aplicada y el tiempo de exposición. De manera particular, la efectividad de la tecnología UV-C se ve limitada por la distancia y por la sombra que produce el mobiliario del área a desinfectar.

En este trabajo se presenta el diseño de un robot móvil que permite desinfectar espacios cerrados a través de luz ultravioleta tipo C (UV-C), contribuyendo a un retorno seguro de actividades presenciales en espacios cerrados y comunes en instituciones educativas. El robot móvil es operado a distancia vía bluetooth mediante una aplicación para Android que permite encender y apagar las lámparas UV-C, así como regular la altura a la que se hace incidir la radiación.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

Bugarin-Carlos y Aguilar-Bustos describen una propuesta de control visual en tiempo real y alta velocidad para la formación de robots móviles tipo un ciclo bajo el esquema líder seguidor, sin depender de los parámetros del sistema de visión, el cual nos ilustra otra manera de controlar el robot mediante una cámara fija (Bugarin et al, 2013). Mientras que Gutiérrez Arias et. al sintetizaron el control óptimo a partir de un sistema lineal, solucionando una ecuación diferencial matricial de Riccati para un tiempo infinito y exclusivamente para sistemas lineales invariantes en el tiempo (Gutiérrez Arias et. al. 2011). Se consultó el trabajo de investigadores que centraron robots o robótica de enjambres con herramientas para el análisis de datos y la interacción entre múltiples robots, sensores y dispositivos de tele operación (André Araújo, et al 2014). Por otro lado, el

ISSN en trámite

trabajo de Sanahuja G. se observa la implementación realizada de un control de movimiento basado en el flujo óptico de un micro robot móvil con recursos muy limitados, pero con resultados obtenidos con este robot son extrapolables a cualquier otro tipo de sistemas móviles

3. ARQUITECTURA DEL PROTOTIPO

El prototipo robot móvil para la desinfección de interiores mediante luz UV-C está constituido por ocho bloques (Figura 1), los cuales se describen a continuación.

Microcontrolador. El control del robot se logra a través de una tarjeta electrónica con un microcontrolador PIC18F25K50 de 8 bits, el cual utiliza un oscilador externo, compuesto por un cristal de cuarzo de 8 MHz y dos capacitores cerámicos de 22 pF. Este es el componente principal de esta aplicación embebida. Elegido por la cantidad de puertos disponibles para 3 acciones independientes, como son: el control de las ruedas que le dan movimiento al prototipo, la etapa del accionamiento del motor de desplazamiento lineal que acciona la tijera y la última etapa que activa el encendido y apagado de las lámparas UV-C. No obstante, es un dispositivo eficiente y de bajo costo.

Regulación de voltaje. Ya que la fuente de alimentación utilizada para energizar el prototipo entrega 12 VDC a la placa, es necesario regular este voltaje a 5 VDC, para ello se usó un circuito integrado modelo L7805CV, que es un regulador de voltaje capaz de entregar hasta 1.5 A de corriente de salida, lo cual es suficiente para poder alimentar los elementos que operan con esta diferencia de potencial de 5 V, entre los que se incluyen el microcontrolador, el módulo Bluetooth, los drivers VNH2SP30 y el optoacoplador.

Potencia. Para poder controlar los motorreductores que ayudan a desplazar el prototipo, se usan dos módulos drivers VNH2SP30, cada uno cuenta con 2 entradas digitales con niveles de 0 a 5 volts para controlar el sentido de giro del motor y una entrada de señal PWM para controlar la velocidad de giro del motor; estas señales son proporcionadas por el microcontrolador.

Para controlar el sentido de giro del motor de desplazamiento lineal del actuador, se implementó un circuito Puente H utilizando como elementos principales dos transistores BJT NPN modelo 2N3904, dos transistores MOSFET de canal P modelo IRF9540 y dos transistores de canal N modelo IRFZ44N. Los transistores MOSFET fueron correctamente elegidos para soportar la corriente demandada por el motor. Las señales de control son proporcionadas por el microcontrolador y entregadas a la base de cada transistor BJT.

Lámparas UV-C. La alimentación de 127 volts para las lámparas UV-C se lleva a cabo mediante un cable de 10 metros de longitud aproximadamente, el cual es conectado a un circuito que controla el encendido y apagado de las lámparas UV-C, este circuito conmutador de corriente alterna está diseñado con un TRIAC modelo BTA16 acoplado a la salida de control del PIC con un optoaislador modelo MOC3021, esto evita de un daño irreversible al microcontrolador en caso de cortocircuito o sobrecarga eléctrica.

Comunicación
Para poder establecer comunicación de forma inalámbrica a mediana distancia entre el microcontrolador y la interfaz de usuario (interfaz de control mediante una aplicación de Smartphone con sistema operativo Android) se utiliza un módulo Bluetooth HM-10. Este intercambia datos de forma serial usando el protocolo UART (Transmisor-Receptor Asíncrono Universal) utilizando los pines RX y TX del microcontrolador. Este protocolo de comunicación establece comunicación entre el microcontrolador y la interfaz de usuario (interfaz de control mediante una aplicación de Smartphone con sistema operativo Android). En este bloque se utiliza un módulo Bluetooth HM-10, el cual intercambia datos de forma serial usando el protocolo UART (Transmisor-Receptor Asíncrono Universal) utilizando los pines RX y TX del microcontrolador.

Ajuste de altura.

El motor de desplazamiento lineal eyecta un vástago que permite la contracción y elongación de un mecanismo de pinza. Dicho mecanismo establece la altura del ortoedro que contiene las lámparas UV-C.

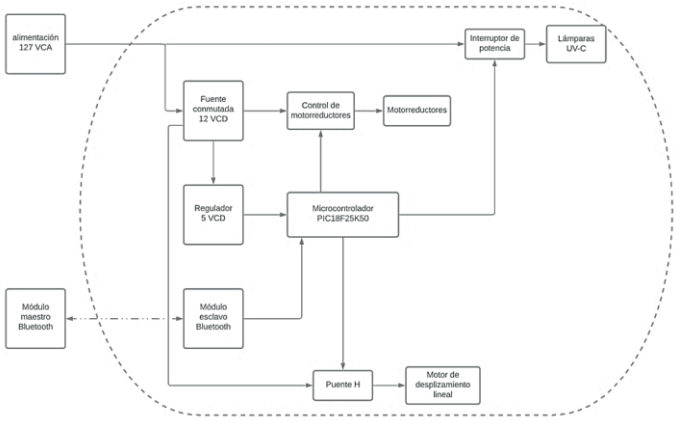


Fig. 1 Arquitectura del prototipo

El circuito Electrónico del prototipo robot móvil se muestra en la Figura 2, el cual contiene las etapas antes mencionadas.

4. DISEÑO E IMPLEMENTACION

A. Diseño Mecánico

La Figura 3 muestra el diseño en Solidwordks del robot móvil para la desinfección de interiores mediante luz UV-C. El diseño consta de dos estructuras en forma de ortoedro acopladas mediante un sistema de elevación tipo tijera. El ortoedro inferior

ISSN en trámite

tiene el objetivo de brindar estabilidad al robot mediante un par de llantas de dirección fija y otro par giratorio, además, permite alojar al sistema electrónico de control. En el ortoedro superior se ubican ocho lámparas de luz UV-C y debido a que el área de desinfección de cada lámpara es de 8W <= $12m^2$ (de acuerdo con datos de fabricación), se calcula que la desinfección a la redonda es de 12 m^2, con un tiempo de desinfección de 30 a 60 minutos, recomendados de 2 a tres veces por semana. El mecanismo de elevación tipo tijera permite que el ortoedro superior alcance una altura máxima de 90 cm con respecto al nivel del suelo.

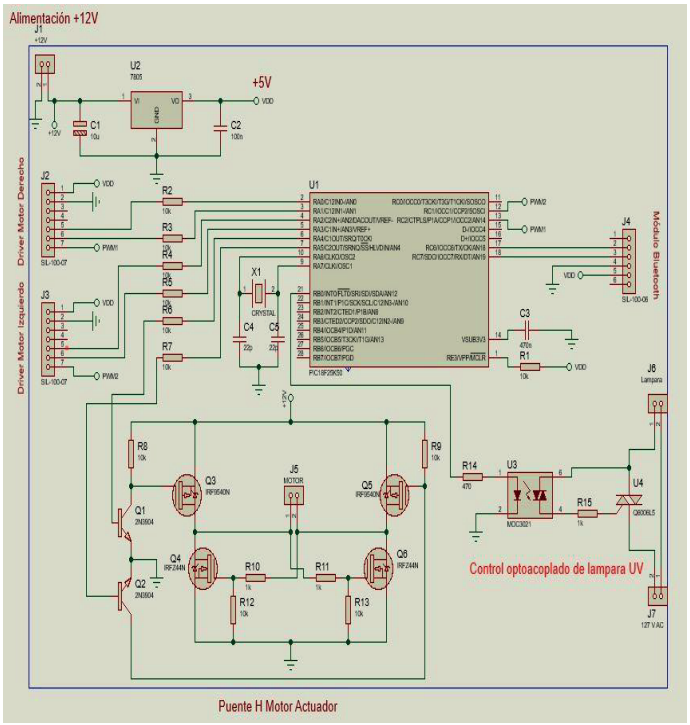


Fig. 2 Circuito electrónico del prototipo robot móvil

B. Aplicación Android

El desplazamiento del robot móvil se controla a través de un teléfono inteligente con una aplicación android, la comunicación entre el teléfono y el robot móvil se realiza por bluetooth a bajo consumo hasta una distancia de 12 m de forma inalámbrica (Sallent Roig et al, 2003). La interfaz contiene tres botones circulares y un botón en forma de cruz (ver Figura 4). El botón circular permite encender o apagar las lámparas UV-C, el botón verde permite elevar el octaedro superior a una altura máxima de 90 cm, el botón rojo permite bajar el octaedro superior hasta una altura mínima de 40 cm. El botón en forma de cruz permite controlar la dirección de movimiento del robot móvil, la flecha hacia arriba indica que el movimiento del robot es hacia adelante, la flecha hacia abajo permite que el robot se mueva en reversa, el botón a la derecha y a la izquierda indican giro a la derecha e izquierda, respectivamente.

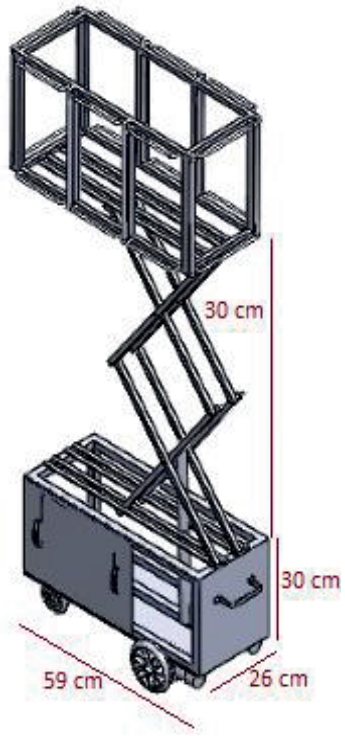


Fig. 3 Diseño mecánico del robot móvil



Fig. 4 Interfaz desarrollada con Bluetooth Electronics para teléfono inteligente que permite controlar el robot móvil.

5. DISCUSIÓN

Las aulas para desinfectar tienen aproximadamente 30 m^2, las cuales están amuebladas con mesas y sillas, (ver Figura 5), separadas por pasillos. Debido a que el área de desinfección por lámpara es de 12 m^2, la desinfección en estas aulas se realiza en dos momentos. Se divide el aula en dos y se ubica primero en esta mitad el robot móvil y de activan las lámparas por aproximadamente 40 minutos, posteriormente en ese mismo lugar se eleva el ortoedro mediante el sistema de elevación tipo tijera y nuevamente se activa la desinfección por 40 minutos. Posteriormente se realiza lo mismo en el segundo extremo del aula.

ISSN en trámite

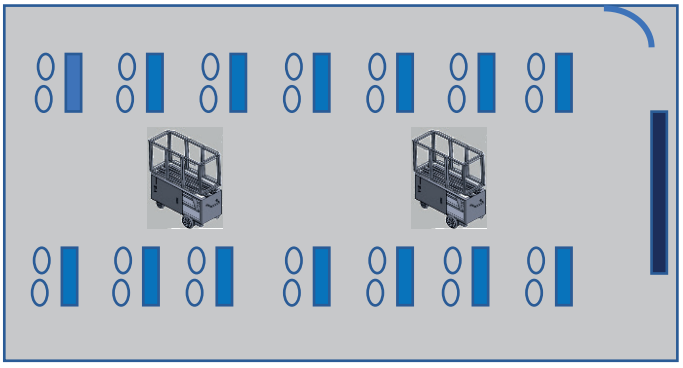


Fig. 5 Aula de desinfección

Cabe mencionar que este proceso de desinfección debe ser sin la presencia de ser humano alguno, debido a que la exposición constante y directa a la luz UV-C puede causar quemaduras en la córnea, desarrollo de cataratas y daño en la retina. Es por eso por lo que se trasladan a control remoto y una vez ubicados se activan tambien a control remoto.

6. CONCLUSIONES

Se ha presentado una propuesta de robot móvil controlado a distancia vía bluetooth mediante una aplicación Android para desinfectar espacios cerrados mediante luz UV-C. El robot móvil se presenta como una herramienta complementaria al proceso manual rutinario de limpieza. En el diseño del robot se ha considerado que el operador pueda controlar desde la aplicación la ubicación y la altura a la que se hace incidir la luz UV-C, sin la necesidad de que la persona se mantenga en esta zona. El objetivo de que el robot móvil presente un ortoedro acoplado mediante un sistema de elevación tipo tijera, es para que la radiación alcance objetivos que se ubican a una altura mayor a 90 cm en un radio de $12m^2$.

REFERENCIAS

André Araújoa, David Portugala, Micael S. Couceiroa, Jorge Salesc y Rui P. Rocha. 2014. Desarrollo de un robot móvil compacto integrado en el middleware ROS. Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial 11 315–326© 2014 CEA. Publicado por Elsevier España, S.L. http://dx.doi.org/10.1016/j.riai.2014.02.009

Biasin, M., Bianco, A., Pareschi, G. et al. 2021. UV-C irradiation is highly effective in inactivating SARS-CoV-2 replication. *Sci Rep* 11, 6260.

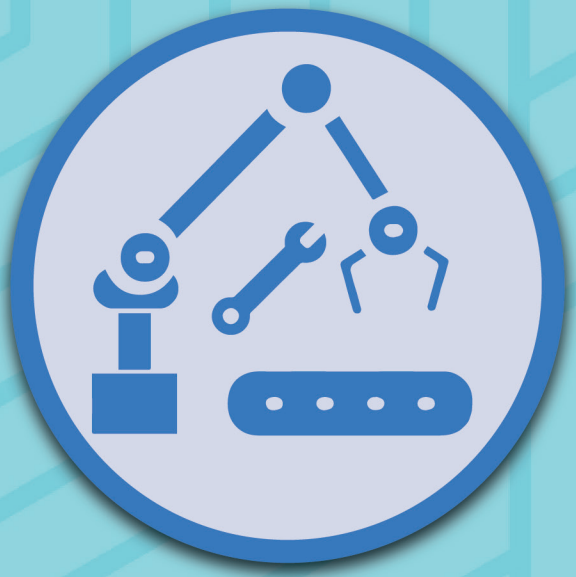
Bugarin-Carlos Eusebio, Aguilar-Bustos Ana Yaveni. 2013. Control visual para la formación de robots móviles tipo uniciclo bajo el esquema líder-seguidor. Ingeniería Investigación y Tecnología, volumen XV (número 4), octubre-diciembre 2014: 593-602ISSN 1405-7743 FI-UNAM

Guettari, M., Gharbi, I. & Hamza, S. (2021). UVC disinfection robot. *Environ Sci Pollut Res* 28, 40394–40399.

Gutiérrez Arias J. E., Hernández Angulo Moisés Lucio M. Monserrat, Castillo Morın, Flores Mena J. Eladio. 2011. Control Optimo para Trayectorias Circulares en un Robot Móvil Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial 229–240.

Megalingam, R. K., Raj, A., Manoharan, S. K. and Egumadiri, V. App Based Teleoperated UV Disinfectant Robot for COVID Cause. (2021). *2021 Second International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC)*, pp. 277-281.

Sallent Roig, O., Valenzuela González, J. and Agustí Comes, R., 2003. Principios de comunicaciones móviles. Barcelona: Edicions UPC.



INGENIERÍA MECÁNICA

cenidet®
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

ISSN en trámite

Fabrication and characterization of a cement-based mortar with supplementary additions of kaolin, vermiculite and pumice as a building material with low thermal conductivity

Diaz-Peña, Ismael*. Zaldivar-Cadena, Antonio Alberto. Guzman-Hernandez, Ana María**. Alcaraz-Vega, José Angel*. Audelo-Moreno, Gabriel***

**Tecnológico Nacional de México Campus Culiacán. Juan de Dios Bátiz S/N 80220. Culiacan, Sinaloa (Mexico).*
***Universidad Autónoma de Nuevo León, Av. Universidad S/N 66451. San Nicolas de Los Garza, Nuevo Leon (Mexico)*
Corresponding author: Diaz_1986@hotmail.es

Abstract: In this study it was analyzed the addition of kaolin, vermiculite and pumice in a mixture for fabrication of a cement-based mortar in order to obtain a building material with low heat transfer. The three natural components were added to the mixture at fresh stage at different percentages, and the procedure was realized according to the standards of the ASTM. In addition, water and sand were added as conventional components. The components were characterized by advanced techniques such as Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM-EDS), X-Ray Diffraction (XRD) and X-Ray Photoelectron Spectroscopy (XPS). For the measure of the capacity of the thermal conductivity, the different mixtures were studied with heating plates, thermocouples, and infrared thermometer. Eight mixtures were studied, each one with different levels of supplementary components (%). One of the experimental samples resulted in the best performance with a final temperature of 25.1 °C versus the control mortar with 40°C, at the end of the experiment. Since the number of components of the mixtures were elevated compared with a conventional mortar, here is shown a matrix L8 where a statistical analysis by a Design of Experiment (DoE) was developed. Control and experimental mortar were compared in weight, microstructure and Ca/Si ratio as well. The compressive strength (after 28 days) of the samples was measured and related with the thermal conductivity.

Keywords: Thermal comfort, cement-based mortar, supplementary materials, mechanical properties.

1. INTRODUCTION

Nowadays, climate change is more than an assumption. The consequences of the human activities are affecting the environment in all possible ways: food production, manufacturing, life conditions quality, among others. Those effects are increased every day because most of the human needs and their processes are not planned for lead a sustainable development (Mahdi Akbari et al., 2020). The case of the building industry is one of the most critical, due it is an industry with the highest pollution indicators: from the cement fabrication to the construction of every building. Every person involved in building and construction, should have some knowledge about not only technical factors, but also awareness of the environmental impact of the actions related of this industry (Yong Tao et al., 2020).

One of the most important problems of the buildings is the distribution, consumption and management of the energy required for the edification. The energy for every function of the structure is translated in a monetary cost and environment effects (Stephen Berry et al., 2019). This study is focus on those buildings in zones with high solar radiation and elevated temperatures, where buildings need to have a proper cooling system and refrigeration equipment, which are consuming a high amount of energy. Regarding this, it can be inferred that a high solar radiation can be a source of heat that is forced to move forward into the building due a difference of temperature (ΔT= High temperature – Low Temperature). Then, the refrigeration systems must be activated to maintain a standard comfort environment inside the building, but resulting in a consumption of energy, which is directly proportional to the temperature difference: this is, the higher ΔT, the higher energy consumption. Once the energy consumption is determined, it can be inferred that the environment is affected, due the fact that most of the energy generation in the world comes from non-renewable sources (Londoño-Pineda Abraham et al., 2019) and most of them are harmful emissions and other solid wastes. Now, according to this phenomenon, those emissions increase the rate of evolution of the climate change, creating zones with

ISSN en trámite

even more higher temperatures (higher ΔT) and thus, more energy for refrigeration must be used. Following that mechanism, it becomes in a harmful cycle, which deteriorate every day the environment around the human population.

This research aims to study a building material, with supplementary % of alternative components. The natural components selected to analysis here, are kaolin, vermiculite, and pumice. These natural materials were added to different mixtures to create a cement mortar with a low heat conductivity, which can help to reduce the temperature difference that create the heat transfer into the building. According to the Fourier's Law for the heat transfer by conduction at steady state, the heat potential varies through a solid element with a linear behavior. This heat transfer is affected by the thermal conductivity of the material, the surface area of analysis, the material thickness and finally, the temperature gradient (T_{high}- T_{low} = ΔT). One of the objectives here was to reduce the thermal conductivity. Usually, the heat transfer is measured in watts and this is related to the amount of energy used by house and the costs it carries.

2. MATERIALS AND METHODS

There were made eight mixtures with different levels of supplementary components and one control specimen (cement, water and sand) to compare the effect of each of one of the factors (kaolin, vermiculite, pumice). It was used a commercial Portland cement for all the mixtures, with a chemical composition determined by XPS, where can be observed that the cement is mainly composed of SiO_2 (30.864%) and CaO (59.036%) (Fig.1).

Compound	MgO	Al_2O_3	SiO_2	SO_3
Conc unit	0.362%	1.671%	30.864%	4.942%
	MoO_3	SnO_2	PbO	MnO
	78.5 ppm	238.1 ppm	159 ppm	383.4 ppm
	Fe_2O_3	CuO	ZnO	SrO
	2.117%	240.5 ppm	487.6 ppm	865. ppm
	Cl	K_2O	CaO	TiO_2
	0.149 %	0.495 %	59.036 %	0.115 %

Fig.1. XPS analysis for chemical composition of the commercial Portland cement.

The chemical composition of the sand (mesh 20-30, ASTM) used for all specimens were analyced. The SEM-EDS mapping analysis shows the presence mainly of Fe, Ca, K, Mg, Na, Al and Si. For specimen control and specimens with supplementary materials, the procedure for preparation and other considerations was according to the standards ASTM C109, C91, C511 and C305 for the fabrication of cube specimens of 50 mm (Fig.2).

Vermiculite was selected due its high values of surface area, which is related to a low density. Vermiculite has a high amount of interconnected porous and channels, and thus, along with its high volume and low density, represent the possibility of generate void areas inside the mortar microstructure. The chemical analysis by SEM-EDS mapping shows the presence mainly of Ca, Fe, Mg, Al, and Si. There were found closed pores and interconected pores with void spaces sizes between 1 µm and 25 µm (Fig.3).

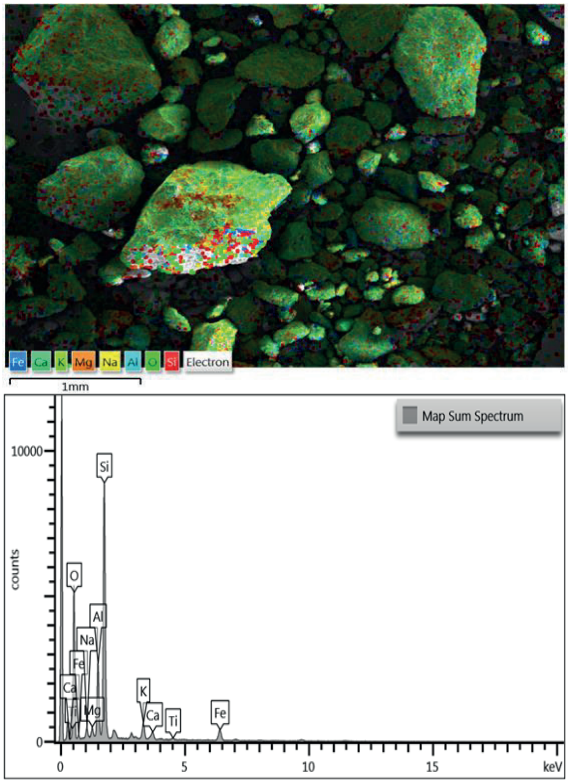


Fig.2 SEM-EDS mapping of sand used for all the mixtures and chemical composition.

The mineral pumice is a highly porous material, which is mainly composed by Si (Fig.4), and it is considered as a pozzolanic material. Pumice can have two main effects: First, the pozzolanic activity with the hydration of cement. This is, after C_2S ($2CaO.SiO_2$) and C_3S ($3CaO.SiO_2$) react with water to form C-S-H gel, portlandite ($Ca(OH)_2$) is generated from that process; after that, it could be possible for portlandite to react with external SiO_2 (from the pumice) to form secondary C-S-H phase. Thus, the phase of C-S-H gel is formed, and a portion (%) of cement was removed, which represent a reduction of its use (less use of cement, less emission to the atmosphere). Also, the second objective of pumice is to add volume and porosity to the final microstructure of the cement mortar, it means, create empty spaces to reduce the rate of heat conduction.

The third supplementary component is kaolin, a clay mineral that is mainly composed by Al and Si. The SEM-EDS shows the chemical composition and the morphology (Fig.5). In this case, kaolin was a commercial product with defined characteristics: particle size with less than 1 µm and some agglomeration forming particles longer than 25 µm. In this

ISSN en trámite

form, kaolin has a hydrated microstructure, which can result in a low reactivity with the process of cement hydration.

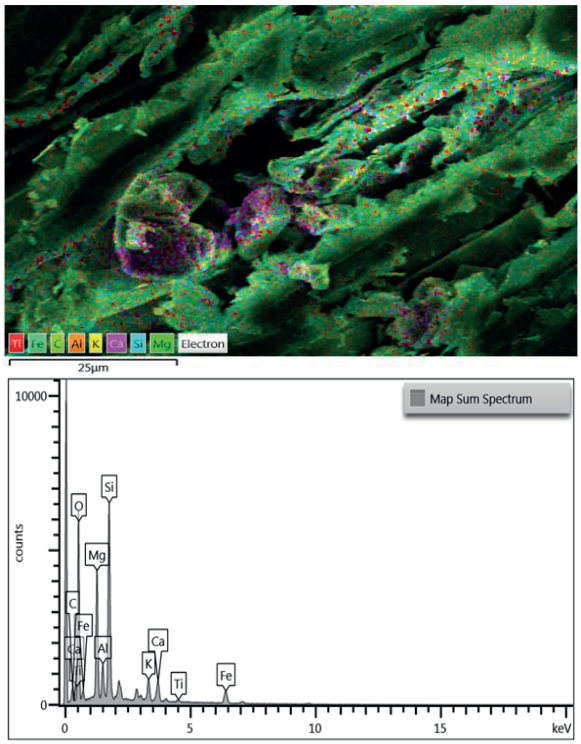


Fig. 3 SEM-EDS analysis and chemical composition of vermiculite.

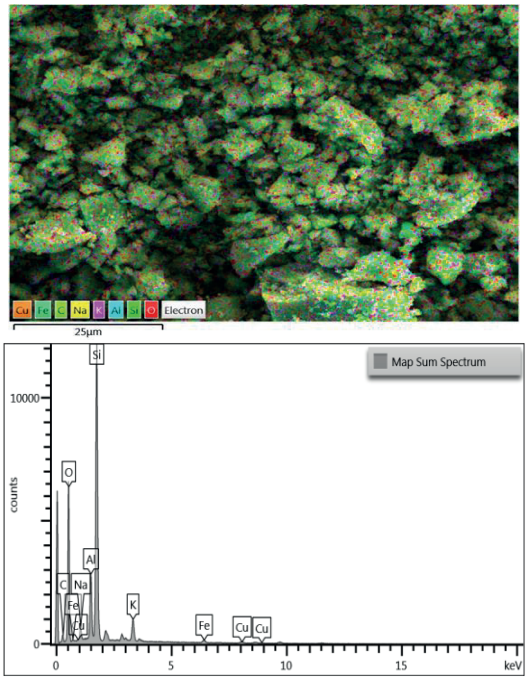


Fig. 4. SEM-EDS analysis and chemical composition of pumice.

Metakaolin is the anhydrous form of kaolin after being heated to a temperature between 500°C – 800 °C with the reaction $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ (kaolin) → $Al_2Si_2O_7$ + 2 H_2O (metakaolin + dissociated water). Metakaolin is widely used as a pozzolanic material in concrete fabrication (Muduli et al., 2020) but as was mentioned above, require a lot of energy for its manufacturing, which would increase the monetary cost and the amount of harmful emissions from energy consumption (Salimi et al., 2020). It can be observed a comparison between the XRD of kaolin and metakaolin and how the anhydrous phase is formed after heating process (Fig.6).

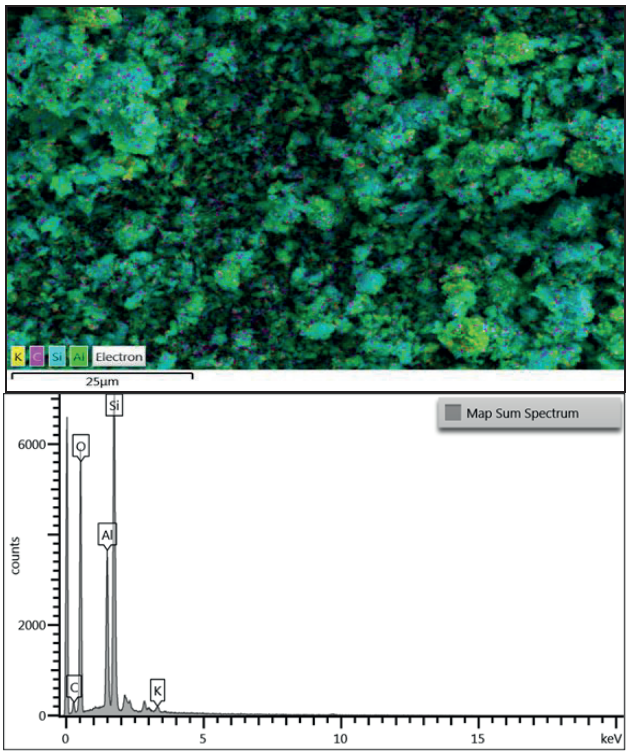


Fig.5. SEM-EDS Mapping analysis of Kaolin.

One of the main objetives of using Scanning Electron Microscopy with a coupled Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy detector, is for analize the morphology (Secondary Electrons), chemical composition (Backscattered Electrons) and elemental mapping (EDS). It is very important for characterization to study the factors which are involved in the final mixture to infer the final properties of the cement based mortar.

ISSN en trámite

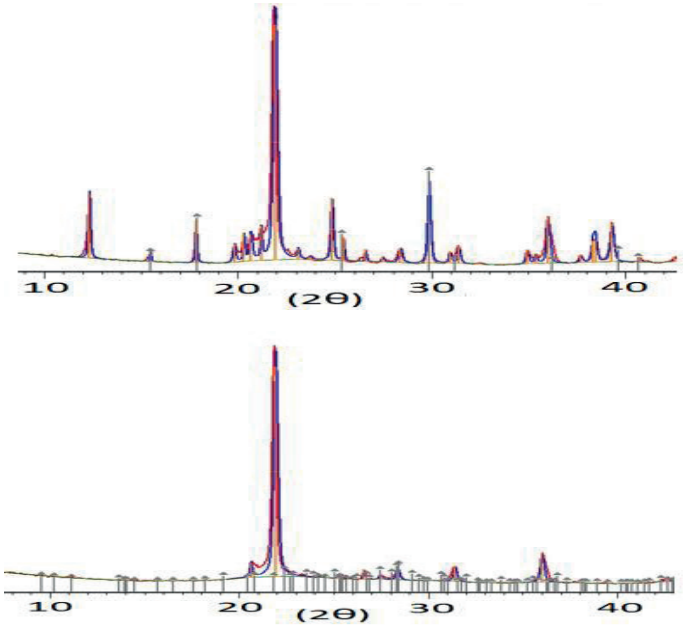


Fig.6. XDR of kaolin (up) with a main peak at 30 (2θ) that shows the hydrated phase and metakaolin (down). Temperature of heat: 550°C.

2.1 Experimental procedure

The fabrication of the control specimen consists in the three conventional components in the following values: cement 450 g, water 315 g and sand 1237.5 g. Those vales result in a water/cement ratio of 0.7 and sand/cement ratio of 2.75.

Due to the nature of the experiment, with a large number of different components of the mixtures, it was selected a matrix L8 from Statistical Design of Experiment (DoE) from Taguchi (Taguchi et al., 2005), in order to have an arrangement matrix which allow to have a controlled and organized variation of low and high levels of the supplementary and conventional materials (Fig.7).

Mixture	Cement (gr)	Vermiculite (gr)	Pumice (gr)	Kaolin (gr)	Sand (gr)	Water (gr)
R1	200	100	450	200	100	650
R2	200	100	450	240	120	780
R3	200	110	540	200	100	650
R4	200	110	540	240	120	650
R5	240	100	540	200	120	650
R6	240	100	540	240	100	780
R7	240	110	450	200	120	780
R8	240	110	450	240	100	650

Fig.7. Matrix L8 from Taguchi for variation of 6 factors and 8 final mixtures.

Once the control and experimental specimens were fabricated, they were stored in a moist room for 28 days to complete the minimum required hydration time. After that, there was carried out the experiment to measure the capacity of the different mixtures to conduct heat. The experiment to observe the thermal conductivity consisted in set a mortar specimen in a heat plate (Thermo Scientific, Model HP88857100) with a constant temperature and measure the temperature of the opposite side through the time. The constant temperature of the heat plate was 80°C due the fact that temperatures around 100°C could affect the bonded water of the microstructure of the samples. The room temperature was 24°C, measured during all the experiment with a thermocouple (Multimeter Craftsman, with a K Type Thermocouple) and the temperature of the opposite side was measured with an infrared thermometer (Craftsman) (Fig.8). The experiment duration for each mixture was 1 hour. It is important to notice that there could be a thermal insulation in the 4 faces of the sample (perpendicular to the base), but in this particular case, there was an aim to simulate conventional condition (a real house) where heat transfer by convection occurs.

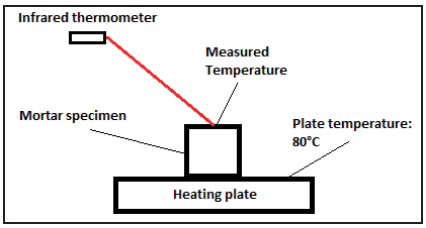


Fig.8. Diagram of experiment to measure temperature through the time.

3. RESULTS AND DISCUSSION

After measure all the experimental mortars, their final temperature was compared with the final temperature of the control mortar, The values of temperature of all samples for 1 hour were measured, due after that time, the temperature reached the plateau or the thermal equilibrium with the environment (Fig.9). The behavior in all cases tends to increase through the time with fluctuations during all the experiment. Control mortar reached the highest temperature of all. The final temperatures were Control (40°C), R1 (28.1°C), R2 (30.8°C), R3 (29.4), R4 (30.5°C), R5 (26.3), R6 (27°C), R7 (25.1°C) and R8 (26.1°C). Mixture R7 showed the lower final temperature of all. In addition, the weight of the specimens was measured to compare the empty fraction of each microstructure with their temperature values. Weights of the specimens were the following: Control (256.6 g), R1 (171.2 g), R2 (159.8 g), R3 (176.8 g), R4 (169 g), R5 (190 g), R6 (170.2 g), R7 (168.2 g) and R8 (178.2 g). All the mortars with supplementary components have reduced weight compared with control sample, which can be inferred in an increment of the porosity and the empty spaces in the mortar sample. Mixture R7 presented the lower weight.

 ISSN en trámite

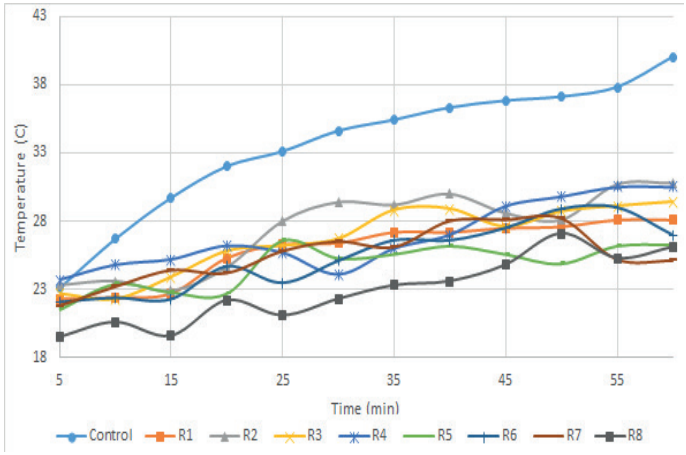


Fig.9. Temperature behavior of control and experimental specimens.

3.1 Morphology and Microstructure

SEM (SE) mode was used to study the morphology of the control mortar and the experimental mortar with the best performance (R7). The control sample shows a homogeneous surface area, with size pores less than 1 µm. Morphology is mostly a solid paste (C-S-H gel) from C_3S and C_2S hydration and zones with anhydrous phase of the original calcium silicates. The morphology of the R7 shows a high number of phases in its microstructure; there can be identified sand particles, hydrated paste, anhydrous phases, needles-like crystals possibly from ettringite (Chen et al., 2019) and, a high level of porosity. All the different phases in R7 seems to have a lower level of agglomeration than the control sample (Fig.10).

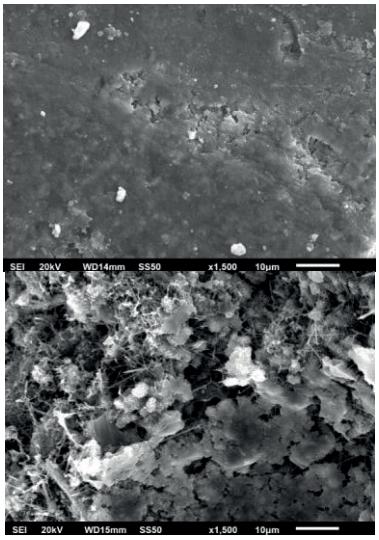
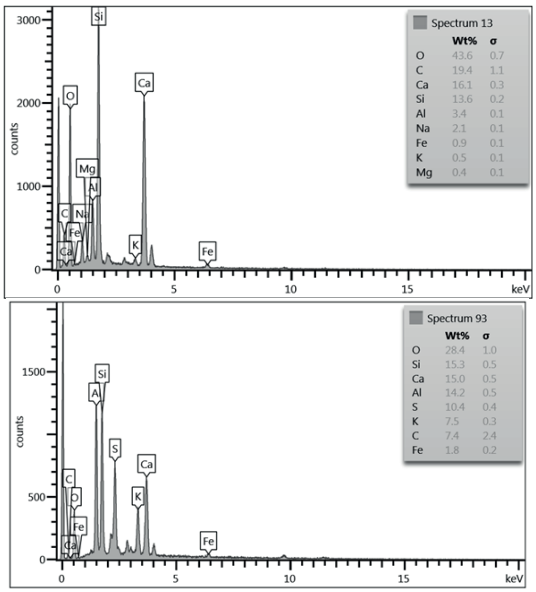


Fig. 10. SEM (SE) of control (up) and R7 (down), at 1500X

The Ca/Si ratio in the control specimen show values around 1.2 which is the normal value according to the literature and can be inferred that is a conventional hydrated cement paste. Unlike control mortar, the EDS analysis from the R7 (Fig.11) specimens showed a composition with a high level of variation, showing in some cases, chemical compositions with considerable levels of Al (probably from the kaolin) and in some points, Ca/Si ratios of 1, which could mean that hydration cement process was carried out normally and the heterogeneous morphology is due the presence of the supplementary materials.



.

Fig.11. EDS analysis from control (up) and R7 (down).

3.2 Mechanical properties: compressive strength

The compressive strength (kg/cm^2) of the samples, control and experimental, were measured (Fig.12). Results were Control (258), R1 (18.4), R2 (13.2), R3 (11.6), R4 (15.6), R5 40.8, R6 (13.2), R7 (14) and R8 (27.2). the chart (Fig.12) show the relation ΔT(°C) vs Compressive Strength (kg/cm^2). Specimens at the lower right region of the chart, have the better thermomechanical properties.

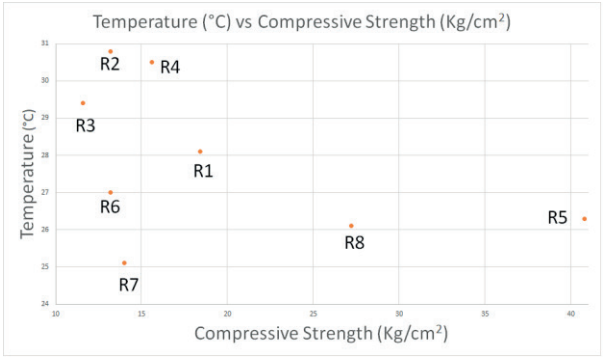


Fig.12. ΔT(°C) vs Compressive Strength (Kg/cm^2

ISSN en trámite

4. CONCLUSIONS

According to the experimental conditions of this work, the following conclusions can be drawn:

1. The fact of having a large number of components in a cement mixture becomes a difficulty for study the interactions of each one of the factors involved into the experiment. A Statistical matrix from Statistical Design of Experiment can help to organize how the mixtures and the variation of the component can be done.

2. The sample R7 was the cement mortar with the best thermal performance, that means, R7 was the specimen that showed the best thermal resistivity. The results from the analysis from advanced techniques showed that R7 presented a very porous microstructure. In addition, the different between their weights showed that. However, R7 is not necessary the best mixture, due the fact that statistical matrix L8 is limited to only 8 variations. Then, is necessary to focus other analysis in this mixture. Also, considering the compressive strength and the final use of the mixture, R8 and R5 are also good candidates.

3. These mixtures are not considered to be used as structural materials by themselves, but as one of many components in the design of elements for building uses in order to increase the comfort and quality life.

ACKNOWLEDGEMENT

The corresponding author of this work wants to thank Fernanda Ureta-Angulo, Alexia Espinoza-Carrasco (Departamento de Ingenieria Industrial) and Ana Maria Montiel-Ibarra (Departamento Metal-Mecanica) for all the support in the laboratory work and data analysis. We are grateful with our colleagues and friends for their patience and help in the development of the ideas.

REFERENCES

Abraham Allec Lodoño Piñeda, Oscar Alonso Velez Rojas, M.P. Jonathan, S.B. Sujitha. 2019. Evaluation of climate change adaptation in the energy generation sector in Colombia via composite index – A monitoring tool for government policies and action. *Journal of environmental management,* Vol. 250, 109453.

Genichi Taguchi, Subir Chowdhury, Yuin Wu. 2005. *Taguchi´s quiality engineering handbook*, Ed. Wiley (John Wiley and Sons, inc)..

Javid Salimi, Amir Mohammad Ramezanianpour, Mohammad Javad Moradi. 2020. Studying the effect of low reactivity metakaolin on free and restrained shrinkage of high performance concrete. *Journal of building engineering.* Vol. 28, 101053.

Lou Chen, Keren Zheng, Taobing Xia, Guangcheng Long. 2019. Mechanical property, sorptivity and microstructure of steam-cured concrete incorporated with the combination of metakaolin-limestone. *Case studies in construction materials,* Vol. 11, e00267.

Mahdi Akbari, Hamed Najafi Alamdarlo, Seyed Habibollah Mosavi. 2020. The effects of climate change and groundwater salinity on farmers's income risk, *Ecological Indicators*, Vol. 110, 105893.

Rakesh Muduli, Bibhuti Bhusan Mukharjee. 2020. Performance assessment of concrete incorporating recycled coarse aggregates and metakaolin: a systematic approach. *Construction and building materials*, Vol. 233, 117223.

Stephen Berry, Trivess Moore, Michael Ambrose, 2019. Flexibility versus certainty: the experience of mandating a building sustainability index to deliver thermally confortable homes, *Energy policy*, Vol. 133, 110926.

Yong X. Tao, Yimin Zhu, Ulrike Passe, 2020. Modeling and data infrastructure for human-centric design and operation of sustainable, healthy building through a case of study, *Building and environment*, Vol. 170, 106518

ISSN en trámite

Evaluación térmica de una fachada típica en clima cálido

G. Pedraza*, J. Xamán*,
C. E. Torres-Aguilar*.

** Tecnológico Nacional de México / CENIDET, Cuernavaca, Mor., CP, 62490, México*
(e-mails: m20ce007@cenidet.tecnm.mx, jesus.xv@cenidet.tecnm.mx, carlos.torres17ma@cenidet.edu.mx)

Resumen: Se evaluó la transferencia de calor en una pared con ventana (fachada) bajo las condiciones climáticas de Mérida, Yucatán. Se modeló la fachada en las orientaciones Norte, Sur, Este y Oeste, considerando el día más cálido (25/Julio/2018) de un año típico. Para realizar el estudio, se planteó el modelo matemático mediante balances de energía y se desarrolló un código computacional en lenguaje ANSI C99. Se encontró que la fachada orientada al Sur presentó una ganancia de calor menor (1771 Wh) que las otras orientaciones, lo cual se traduce en una reducción de las cargas térmicas por remover a través de sistemas activos o pasivos para lograr un ambiente de confort. La fachada orientada al Este fue la que mayor ganancia térmica presentó, de 2185.2 Wh, lo cual implica un mayor consumo energético para climatización. Se concluyó que la orientación de la fachada tiene diferentes efectos en la ganancia de calor al interior del edificio, por lo que un adecuado diseño y construcción contribuye a disminuir el consumo energético del edificio.

Abstract: The heat transfer in a wall with a window (facade) was evaluated under the climatic conditions of Mérida, Yucatán. The facade was modeled in the North, South, East and West orientations, considering the warmest day (July 25, 2018) of a typical year. To carry out the study, the mathematical model was proposed using energy balances and a computational code was developed in ANSI C99 language. The results showed that the south-facing façade presented the lowest thermal gain, 1771,008 Wh, which translates into a reduction in thermal loads to be removed through active or passive systems to achieve a comfortable environment. The east-facing façade was the one with the highest thermal gain, 2,185,232 Wh, which implies greater energy consumption for air conditioning. It was concluded that the orientation of the façade has different effects on the heat gain inside the building, so proper design and construction can contribute to reducing the building's energy consumption.

Palabras clave: Balance de energía, fachada, orientación, análisis térmico

Keywords*:* Energy balance, façade, orientation, thermal analysis.

1. INTRODUCCIÓN

La República Mexicana se compone principalmente de climas cálidos y templados. Las edificaciones localizadas en zonas de clima cálido dependen del uso de sistemas activos, como el aire acondicionado, para mantener las condiciones de confort deseadas. Sin embargo, esto implica una gran emisión de gases de efecto invernadero que continúa incrementando con el paso de los años junto al crecimiento demográfico.

En México, en 2018, se reportó una demanda energética total de 9236.86 PJ de los cuales 1000.54 PJ corresponden a la demanda de energía del sector eléctrico (Secretaría de Energía, 2019). En el mismo año, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) en colaboración con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) publicaron el inventario nacional de emisión de gases y compuestos de efecto invernadero en donde se presentó que se emitieron 532830.900 Gg de dióxido de carbono (CO_2) totales, de los cuales 18088.955 Gg corresponden al uso residencial y 11453.614 Gg al uso de refrigeración y aire acondicionado.

ISSN en trámite

Para prevenir el crecimiento de emisiones de gases de efecto invernadero se ha estudiado el uso de los sistemas de climatización pasivos, que transforman el potencial energético existente en fuentes naturales de energía para el acondicionamiento de edificios. Los sistemas de climatización pasivos usan los elementos propios de las edificaciones (orientación, tamaño de las ventanas, dispositivos de sombreado, materiales aislantes, masa térmica, entre otros), para disminuir el uso de energías convencionales para climatización.

Zhai *et al.* (2018) realizaron un estudio teórico para determinar la razón de aspecto óptima muro-ventana (WWR, por sus siglas en inglés) de una habitación ubicada en China considerando cuatro orientaciones. Los autores determinaron que la WWR óptima para cada orientación fue: 30% para el Norte, 60% para el Sur, 50% para el Este y 40% para el Oeste. Potrc-Obrecht *et al.* (2019) desarrollaron un estudio teórico para determinar las WWR óptimas para una residencia considerando un clima Cfb (según la clasificación Koppen) y orientaciones Sur, Sur-Este y Sur-Oeste. Los autores obtuvieron que las WWR óptimas son de 38-42 % para el Sur, 0-20% para el Sur-Este y de 0-24% para el Sur-Oeste. Bas *et al.* (2020) evaluaron la razón de aspecto óptimo muro-venta para un edificio de oficinas ubicado en Turquía y obtuvieron una WWR óptima de 30% para el Sur, 60% para el Norte, 40% para el Este y 30% para el Oeste. Estos estudios han demostrado el efecto de la orientación sobre las ganancias térmicas en un edificio. Sin embargo, fueron realizados para condiciones climáticas diferentes a las de la República Mexicana.

El principal objetivo de este estudio es modelar numéricamente la transferencia de calor de una pared con ventana (fachada) bajo condiciones climáticas de Mérida, Yucatán y variando su orientación en Norte, Sur, Este y Oeste. Este problema se abordó mediante la metodología de balances de energía considerando un régimen transitorio y el desarrollo de un código computacional en lenguaje ANSI C99 para su solución. Con los resultados de este estudio se analizó el efecto de la orientación de la fachada sobre las ganancias o pérdidas de energía hacia el interior de un edificio.

2. METODOLOGÍA

El método de este estudio teórico se basa en la modelación numérica de la transferencia de calor existente en una fachada expuesta a condiciones climáticas reales. Primero se presenta el modelo físico a evaluar definiendo sus características físicas, térmicas y ópticas. Seguido se expone el modelo matemático utilizando la metodología de balances de energía. Finalmente, se presenta la solución numérica para la transferencia de calor.

2.1 Modelo físico

El modelo de físico está formado por tres elementos, un muro inferior, una ventana y un muro superior. La Tabla 1 muestra las dimensiones de cada elemento del modelo. La fachada está sometida a condiciones climáticas en el exterior y a una temperatura de confort en el interior, como se muestra en la Fig. 1.

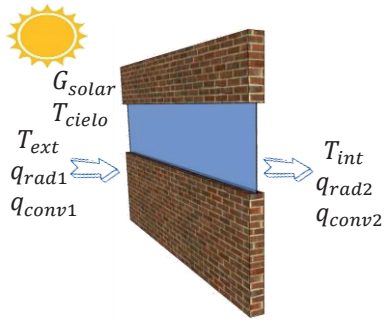


Fig. 1. Modelo físico de una fachada compuesta por muro y ventana.

Donde G_{solar} es la radiación solar incidente, T_{cielo} es la temperatura de la bóveda celeste, T_{int} la temperatura interior, T_{ext} la temperatura al exterior, q_{rad1} y q_{conv1} son el flujo radiativo y convectivo en el exterior, respectivamente. Mientas que, q_{rad2} y q_{conv2} son el flujo radiativo y convectivo en el interior.

Tabla 1. Dimensiones del modelo físico

Elemento	Altura (m)	Largo (m)	Espesor (m)
Muro superior	0.6	3.5	0.12
Ventana	0.8	3.5	0.006
Muro inferior	1.2	3.5	0.12

Como se observa en la Fig. 1, tanto el muro inferior como el superior se componen de ladrillo rojo recocido y la venta se considera de vidrio claro. Las propiedades de los materiales que componen la fachada se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades físicas, térmicas y ópticas de los materiales.

Material	Densidad (ρ) (kg/m³)	Conductividad térmica (λ) (W/mK)	Calor específico (c_p) (J/kgK)	Absortancia (α) (-)	Emitancia (ε) (-)
Tabique rojo recocido	2000[a]	0.872[a]	840[b]	0.6[b]	0.9[b]
Vidrio claro 6mm	2500[c]	1.0[c]	750[c]	0.07[c]	0.85[c]
[a](NOM-020-ENER-2011, 2011), [b](DesignBuilder, 2021), [c](Aguilar *et al.*, 2015)					

2.2 Modelo matemático

ISSN en trámite

Se analizó la transferencia de calor en estado transitorio a través de un modelo matemático planteado mediante balances de energía. Al evaluar el modelo en estado transitorio se empleó una aproximación de Euler de primer orden atrasada (1), donde T_p es la temperatura del punto de análisis y los superíndices *t* y *t-1* indican el tiempo actual o un tiempo anterior, respectivamente.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_p^t - T_p^{t-1}}{\Delta t} \tag{1}$$

Por lo que el balance de energía es:

$$q_{entra} - q_{sale} = \frac{\rho C_p \Delta x}{\Delta t}(T_p{}^t - T_p{}^{t-1}) \tag{2}$$

Siendo q_{entra} y q_{sale} el flujo que entra y sale del elemento, respectivamente, y Δx el espesor del elemento que se analiza. Se realizó el balance de energía sobre la superficie de la fachada expuesta a las condiciones climáticas (3) y sobre la superficie de la fachada con condiciones de confort (4), donde H_x es el espesor del componente de la fachada, T_1 y T_2 la temperatura de la superficie de la fachada al exterior y la temperatura de la superficie de la fachada al interior, respectivamente.

$$\frac{T_{ext}-T_1}{\frac{1}{h_{conv1}}} + \frac{T_{cielo}-T_1}{\frac{1}{h_{rad1}}} + \alpha G_{solar} - \frac{T_1-T_2}{\frac{H_x}{\lambda}} = \frac{\rho c_p \Delta x}{\Delta t}(T_1 - T_1{}^{t-1}) \tag{3}$$

$$\frac{T_1-T_2}{\frac{Hx}{\lambda}} - \frac{T_2-T_{int}}{\frac{1}{h_{conv1}}} - \frac{T_2-T_{int}}{\frac{1}{h_{rad2}}} = \frac{\rho c_p \Delta x}{\Delta t}(T_2 - T_2{}^{t-1}) \tag{4}$$

El coeficiente convectivo (h_{conv1}) se determinó tanto para el muro como para la ventana, los subíndices *m* y *v* indican el coeficiente para el muro y ventana, respectivamente. Se utilizó la relación de Hagishima et al. (2003) para determinar el coeficiente convectivo sobre el muro al exterior (5), y para determinar el coeficiente convectivo de la ventana al exterior se utilizó la relación propuesta por Sharples et al. (1998) (6). Para el cálculo de los coeficientes se consideró la velocidad del viento local (V). El coeficiente convectivo en el interior se estableció como se presenta en ASHRAE (2009) de 8.3 W/m^{2}K.

$$h_{conv1,m} = 10.21V + 4.47 \tag{5}$$

$$h_{conv1,v} = 9.5V^{0.48} \tag{6}$$

La temperatura al interior (T_{int}) se estableció como una temperatura de confort de 297.565 K, como se presenta en ASHRAE (2009). La temperatura de la bóveda celeste (T_{cielo}) fue calculada mediante la relación de Swinbank (1963), véase (7).

$$T_{cielo} = 0.0552 T_{ext}{}^{1.5} \tag{7}$$

2.3 Datos climáticos

El estudio se realizó para la ciudad de Mérida, Yucatán, cuyo clima es cálido. Mérida se localiza en las coordenadas 20°58'04''N y 89°37'18'' O, con una altitud de 8 metros sobre el nivel medio del mar y de clasificación de clima tipo Aw_0 (temperatura media anual de 26°C) (García, 1981). Los datos climáticos considerados para el estudio son proporcionados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) correspondientes al año 2018. Para evaluar la fachada en diferentes orientaciones se emplearon los datos del día más cálido (25/Julio/2018), en el que la temperatura máxima fue de 41°C y la temperatura mínima de 26.1°C.

2.4 Solución numérica

La solución del modelo matemático del sistema se realizó mediante un código de cómputo desarrollado en lenguaje ANSI C99. Para la solución del sistema de ecuaciones se empleó el método de Jacobi. La Fig. 2 muestra el diagrama de flujo del código de cómputo para la solución al problema de transferencia de calor de una fachada.

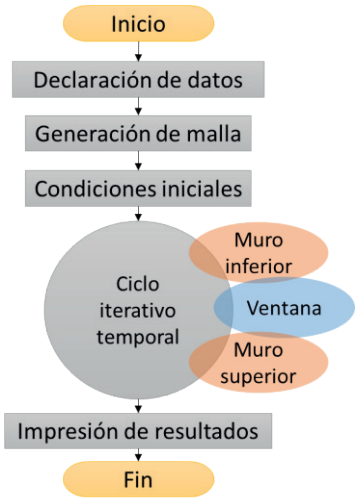


Fig. 2. Diagrama de flujo del código de cómputo.

Se realizó la verificación de la solución numérica al resolver un problema de transferencia de calor en un sistema que consiste en una barra de material homogéneo (λ=2.0 W/m°C; c_p=1.0 J/kg°C; ρ=1.0 kg/m^3) con longitud H_x=1.0 m. La barra está sujeta a condiciones de frontera de primera clase T_A=0°C y T_B=0°C y una temperatura inicial $T_{(x,t=0)}=Tt_0 sen(\pi x)$ con Tt_0=20°C. Se consideran diferentes incrementos de tiempo Δt=0.0001, 0.001, 0.01 y 0.1 segundos, con un tiempo total de modelado de 0.1 segundos, de acuerdo con Xamán y Gijón-Rivera (2016). La solución analítica para la verificación del modelo de balances de energía en este problema se expresa en (8), según Özisik (1985).

ISSN en trámite

$$T(x,t) = T_{t0} e^{-\left(\frac{\lambda}{\rho c_p}\right)\left(\frac{\Pi}{Hx}\right)t} sen\left[\left(\frac{\Pi}{Hx}\right)x\right] \quad (8)$$

Se obtuvieron los resultados de la solución del problema mediante ambas metodologías (Fig. 3). Se observa que a medida que los pasos de tiempo se reducen, la diferencia porcentual entre la solución analítica y la solución mediante balances de energía también se reduce. La diferencia porcentual menor que se obtuvo fue de 6.6% cuando Δt=0.0001s. Los resultados entre las dos metodologías son satisfactorios.

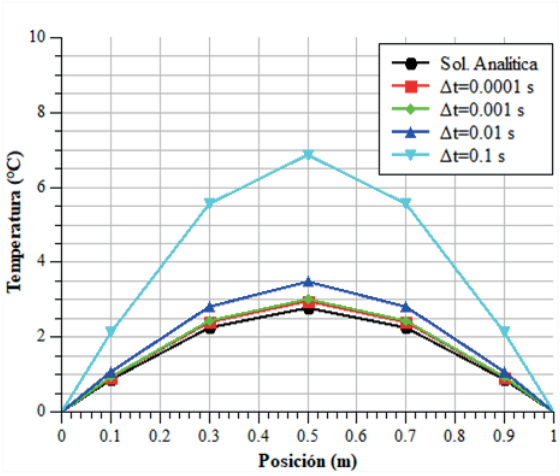


Figura 3. Perfil de temperaturas del ejercicio de verificación.

3. RESULTADOS

Las Figs. 4 a 7 muestran los flujos de calor en la fachada en las diferentes orientaciones, así como la radiación incidente en cada orientación. El flujo de calor total sobre la fachada se obtuvo mediante la suma de los flujos de calor sobre cada elemento (9), esto debido a que no se consideró de calor entre los nodos en el eje *y*.

$$Q_{total} = Q_{muroinferior} + Q_{ventana} + Q_{murosuperior} \quad (9)$$

Se observó que la orientación con mayor radiación solar incidente es la orientación Este con una radiación máxima alcanzada de 567.2 W/m^2, seguida por la orientación Oeste con 507 W/m^2, mientras que las orientaciones Norte y Sur son las que presentan la menor radiación incidente alcanzada con 276. W/m^2 y 250.6 W/m^2, respectivamente. Para determinar la ganancia térmica de la fachada en cada orientación, se realizó la integración numérica por medio de la regla del trapecio sobre los valores de flujo de calor en todo el día de modelación (10).

$$\int_{t_1}^{t_2} Q_{total}(t)dt = (t_2 - t_1)\left(\frac{Q_{total(t_2)} + Q_{total(t_1)}}{2}\right) \quad (10)$$

La Fig. 8 muestra la ganancia térmica al interior de la fachada, así como, a través del muro y de la ventana, con el fin de determinar cuál orientación presenta menor ganancia térmica y, por lo tanto, menor consumo energético para climatización.

Se observó que la orientación Norte fue una de las que menores ganancias de calor presentó, con una ganancia térmica total de 1826.9 Wh durante el día. La orientación Sur presentó un flujo de calor máximo de 181.1 W y una ganancia total de 1771 Wh a lo largo del día, lo que la convierte en la orientación con menor consumo energético para climatización para el día 25 de julio. Las orientaciones Este y Oeste fueron las que mayor ganancia térmica presentaron. La orientación Oeste presentó un flujo máximo de 217.14W y una ganancia térmica total de 1900.448 Wh. La fachada orientada hacia Este presentó un flujo de calor máximo de 194.8 W y una ganancia térmica de 2185.2 Wh, por lo tanto, la fachada con un consumo energético mayor para climatización.

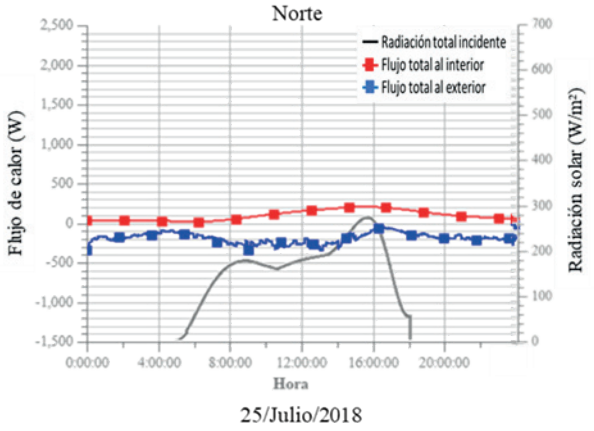


Figura 4. Flujo de calor en la fachada orientada al Norte.

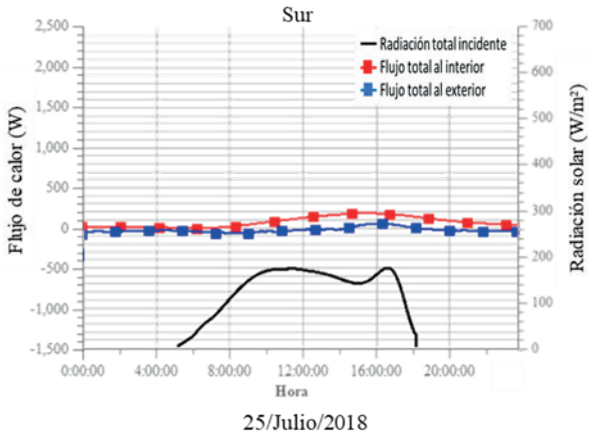


Figura 5. Flujo de calor en la fachada orientada al Sur.

ISSN en trámite

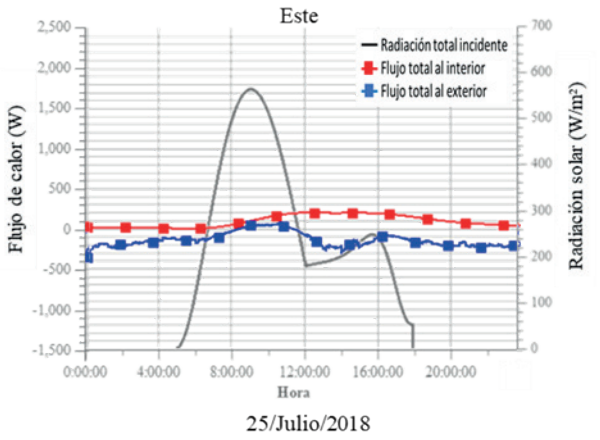


Figura 6. Flujo de calor en la fachada orientada al Este.

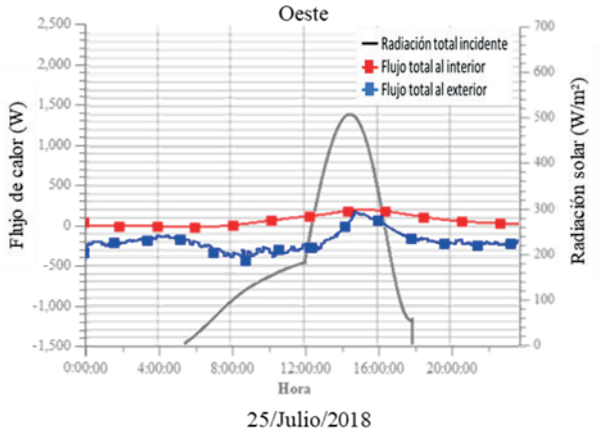


Figura 7. Flujo de calor en la fachada orientada al Oeste.

Los resultados mostraron que el diseño de una edificación debe considerar las relaciones de áreas para cada una de sus envolventes. Reducir el área de las envolventes sobre las que se presente una mayor ganancia de calor, permite reducir el flujo de calor total ganado al interior de la edificación. Sin embargo, se debe de tomar en cuenta otros parámetros, como la relación de aspecto muro-ventana, así como, la búsqueda de materiales que funcionen como aislantes térmicos o que disipen una mayor cantidad de energía en horarios sin radiación solar.

El efecto de la inercia térmica repercute en la cantidad de energía recibida al interior de la edificación, como se muestra en la Fig. 8 en contraste con las Figs. 4-7. El vidrio al tener una menor masa térmica, permite disipar la energía excedente, durante las horas sin radiación, de tal forma que se reduce la ganancia de calor durante el día, en contraste con los muros de tabique. También, debe considerarse que en este estudio los muros representan una mayor área de la fachada. Por lo tanto, es necesario realizar un estudio más detallado sobre el efecto de la razón de aspecto muro-venta sobre las ganancias térmicas de la fachada.

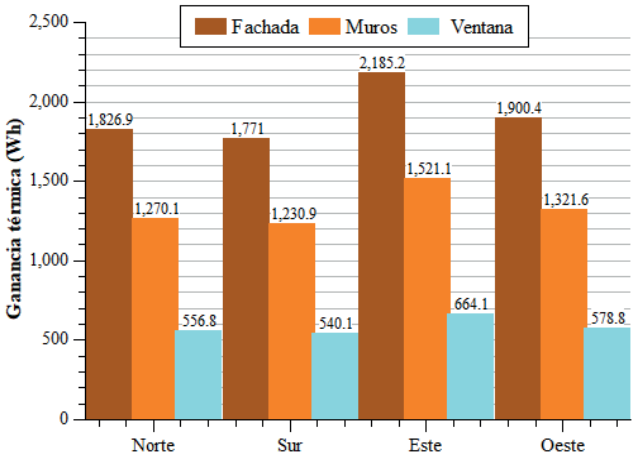


Figura 8. Ganancia térmica por elemento.

4. CONCLUSIONES

Se estudió la transferencia de calor en una fachada compuesta por muro y ventana variando su orientación y su efecto sobre la ganancia térmica bajo condiciones climáticas de la ciudad de Mérida, Yucatán, México. La fachada tiene un largo de 3.5 m y consta de tres elementos, un muro inferior de 1.2 m de alto y 0.12 m de espesor, una ventana de 0.8 m de alto (espesor de 0.006 m) y un muro superior de 0.6 m de alto y 0.12 m de espesor. Mediante la modelación numérica en estado transitorio se modeló la transferencia de calor a través de la fachada para el día más cálido de un año representativo (25/Julio/2018) de la ciudad de Mérida, Yucatán. De acuerdo con los resultados del estudio se concluyó que:

- La metodología de balances de energía mostró ser una alternativa acertada para la evaluación de transferencia de calor en estado transitorio en componentes de edificaciones. El uso del modelo en estado transitorio permite evaluar la masa térmica de una forma más cercana a la realidad.
- La orientación de la fachada tiene efectos sobre la ganancia de calor al interior de la habitación.
- La fachada orientada al Sur es la que menor ganancia térmica presenta, con un flujo de calor máximo de 181.1 W y una ganancia térmica total de 1771 Wh. Esto resulta en un menor consumo de energía eléctrica para lograr un ambiente de confort en el interior.
- La fachada orientada al Este presenta mayor ganancia térmica total de 2185.2 Wh. Sin embargo, no presenta el mayor flujo de calor hacia el interior (194.8 W), por lo que, es la orientación donde se presentan ganancias térmicas significativas por un periodo más largo de tiempo.

ISSN en trámite

También, se observa que la ganancia de calor al interior es mayor en los muros que en la ventana. No obstante, es necesario realizar un estudio más detallado del efecto de la razón de aspecto muro-ventana sobre la ganancia de energía.

5. NOMENCLATURA

cp	Calor específico (J/kgK)
Gsolar	Radiación solar incidente (W)
h	Coeficiente (W/m^{2}K)
Hx	Espesor del elemento (m)
q	Flux (W/m^2)
Q	Flujo de calor del muro (W)
t	Tiempo (s)
T	Temperatura (K, °C)
V	Velocidad del viendo local (m/s)
Griegas	
ρ	Densidad (kg/m^3)
α	Absortancia (-)
Δt	Paso de tiempo (s)
Δx	Espesor del volumen de control (m)
ε	Emitancia (-)
λ	Conductividad térmica (W/mK)
Subíndices	
A	Punto A
B	Punto B
cielo	Cielo
conv	Convectivo
entra	Entrada
ext	Exterior
int	Interior
muro inferior	Muro inferior
muro superior	Muro superior
p	Punto de análisis
rad	Radiativo
sale	Salida
t_0	Tiempo cero
t_1	Tiempo 1
t_2	Tiempo 2
total	Total
ventana	Ventana
Superíndices	
t	Tiempo actual
t-1	Tiempo anterior

6. REFERENCIAS

Aguilar, J., Xaman, J., Álvarez, G., Hernández-Pérez, I., & López-Mata, C. (2015). Thermal performance of a double pane window using glazing available on the Mexican market. Renewable Energy, 81, 785-794.

ASHRAE. (2009). *ASHRAE handbook of fundamentals*. Chapter 15: fenestration Atlanta (USA). American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc.

Baş, H. (2020). *Hybrid-model simulations to equilibrate the energy demand and daylight autonomy as a function of window-to-wall ratio and orientation for a perimeter office in Izmir.* MEGARON / Yıldız Technical University, Faculty of Architecture E-Journal, 15(4), 537–552.

DesignBuilder. (2021). DesignBuilder [Windows].

García, E. (1981). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República mexicana)*.

Norma Oficial Mexicana. (2011). *NOM-020-ENER-2011, Eficiencia energética en edificaciones. - envolvente de edificios para uso habitacional.*

Özisik N.M. (1985). Heat transfer basic approach. McGraw-Hil, USA.

Potrč Obrecht, T., Premrov, M., & Žegarac Leskovar, V. (2019*). Influence of the orientation on the optimal glazing size for passive houses in different European climates (for non-cardinal directions)*. Solar Energy, 189, 15–25.

Secretaría de Energía. (2019). *Balance Nacional de Energía 2018*. Ciudad de México: Secretaría de Energía.

Sharples, S. and Charlesworth, P.S. (1998). Full-scale measurements of wind-induced convective heat transfer from a roof-mounted flat plate solar collector. Solar Energy, 62(2), 69-77.

Swinbank, W., 1963. Long-wave radiation from clear skies. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 89(381), pp.339-348.

Xamán J., Gijón-Rivera M. (2016). Dinámica de fluidos computacionales para ingenieros, Paladio.

Zhai, Y., Wang, Y., Huang, Y., & Meng, X. (2019). A multi-objective optimization methodology for window design considering energy consumption, thermal environment and visual performance. Renewable Energy, 134, 1190–1199.

ISSN en trámite

Análisis Cinemático de un Sistema de rehabilitación para miembros superiores con cables flexibles

Milton U. Vargas-Ortiz *, Andrés Blanco-Ortega*, Carlos M. Lara-Barrios, Andrea Magadán-Salazar*, Manuel de Jesús Palacios-Gallegos***, Víctor Fernando Ramos Fon Bon*****

** Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Morelos, México, C.P. 62490*
(Tel: 777-362-7770; e-mail: andres.bo@cenidet.tecnm.mx) (Tel: 734-147-7238; e-mail: m20ce083@cenidet.tecnm.mx).
*** LABELPAC Inc. 8-4080 North Service Rd E, Windsor, ON N8W 5X2, Canadá.*
****Universidad Politécnica de Chiapas, Carretera Tuxtla Gutiérrez. Suchiapa, Chiapas. México. CP.29150*

Resumen: Actualmente existe un gran interés en el desarrollo de dispositivos o sistemas robóticos de rehabilitación para que coadyuven en atender la demanda de rehabilitación en las extremidades superiores e inferiores. Generalmente, las lesiones se presentan por accidentes cerebrovasculares, incidentes o accidentes traumáticos, enfermedades neuromusculares, las cuales aumentan día a día. Para cubrir esta necesidad se han propuesto una gran diversidad de dispositivos robóticos, sin embargo, son de costo elevado, requieren de sensores y actuadores, resultan ser rígidos, pesados y poco ajustables al paciente.
En este artículo se presenta el análisis cinemático de una máquina de rehabilitación para miembros superiores de tres grados de libertad. Este sistema utiliza dos guías lineales y un sistema de poleas-cable, por lo que es un sistema flexible y económico; lo que permite que pueda proporcionar diversos movimientos, tanto básicos como combinados, tales, flexión-extensión, abducción-aducción, rotación interna-externa y circunducción del hombro; flexión y extensión del codo. Se reportan resultados de simulación obtenidos con el prototipo virtual en el software de MSC Adams® y el módulo de Adams Machinery.

Keywords: Upper limb rehabilitation, cable-based rehabilitation robot, wire-driven mechanism.

1. INTRODUCCIÓN

El Accidente Cerebrovascular (ACV) es un síndrome clínico que genera discapacidad tanto física como cognitiva severa a largo plazo, perdiendo la capacidad de ser autosuficiente, y es causado por una hemorragia o bloqueo en los vasos sanguíneos del cerebro, que daña las células cerebrales y puede ser fatal, causando la muerte. Cada día se registra un aumento en el número de personas discapacitadas debido a un ACV, y seguirá aumentando a un ritmo alarmante como se ha reportado en Estados Unidos y otros países del mundo [1] [2]. Un paciente que sufrió un ACV, generalmente tiene perdida de movimiento en la mitad del cuerpo, requiriendo rehabilitación inmediata para recuperar parte de la movilidad en las extremidades. Además, los seres humanos estamos propensos a presentar incidentes traumáticos los cuales ocasionan lesiones en las extremidades inferiores y superiores, que en algunas situaciones ocasionan que no se puedan realizar actividades de la vida cotidiana. Por otra parte, es insuficiente la cantidad de profesionales de la salud en fisioterapia para cubrir la demanda de rehabilitación [3].

La rehabilitación de las extremidades lesionadas requiere de un ejercicio de entrenamiento repetitivo y progresivo, y para mejorar la efectividad de la rehabilitación, el uso de sistemas robóticos es requerido por su capacidad intensiva de movimientos y su tiempo de duración [2] [4]. Entre las máquinas de asistencia y rehabilitación se encuentran los exoesqueletos actuados de múltiples grados de libertad (GDL), para ayudar al movimiento de las extremidades superiores humanas. Sin embargo, para que un exoesqueleto interactúe de forma segura con una extremidad humana, es importante medir y controlar la fuerza de interacción [4].

En las últimas décadas, se han propuesto diversos dispositivos o máquinas para rehabilitación de miembros superiores e inferiores, siendo la mayoría de movimiento pasivo continuo (MPC) que son utilizadas en la etapa inicial del proceso de rehabilitación para recuperar la movilidad, evitar la rigidez y recuperar el rango de movimiento. Estas máquinas son una herramienta para la labor física de los fisioterapeutas, de manera que proporcionen movimientos suaves, continuos y personalizados, en el proceso de rehabilitación, con base en el estado de la lesión de cada paciente.

De la gran cantidad de robots para rehabilitación de extremidades superiores que se han propuesto, la mayoría están conformados por eslabones rígidos y de mecanismos complejos como los reportados en [1][2][5][6][7][8]. Por otro lado, también se han propuesto máquinas de rehabilitación que

ISSN en trámite

utilizan cables flexibles, los cuales son mencionados en [9]. El uso de máquinas actuadas por cables, presenta ciertas ventajas como: 1) proporciona una mayor cantidad de movimientos, 2) requiere actuadores de potencia baja en comparación con las máquinas que usan eslabones rígidos, 3) son más ligeros por lo que presentan baja inercia y 4) resultan ser máquinas más económicas.

En este artículo se presenta el análisis cinemático de una máquina para rehabilitación pasiva de miembros superiores con cables flexibles de tres GDL [9]. La máquina proporciona los movimientos necesarios para realizar la rehabilitación de las extremidades superiores, los cuales son, flexión-extensión, abducción-aducción, rotación interna-externa y circunducción del hombro; flexión-extensión del codo.

2. SISTEMA DE REHABILITACIÓN

2.1 Descripción del sistema

En la Fig. 1 se muestra el rehabilitador de extremidades superiores que utiliza guías lineales y un sistema de cable-poleas [9]. EL sistema es de 3 grados de libertad, en la parte superior se tiene dos guías lineales para los movimientos en el eje X y Y. El movimiento en el eje Z es obtenido mediante el sistema de cable-poleas. El sistema propuesto, puede proporcionar, entre otros, los movimientos de: flexión-extensión del hombro, rotación externa del hombro, flexión del codo y abducción del hombro, ver Fig. 2. Solo se presentan estos movimientos, porque el análisis cinemático presentado es similar; misma ecuación de cierre de circuito.

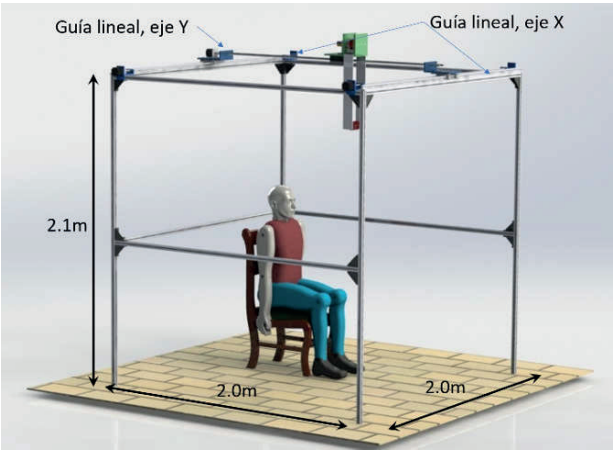


Fig. 1 Sistema de rehabilitación de extremidades superiores [9].

En la Tabla I y Tabla II se muestran los valores máximos para los diversos movimientos del hombro [10] y codo [11].

Tabla I. Valores máximos de la articulación del hombro.

Tipo de movimiento	Valor máximo
Flexión	180°
Extensión	50°
Aducción	48°
Abducción	134°
Rotación Interna	34°
Rotación Externa	142°
Circunducción	360°

Tabla II. Valores máximos de la articulación del codo.

Tipo de movimiento	Valor máximo
Flexión	140-150°
Extensión	2-10°
Supinación	90°
Pronación	80-85°

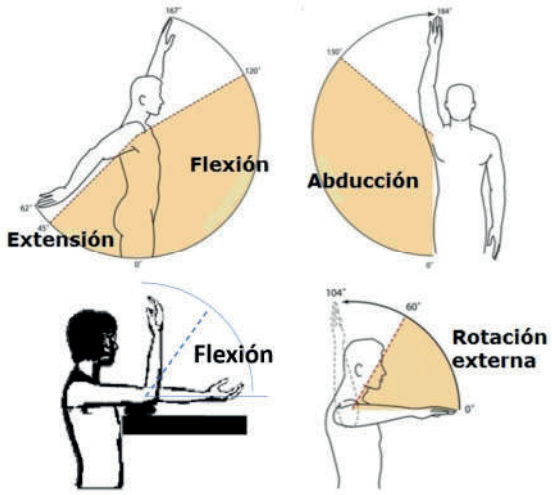


Fig. 2 Movimientos de rehabilitación de extremidades superiores. Modificada de [10] y [14].

2.1 Análisis de movimientos de rehabilitación

La máquina de rehabilitación de extremidades superiores con cable flexible, está basado en la configuración de un sistema cartesiano o una grúa tipo puente, ver Fig. 1. Por lo que, las entradas para los movimientos en el eje X y Y, se realizan mediante dos guías lineales, y para el movimiento en el eje Z se utiliza un sistema de polea-cable. Una ventaja de utilizar tornillos de potencia, para transmitir los movimientos en los ejes X y Y, ayuda a que las fuerzas sean de magnitud pequeña y que los movimientos sean suaves. Otra ventaja, es el uso del motorreductor para el control del movimiento vertical (cable), ya que no requiere de un sistema de control con compensación de gravedad, es decir, el sistema, sin tener los actuadores alimentados y con la carga de la extremidad superior del paciente permanece estático; considerando que el peso de la extremidad superior del paciente es menor a 6 kg. Comparando esta máquina respecto a las reportadas en la literatura, es que no

ISSN en trámite

requiere de varios actuadores ni el uso de varias poleas y cables; esta máquina solo utiliza 3 actuadores.

Como se mencionó anteriormente, en este sistema robótico de rehabilitación, se pueden realizar, entre otros, los movimientos de: flexión del codo (Fig. 3 y 4), abducción del hombro (Fig. 5), rotación externa del hombro (Fig. 6) y extensión del hombro (Fig. 7). Estos movimientos serían sencillos o básicos, es decir es un movimiento puro de una articulación, sin embargo, el sistema de rehabilitación puede proporcionar movimientos combinados como se reportó en [9]. El análisis cinemático para los movimientos mostrados en las Figs. 4 a 7, es similar.

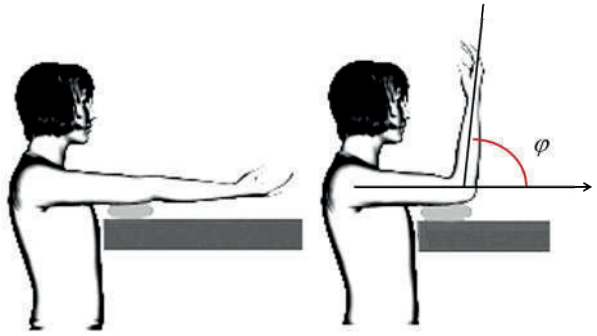


Fig. 3 Movimiento de flexión de codo.

Para realizar los movimientos anteriormente mencionados, solo se tiene que posicionar el cable en un punto fijo (x,y), el cual estaría denotado por el punto inicial del vector R_1 (Figs. 4-7), y posteriormente, solo controlar el movimiento del cable en el eje Z. Es importante mencionar que en algunos movimientos como el de flexión del codo, se requiere de sujetar el brazo a una base, para evitar movimientos indeseados por el usuario. En algunos casos se utilizará una base tipo férula para sujetar todo el brazo del paciente, y así, también evitar dolor o un movimiento indeseado en el usuario.

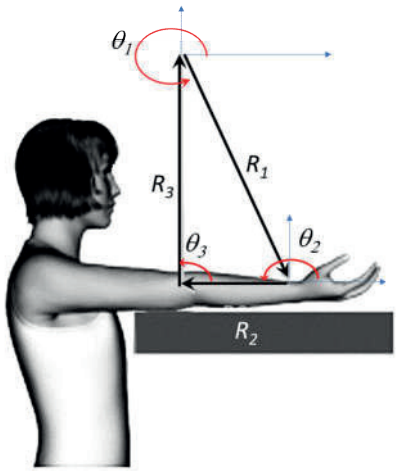


Fig. 4 Lazo vectorial para un movimiento de flexión en codo.

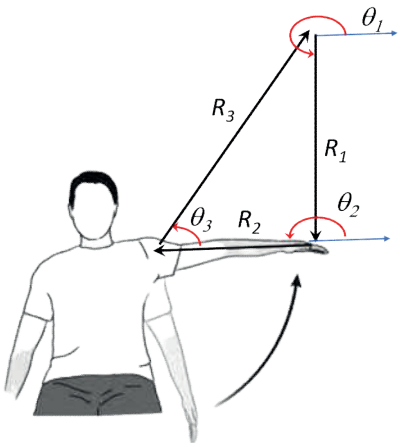


Fig. 5 Lazo vectorial para un movimiento de abducción en hombro.

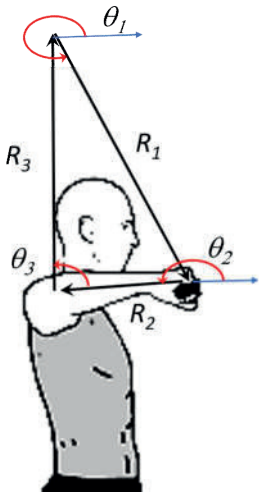


Fig. 6 Lazo vectorial para un movimiento de rotación externa en hombro.

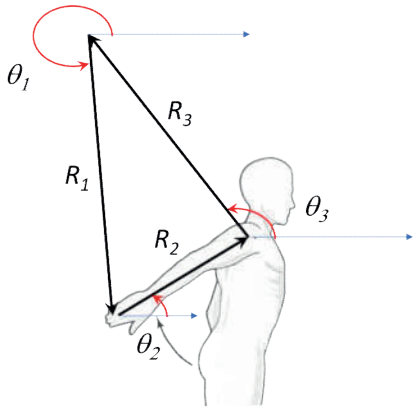


Fig. 7 Lazo vectorial para un movimiento de extensión en hombro.

 ISSN en trámite

2.2 Análisis cinemático del movimiento de flexión de codo

Para determinar el ángulo del codo conforme va flexionando el antebrazo (Fig. 3), debido a que la mano está sujeto mediante un guante con un sujetador al cable, se utiliza el lazo vectorial mostrado en la Fig. 4. Es importante mencionar que los ángulos, siempre son medidos desde el eje horizontal, como se muestra en la Fig. 4. Considerando en este caso, que el juego de cable-polea no se mueve en las direcciones X y Y, y que solo subirá el cable (eje Z).

De la Fig. 4, se puede observar que, los datos conocidos son la magnitud de todos los eslabones (R_3 es constante, R_2 es la longitud del antebrazo y R_1 es la longitud conocida del cable conforme se va enrollando en la polea) y θ_3=90° (constante), queda por determinar θ_1 y θ_2, correspondientes a los ángulos del cable y del codo.

Tomando en cuenta la Fig. 4, se utiliza la siguiente ecuación de lazo vectorial del mecanismo de tres eslabones, dada por:

$$R_1 + R_2 = R_3 \tag{1}$$

Representando en forma compleja:

$$r_1 e^{i\theta_1} + r_2 e^{i\theta_2} = r_3 e^{i\theta_3} \tag{2}$$

Utilizando la fórmula de Euler ($e^{j\theta} = \cos\theta + j\sin\theta$) para separar la parte real e imaginaria, y, considerando los datos conocidos:

$$r_1\cos\theta_1 + r_2\cos\theta_2 = 0 \tag{3}$$

$$r_1\sin\theta_1 + r_2\sin\theta_2 = r_3 \tag{4}$$

Después de una manipulación algebraica, se tiene que:

$$\theta_1 = \arccos\left(-\frac{r_2}{r_1}\cos\theta_2\right)$$

$$\theta_2 = \sin^{-1}\left(\sqrt{\frac{r_3^2 - r_1^2 + r_2^2}{2r_2^2}}\right) \tag{5}$$

Para el análisis cinemático de velocidad de la flexión del antebrazo, se deriva (2), considerando que r_1 es variable, junto con θ_1 y θ_2.

$$jr_1\dot{\theta}_1 e^{j\theta_1} + \dot{r}_1 e^{j\theta_1} + jr_2\dot{\theta}_2 e^{j\theta_2} = 0 \tag{6}$$

Haciendo un cambio de variables: $\omega_1 = \theta_1, \omega_2 = \theta_2$.

$$jr_1\omega_1 e^{j\theta_1} + \dot{r}_1 e^{j\theta_1} + jr_2\omega_2 e^{j\theta_2} = 0 \tag{7}$$

Separando en su parte real y parte imaginaria:

$$-r_1\omega_1\sin\theta_1 + \dot{r}_1\cos\theta_1 - r_2\omega_2\sin\theta_2 = 0 \tag{8}$$

$$r_1\omega_1\cos\theta_1 + \dot{r}_1\sin\theta_1 + r_2\omega_2\cos\theta_2 = 0 \tag{9}$$

Después de una manipulación algebraica, se tiene que:

$$\omega_1 = \frac{-\left(\dot{r}_1\sin\theta_1 + r_2\omega_2\cos\theta_2\right)}{r_1\cos\theta_1}$$

$$\omega_2 = \frac{-\dot{r}_1\cos\theta_1 + \dot{r}_1\sin\theta_1\tan\theta_1}{\left(-r_2\cos\theta_2\tan\theta_1 + r_2\sin\theta_2\right)} \tag{10}$$

Realizando el mismo procedimiento para el análisis cinemático de aceleración, se deriva (6), se separa en su parte real e imaginaria y se obtienen las aceleraciones para $\gamma_1 = \ddot{\theta}_1, \gamma_2 = \ddot{\theta}_2$, las cuales no se incluyen en este documento por contar con varios términos, resultando en expresiones grandes.

Es importante mencionar, que para los movimientos básicos mostrados en las Figs. 5-7, la ecuación de lazo vectorial es la misma, por lo que, solo se debe considerar los datos conocidos para cada caso.

Para subir el cable y levantar la carga (brazo del usuario), se utilizó un polinomio de Bézier interpolado suavemente entre la posición inicial (t_0, z_0) y la posición final (t_f, z_f) del cable. La trayectoria de posición deseada está dada por:

$$z^*(t) = \begin{cases} z_0 & t \le t_0 \\ z_0 - \left(z_f - z_0\right)\sigma & t_0 < t < t_f \\ z_f & t > t_f \end{cases} \tag{11}$$

$$\sigma\left(t, t_0, t_f\right) = \Delta^2\left(3 - 2\Delta\right), \quad \Delta = \frac{t - t_0}{t_f - t_0}$$

Donde z_0 y z_f son las posiciones iniciales y finales deseadas, de modo que la cuerda flexible comience desde una posición inicial y vaya a una posición final deseada con un cambio suave durante un tiempo de 5 s. El tiempo y la amplitud, dependerán de la etapa de rehabilitación del paciente, el cual debe ser definido por el especialista en fisioterapia, generalmente, para un movimiento lento, se puede considerar los 5 s, como nos han mencionado algunos fisioterapistas que nos han apoyado en el desarrollo de sistemas de rehabilitación. Para este caso se consideró que suba aproximadamente la longitud del antebrazo (R_2):

$$\left(z_0, z_f\right) = \left(0, 0.25m\right), \quad \left(t_0, t_f\right) = \left(0, 5s\right).$$

2.2 Prototipo virtual en el ambiente de MSC Adams®

En la Fig. 8 se muestra el prototipo virtual en el entorno del software de MSC Adams®. Se muestran como el cable estará articulado a la mano del paciente en una posición inicial; como se mencionó anteriormente, se recomienda utilizar una base para que soporte y fije la parte del brazo que no debe moverse. Se utilizó el módulo de Adams Machinery para insertar el sistema de cable-poleas, como se muestra en la Fig. 8. Es importante mencionar que, dependiendo del tipo de movimiento, se tiene que desplazar el sistema de juego-poleas a

ISSN en trámite

un punto de referencia (x,y) inicial, que corresponde al inicio del vector R_1.

Para las simulaciones se considera una densidad de 950 kg/m^3 en la geometría 3D del prototipo virtual de un humano mostrado en la Fig. 8, y se obtienen los parámetros que se muestran en la Tabla III, que corresponden a una persona de altura y peso de 1.70 m y 70 kg, respectivamente [15]. En el trabajo de Drillis y Cotini se presenta una aproximación para la obtención de la longitud, peso e inercia del cuerpo humano en función del peso total del paciente y de la altura. En este sentido, en este trabajo, se utilizan parámetros de simulación similares a lo propuesto por Drillis y Cotini, como se reportó en [12].

Tabla III. Parámetros de simulación.

Segmento	**Brazo**	**Antebrazo**	**Mano**
Masa [kg]	2.54	1.47	0.78
Centro de masa respecto al hombro [cm]	11	40	60
Momento de inercia I [kg m^2]	0.0272	0.011	0.0018

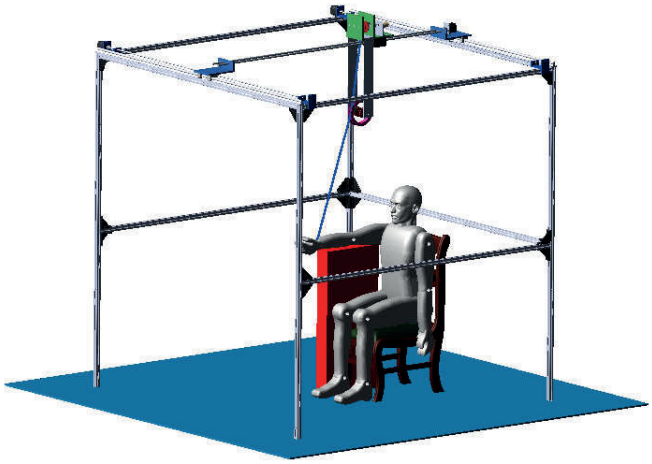


Fig. 8 Prototipo virtual del sistema de rehabilitación en el entorno de MSC Adams®.

Considerando los puntos de apoyo, se tienen los siguientes parámetros: r_1=0.8265m, r_2=0.2573m y r_3=0.7941m que se pueden utilizar para calcular los valores desconocidos en (5) 7 (10).

3. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

En esta sección se presentan los resultados de simulación del rehabilitador de extremidades superiores en el software de MSC Adams®. Para las simulaciones que se presentan solo se proporciona movimiento al cable, suponiendo que el servomotor impulsará los engranes que están acoplados a las poleas para subir el cable. La Fig. 9 muestra la respuesta del polinomio de Bézier que se utilizó para subir la cuerda desde la posición de inicio (z_0=0m) hasta una altura final deseada, aproximadamente a la longitud del antebrazo (z_f=0.25m), así como el movimiento correspondiente de flexión del codo ($\varphi=\theta_2$-180°) (Fig. 3).

El uso de un servomotor con reductor ayuda a reducir el consumo de energía, dado que es capaz de soportar la extremidad superior del paciente (máximo 6 kg), sin estar alimentado, por lo que las simulaciones se realizan despreciando la gravedad.

El movimiento del cable (R_1) está basado en la trayectoria de Bézier y la respuesta obtenida se muestra en la Fig. 10, el valor es negativo porque el cable tiene que subir. Una secuencia de 5 diferentes posiciones del movimiento de flexión del codo, se muestra con el prototipo virtual en la Fig. 11. Se puede observar que la respuesta de flexión de la articulación es suave.

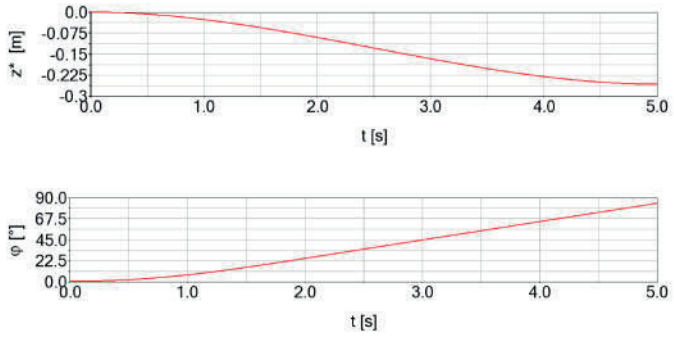


Fig. 9 Trayectoria deseada del cable y ángulo de flexión del codo.

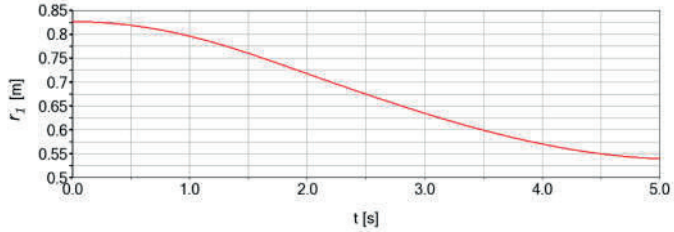


Fig. 10 Respuesta de desplazamiento del cable, vector R_1.

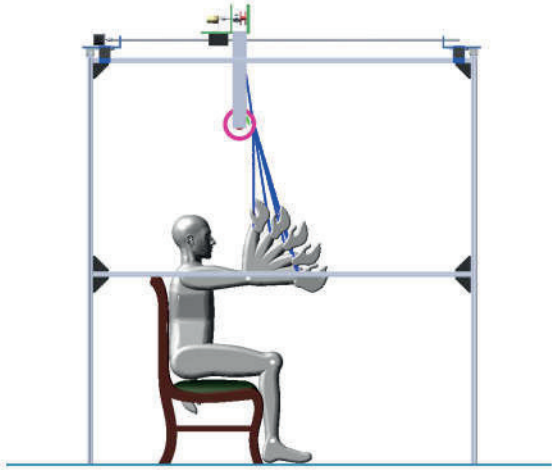


Fig. 11 Diferentes posiciones de la flexión del codo, al subir el cable con la trayectoria de Bézier.

ISSN en trámite

En la Fig. 12, se muestra la respuesta de velocidad y aceleración angular del antebrazo, cuando el cable sube con el desplazamiento dado por la trayectoria del polinomio de Bézier (3). Se puede observar que, a pesar de ser un polinomio de tercer grado, la aceleración no presenta cambios bruscos, dando un movimiento angular suave en el antebrazo, ver Fig. 9.

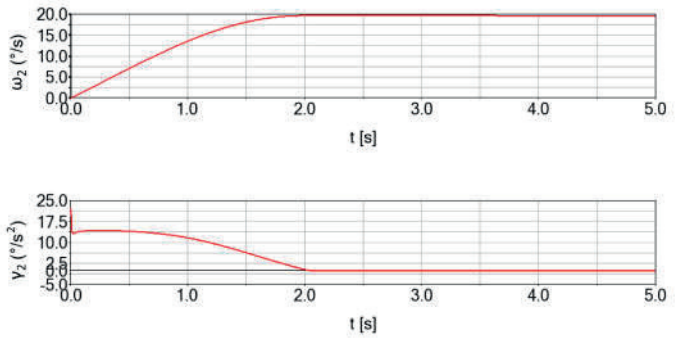


Fig. 12 Velocidad y aceleración angular del codo.

4. CONCLUSIONES

En este artículo se presenta resultados de simulación de una máquina para rehabilitación de extremidades superiores de 3 GDL con cable flexible. La configuración de la máquina permite proporcionar movimientos básicos y combinados, tales como, movimientos del hombro de flexión-extensión, abducción-aducción y rotación interna-externa; así como movimientos del codo de flexión-extensión. En este artículo se reporta los resultados de simulación obtenidos en MSC Adams® para el movimiento de flexión de codo. Además, se presenta el análisis cinemático para dicho movimiento.

Para trabajo futuro, se realizarán movimientos de rehabilitación combinados, donde se tenga que mover las guías lineales (X y Y) para alcanzar los valores máximos de los rangos de movimiento. También se considerarán fuerzas de perturbación, que representarán la rigidez que se tiene en las articulaciones provocada por las lesiones y que se incrementa por no tener movilidad.

REFERENCIAS

[1] Rehmat, N., Zuo, J., Meng, W. *et al.* Upper limb rehabilitation using robotic exoskeleton systems: a systematic review. *Int J Intell Robot Appl* 2, pp. 283–295. 2018. https://doi.org/10.1007/s41315-018-0064-8.

[2] H. Shing Lo, S. Quan Xie, Exoskeleton robots for upper-limb rehabilitation: State of the art and future prospects, Medical Engineering & Physics, Vol. 34, No. 3, 2012, pp. 261-268, ISSN 1350-4533, https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2011.10.004.

[3] N. Pérez Mallada, “La fisioterapia como llave para la mejora de la calidad de vida de la sociedad”. Disponible en: https://www.efesalud.com/fisioterapia-mejora-calidad-vida-sociedad. 2019, Sept. 9. [En línea] [Accedido: 04-11-2021].

[4] H. Hsieh, D. Chen, L. Chien and C. Lan, Design of a Parallel Actuated Exoskeleton for Adaptive and Safe Robotic Shoulder Rehabilitation, in IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 22, no. 5, pp. 2034-2045, Oct. 2017, doi: 10.1109/TMECH.2017.2717874.

[5] R. A. R. C. Gopura, K. Kiguchi and D. S. V. Bandara, A brief review on upper extremity robotic exoskeleton systems, *2011 6th International Conference on Industrial and Information Systems*, Kandy, Sri Lanka, 2011, pp. 346-351, doi: 10.1109/ICIINFS.2011.6038092.

[6] A. S. Niyetkaliyev, S. Hussain, M. H. Ghayesh and G. Alici, Review on Design and Control Aspects of Robotic Shoulder 1623Rehabilitation Orthoses, in IEEE Transactions on Human-Machine Systems, vol. 47, no. 6, pp. 1134-1145, Dec. 2017, doi: 10.1109/THMS.2017.2700634.

[7] M. A. Destarac, C. E. Garcia Cena, J. Garcia, R. Espinoza and R. J. Saltaren, ORTE: Robot for Upper Limb Rehabilitation. Biomechanical Analysis of Human Movements., in IEEE Latin America Transactions, vol. 16, no. 6, pp. 1638-1643, June 2018, doi: 10.1109/TLA.2018.8444160.

[8] Liu L, Shi YY, Xie L (2016) A novel multi-dof exoskeleton robot for upper limb rehabilitation. J Mech Med Biol 16 (08) 2016. 1640023.

[9] Milton U. Vargas-Ortiz, Andrés Blanco-Ortega, Jorge Colín-Ocampo, Wilberth M. Alcocer-Rosado, Manuel de Jesús Palacios-Gallegos, Víctor Fernando Ramos Fon Bon. Sistema de rehabilitación para miembros superiores con cables flexibles. Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada. Vol. 4, Núm. 1, Enero - Junio 2021.

[10] A. Magadán, A. Blanco, José A. Santana, F. A. Gómez, E. Antunez, Diseño y control de un rehabilitador de hombre. Pistas *Educativas*, No. 130, noviembre 2018, México. Pp. 1764-1778. ISSN: 2448-847X.

[11] M. T. Angulo, A. Álvarez, Y. Fuentes. Biomecánica de la Extremidad Superior. Exploración del Codo, *Biomecánica clínica*, Vol. 3, Núm. 4. Pp. 82-103. 2011. ISSN: 1989-5305.Contini, R., Drillis, R. and Bluestein, M. Determination of Body Segment Parameters, The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 5(5), pp. 493–504. 1963. doi: 10.1177/001872086300500508.

[12] Contini, R., Drillis, R. and Bluestein, M. Determination of Body Segment Parameters, *The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 5(5), pp. 493–504. 1963. doi: 10.1177/001872086300500508.

[13] A. J. Martínez-Mata, A. Blanco-Ortega, C. H. Guzmán-Valdivia, C. Cortes-García, J. A. Arellano-Cabrera. Aspectos básicos para el diseño mecánico de un exoesqueleto de extremidades inferiores para aumento de fuerza. Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada. Vol. 3, Núm. 1, Enero - Junio 2020.

[14] A. Gallego, Ejercicios tras traumatismo de codo, Traumatología Deportiva y Cirugía Ortopédica. 2021.

[15] R. Avila Chaurand,L.R. Prado León, E.L. González Muñoz. Dimensiones antropométricas de la población latinoamericana: Mexico,Cuba, Colombia, Chile Segunda edición 2007.

ISSN en trámite

Modelo Matemático de un Nuevo Absorbedor de Doble Masa Sintonizadas con Inercia Rotacional Conectado a un Edificio MDOF Sujeto a Aceleración Sísmica

Irving Abdiel Maldonado Bravo* Eduardo Barredo Hernández **
Jorge Colín Ocampo *

*Tecnológico Nacional de México /CENIDET, Interior Int. Palmira s/n. Col. Palmira. C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, México.
**Universidad Tecnológica de la Mixteca, Instituto de Ingeniería Industrial y Automotriz, C.P. 6900 Huajuapan de León, Oaxaca, México.

Resumen: En este trabajo se presenta el desarrollo de las ecuaciones diferenciales de movimiento de un nuevo absorbedor de vibración dinámico de doble masa sintonizadas con inercia rotacional, conectado a una estructura mecánica de múltiples grados de libertad (MDOF) sujeta a vibraciones estocásticas. Para el desarrollo del modelo se utilizó la ecuación de Euler – Lagrange y éste se presenta de forma adimensional en el dominio de la frecuencia.

Palabras clave: Absorbedor de vibración, Inersor, Energía mecánica, Lagrangiano, Vibración estocástica

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, se ha demostrado la factibilidad del uso de inersores en el control de vibraciones mecánicas en estructuras. El inersor es un elemento mecánico de control pasivo que posee dos terminales y un volante de inercia que se desliza sobre una cremallera y fue propuesto por Smith (2002). Al excitar una de sus terminales, el mecanismo genera una fuerza de resistencia directamente proporcional a la aceleración relativa entre sus dos terminales. Su constante de proporcionalidad es conocida como inertancia "b". Existen varios estudios acerca del rendimiento de los absorbedores de vibración dinámicos (DVAs) en obras de ingeniería civil, que han mostrado resultados favorables en la respuesta dinámica de sistemas estructurales cuando se someten a vibración estocástica. En los últimos años, el inersor se ha utilizado como un elemento crucial en la configuración del amortiguador de masa sintonizado conocido como TMD (Matteo, Masnata, & Pirrotta, 2019). Esto da origen a un TMDI, propuesto por Marian & Giaralis (2014), su uso frecuente se debe al efecto inercial que posee. En otras palabras, el inersor es capaz de generar un efecto de amplificación de masa mucho mayor al que un TMD posee de manera real. El amortiguador de masa sintonizado con inersor (TMDI) surge de conectar una de las terminales del inersor a la tierra mecánica y la otra a la masa del absorbedor. Generalmente, los análisis de rendimiento del TMDI en el control de vibraciones en estructuras, se realizan considerando excitaciones estocásticas (Marian & Giaralis, 2014), (Cheung & Wong, 2011), (Liang, Li & Zhang, 2021), logrando resultados con mayor apego a condiciones de vibración reales.

Por otra parte, Matteo et al. (2019), obtuvieron soluciones analíticas a partir del diseño óptimo de un TMDI conectado a un edificio aislado en la base sujeto a excitación de ruido blanco Gaussiano. Las soluciones analíticas para el diseño óptimo del TMDI conectado a la base aislada de una estructura tipo edificio, obtenidas por Matteo et al. (2019), fueron calculadas considerando el caso de una estructura ligeramente amortiguada y demostraron que el índice de rendimiento de control del TMD clásico se puede mejorar incrementado la inertancia del TMDI. Asimismo, analizaron la respuesta en el tiempo del edificio aislado en la base sujeto a una excitación que corresponde al sismo real Valle Imperial en Estados Unidos ocurrido en septiembre de 1979, concluyendo que el TMDI tiene efectos positivos en la reducción de las amplitudes de vibración de la estructura ante excitación sísmica.

En los últimos años el uso del inersor se ha diversificado, por lo que se pueden encontrar aplicaciones en: control de vibraciones en maquinaria industrial, control de vibraciones en sistemas rotodinámicos, suspensiones pasivas automotrices, en estructuras estacionarias de ingeniería civil, entre otras. De ahí la importancia de diseñar nuevas configuraciones y redes mecánicas de DVAs basados en inersor (IDVAs), con aplicación específica en edificaciones altas. Esto representa un gran reto, debido a que las dimensiones del inersor cambian considerablemente en comparación con las dimensiones de los que actualmente están disponibles. Al diseñar un dispositivo de absorción de vibración basado en inersor, se debe considerar especialmente la masa del absorbedor y del inersor, ya que éstas se relacionan directamente con la masa de la estructura primaria durante el trabajo de control de vibración. Por otra parte, es importante considerar la altura de la estructura que se

 ISSN en trámite

va a controlar (en caso de tratarse de un edificio), a causa de que entre más alta sea la estructura, será más susceptible a sufrir desplazamientos más grandes, sobre todo en la planta superior del edificio en caso de no contar con aislamiento en la base. En este caso, el TMDI tiene una importante aplicación cuando se presentan corrientes intensas de viento (Giaralis & Petrini, 2017), (Petrini, Giaralis & Wang, 2020).

En este trabajo se propone un nuevo absorbedor de vibración de doble masa sintonizadas con inercia rotacional conectado a un edificio de múltiples grados de libertad sujeto a vibraciones estocásticas. Se muestra el desarrollo del modelo matemático para el análisis del comportamiento dinámico del absorbedor propuesto en el dominio del tiempo y de forma adimensional en el dominio de la frecuencia. La optimización de los parámetros del absorbedor propuesto y el análisis del comportamiento dinámico se considera como trabajo futuro.

2. MODELADO MATEMÁTICO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

En la Figura 1 se muestra el absorbedor propuesto conectado a un edificio de múltiples grados de libertad aislado en la base de sección transversal regular que se utiliza como estructura sujeta a vibraciones estocásticas. El desarrollo del modelo dinámico del edificio MDOF, se obtiene considerando parámetros elásticos y de amortiguamiento lineales entre cada una de las plantas del edificio desde M_s hasta M_n.

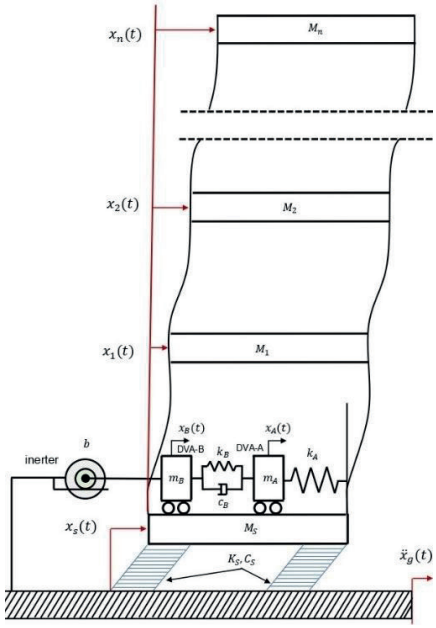


Figura 1: Edificio MDOF aislado en la base conectado al absorbedor de doble masa sintonizadas con inercia rotacional.

La Figura 1 se utilizó como marco de referencia inercial considerando la siguiente nomenclatura de posiciones absolutas y relativas:

x_g= posición absoluta del suelo.

x_{st}= posición absoluta de la base aislada.

x_{it}= posición absoluta de la i-ésima masa de la estructura principal.

x_{At}= posición absoluta de la masa m_A.

x_{Bt}= posición absoluta de la masa m_B.

x_s= posición de la base aislada relativa al suelo x_g.

x_i= posición de la i-ésima masa de la estructura principal relativa a x_{st} para i=1,2,3…n.

x_A= posición de la masa m_A relativa a x_{st}.

x_B= posición de la masa m_B relativa a x_{st}.

Esta misma nomenclatura puede ser utilizada para obtener el modelo dinámico del edificio de la Figura 1 sin el dispositivo propuesto, eliminando las posiciones absolutas (x_{At} y x_{Bt}) y relativas (x_A y x_B) correspondientes a las masas m_A y m_B.

2.1 Ecuación de Euler – Lagrange.

Las ecuaciones diferenciales de movimiento de la estructura mecánica mostrada en la Figura 1, se obtuvieron utilizando el método energético conocido como la Formulación de Euler–Lagrange, así como, la nomenclatura establecida para las posiciones de las masas. La formulación de Euler–Lagrange se define para sistemas conservativos y no conservativos en las ecuaciones (1) y (2) respectivamente (Ardema, 2005):

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = Q_i \quad (2)$$

$$i = 1,2,3,\dots n$$

Donde $L = T - V$.

En las Ecuaciones (1) y (2) q_i representa las coordenadas generalizadas del sistema, L el Lagrangiano, T y V la energía cinética y potencial del sistema, D es la función de disipación de energía y Q_i las fuerzas generalizadas.

2.2 Energía Mecánica

De acuerdo con la Ecuación (2) y la nomenclatura establecida, se define el Lagrangiano y la función de disipación de energía en función de las posiciones y velocidades de cada elemento inercial del sistema (ver Figura 1). Para $q=x$ y $i=s,A,B,1,2\dots n$. Estas funciones se definen como:

$$D(\dot{x_s}, \dot{x_1}, \dot{x_2}, \dots \dot{x_n}, \dot{x_A}, \dot{x_B}) = \frac{1}{2}C_s\dot{x_s}^2 + \frac{1}{2}C_1\dot{x_1}^2 + \frac{1}{2}C_2(\dot{x_2} - \dot{x_1})^2 + \frac{1}{2}C_3(\dot{x_3} - \dot{x_2})^2 + \cdots + \frac{1}{2}C_{n-1}(\dot{x_{n-1}} - \dot{x_{n-2}})^2 + \frac{1}{2}C_n(\dot{x_n} - \dot{x_{n-1}})^2 + \frac{1}{2}C_B(\dot{x_B} - \dot{x_A})^2 \quad (3)$$

 ISSN en trámite

$$L = T(\dot{x_s}, \dot{x_1}, \dot{x_2}, \dots \dot{x_n}, \dot{x_A}, \dot{x_B}) - V(x_s, x_1, x_2, \dots x_n, x_A, x_B) \quad (4)$$

donde la energía cinética "T" es:

$$T(\dot{x_s}, \dot{x_1}, \dot{x_2}, \dots \dot{x_n}, \dot{x_A}, \dot{x_B}) = \frac{1}{2}M_s(\dot{x_s} + \dot{x_g})^2 + \frac{1}{2}M_1(\dot{x_1} + \dot{x_s} + \dot{x_g})^2 + \frac{1}{2}M_2(\dot{x_2} + \dot{x_s} + \dot{x_g})^2 \dots + \frac{1}{2}M_{n-1}(\dot{x}_{n-1} + \dot{x_s} + \dot{x_g})^2 + \frac{1}{2}M_n(\dot{x_n} + \dot{x_s} + \dot{x_g})^2 + \frac{1}{2}m_A(\dot{x_A} + \dot{x_s} + \dot{x_g})^2 + \frac{1}{2}m_B(\dot{x_B} + \dot{x_s} + \dot{x_g})^2 + \frac{1}{2}b(\dot{x_B} + \dot{x_s})^2$$

y la energía potencial elástica "V" es:

$$V(x_s, x_1, x_2, \dots x_n, x_A, x_B) = \frac{1}{2}k_s x_s^2 + \frac{1}{2}k_1 x_1^2 + \frac{1}{2}k_2(x_2 - x_1)^2 + \frac{1}{2}k_3(x_3 - x_2)^2 + \cdots + \frac{1}{2}k_{n-1}(x_{n-1} - x_{n-2})^2 + \frac{1}{2}k_n(x_n - x_{n-1})^2 + \frac{1}{2}k_A x_A^2 + \frac{1}{2}k_B(x_B - x_A)^2 .$$

De las ecuaciones (3) y (4) se puede observar que si se hace b=0, m_A=0, m_B=0, k_A=0, k_B=0 y C_B=0, elementos correspondientes al absorbedor propuesto, se obtiene el Lagrangiano y disipación de energía correspondiente al edificio MDOF tal y como se presenta en Di Matteo et al. (2019).

2.3 Ecuaciones Diferenciales de Movimiento

De acuerdo con la ecuación de (2), considerando las coordenadas x_s, x_A, x_B, x_1, x_2,… x_n (ver Figura 1) y las ecuaciones (3) y (4), se obtiene un conjunto de *n+3* ecuaciones diferenciales lineales que se pueden escribir como:

$$(M_t + m_A + m_B + b)\ddot{x_s} + \sum_{i=1}^{n} M_i \ddot{x_i} + m_A\ddot{x_A} + (m_B + b)\ddot{x_B} + C_s\dot{x_s} + k_s x_s = -(M_t + m_A + m_B)\ddot{x_g} \quad (5)$$

$$m_A(\ddot{x_A} + \ddot{x_s}) + C_B\dot{x_A} - C_B\dot{x_B} + (k_A + k_B)x_A - k_B x_B = -m_A\ddot{x_g} \quad (6)$$

$$(m_B + b)(\ddot{x_B} + \ddot{x_s}) - C_B\dot{x_A} + C_B\dot{x_B} - k_B x_A + k_B x_B = -m_B\ddot{x_g} \quad (7)$$

$$M_i\ddot{x_i} + M_i\ddot{x_s} + \sum_{i=1}^{n} C_{ij}\dot{x_j} + \sum_{i=1}^{n} k_{ij}x_j = -M_i\ddot{x_g} \quad (8)$$

Donde: $M_t = M_s + \sum_{i=1}^{n} M_i$ y *i=1,2,3,…n.*

Los coeficientes C_{ij} y k_{ij} son los elementos de las matrices ***C*** y ***k*** que representan los coeficientes de amortiguamiento y rigidez de cada uno de los pisos del edificio. Estas matrices se definen en (Rao, 2012) de manera general para sistemas lineales de múltiples grados de libertad.

2.4 Modelo Dinámico Simplificado

El objetivo del absorbedor propuesto es controlar los niveles de vibración de la base de la estructura considerando los desplazamientos de los *n* pisos del edificio. Sin embargo, los *n+1* grados de libertad del edificio de la Figura 1, se pueden reducir considerando que los desplazamientos de los pisos de la estructura principal son pequeños al grado de ser despreciables con respecto a los de la base aislada. De acuerdo con la literatura, un edificio con base aislada tiende a comportarse como cuerpo rígido cuando está sujeto a aceleración sísmica y a otro tipo de excitaciones externas (Love et al, 2011). Por lo tanto, la estructura MDOF de la Figura 1 se puede simplificar tal y como se muestra en la Figura 2. Ocasionando que las *n+3* ecuaciones representadas en (5)-(8) se reduzcan a un sistema de *3* ecuaciones considerando los tres grados de libertad de la Figura 2. Es decir, el edificio MDOF se reduce a un sistema de un grado de libertad (SDOF) de masa modal M_t, que corresponde a un solo modo de vibración y que será controlado por el absorbedor de doble masa sintonizadas con inercia rotacional propuesto.

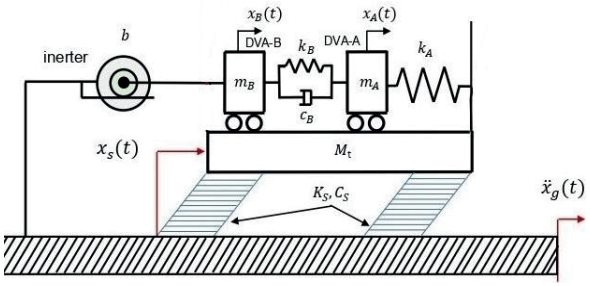


Figura 2: Edificio SDOF aislado en la base conectado al absorbedor de doble masa sintonizadas con inercia rotacional.

El nuevo modelo dinámico obtenido de la estructura de la Figura 2, está representado por las ecuaciones (6), (7) y (9).

$$(M_t + m_A + m_B + b)\ddot{x_s} + m_A\ddot{x_A} + (m_B + b)\ddot{x_B} + C_s\dot{x_s} + k_s x_s = -(M_t + m_A + m_B)\ddot{x_g} \quad (9)$$

Se puede observar que las ecuaciones (6) y (7) son las mismas que se obtienen al utilizar la ecuación de Euler-Lagrange y la nomenclatura establecida en la estructura de las Figuras 1 y 2.

3. MODELADO MATEMÁTICO EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA

Para la obtención del modelo matemático de la estructura de la Figura 2 en el dominio de la frecuencia se utilizó la transformada de Laplace y después la transformada de Fourier considerando un análisis en estado estable. Ambas transformadas se definen en (10) y (11) respectivamente:

$$X(s) = L\{x(t)\} = \int_0^\infty x(t)e^{-(\sigma + j\omega)t}\,dt = \int_0^\infty x(t)e^{-st}\,dt \quad (10)$$

$$X(\omega) = F\{x(t)\} = \int_0^\infty x(t)e^{-j\omega t}\,dt \quad (11)$$

ISSN en trámite

La transformada de Fourier se puede obtener a partir de la transformada de Laplace haciendo $s = j\omega$, condición que se cumple cuando en $X(s)$ el parámetro $\sigma=0$, lo cual ocurre cuando se analiza la parte estable de los sistemas dinámicos. Asimismo, la región de convergencia de la transformada de Laplace, ocurre únicamente cuando $\sigma > 0$.

3.1 Modelo en el dominio de Fourier

Aplicando la Transformada de Laplace (10) con condiciones iniciales nulas al sistema de ecuaciones (6), (7) y (9) y haciendo $s = j\omega$ (considerando un análisis en estado estable), se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones algebraico lineal de 3x3.

$$-(\mathrm{M_t} + \mathrm{m_A} + \mathrm{m_B} + \mathrm{b})\omega^2 X_s - \mathrm{m_A}\omega^2 X_A - (\mathrm{m_B} + \mathrm{b})\omega^2 X_B + \mathrm{j}C_s\omega X_s + k_s X_s = -(M_t + m_A + m_B)\ddot{X}_g \quad (12)$$

$$-\mathrm{m_A}\omega^2(X_A + X_s) + \mathrm{j}C_\mathrm{B}\omega(X_A - X_B) + (\mathrm{k_A} + \mathrm{k_B})X_\mathrm{A} - m_A\ddot{X}_g \quad (13)$$

$$-(\mathrm{m_B} + \mathrm{b})\omega^2(X_B + X_s) - \mathrm{j}C_\mathrm{B}\omega(X_A - X_B) - \mathrm{k_B}X_\mathrm{A} - m_B\ddot{X}_g \quad (14)$$

Las ecuaciones (12) – (14) corresponden al modelo Dinámico del edificio rígido de base aislada conectado al absorbedor propuesto en el dominio de la frecuencia. La transformada de Laplace del término $\ddot{x}_g$ se definió como $\ddot{X}_g$ debido a que la excitación de este sistema es una aceleración como función del tiempo y no una función de posición, por lo tanto, no se trata como segunda derivada. La obtención de la función de respuesta en frecuencia (conocida como FRF por sus siglas en inglés) de la estructura primaria, se obtiene adimensionando el sistema de ecuaciones (12) – (14).

3.2 Variables Adimensionales

Del sistema definido (12) - (14) es posible calcular las FRFs para los desplazamientos X_s, X_A y X_B correspondientes a la estructura primaria y a las masas del absorbedor respectivamente, en función de los parámetros del absorbedor y de la estructura. Sin embargo, solamente es de interés la FRF del desplazamiento X_s de la estructura primaria. Resolviendo el sistema (12) – (14) para el desplazamiento X_s, la función de transferencia se puede escribir como:

$$X_s(\omega) = H(\omega)\ddot{X}_g(\omega) \quad (15)$$

Si se considera que los parámetros del absorbedor y de la estructura son variables, se tiene que:

$$X_s = f\left(k_s, k_A, k_B, M_t, m_A, m_B, b, C_s, C_B, \omega, \ddot{X}_g\right) \quad (16)$$

En la ecuación (16) se puede observar que el desplazamiento X_s de la masa total del edificio "M_t" es función de 11 variables, donde las rigideces k_s, k_A y k_B se pueden sustituir por sus respectivas frecuencias naturales ω_s, ω_A y ω_B mediante las relaciones $k_s = M_t\omega_s{}^2$, $k_A = m_A\omega_A{}^2$ y $k_B = m_B\omega_B{}^2$. Por lo tanto, la función (16) se puede reescribir como:

$$X_s = f\left(\omega_s, \omega_A, \omega_B, M_t, m_A, m_B, b, C_s, C_B, \omega, \ddot{X}_g\right) \quad (17)$$

Para determinar las variables adimensionales del sistema de la Figura 2, se utilizó el teorema Pi de Buckingham (Evans, 1972), que establece que, para representar una variable física dependiente de otras variables físicas en forma adimensional, es necesario contabilizar el número m de variables participantes en el sistema considerando la variable dependiente, y luego restarle el número k de unidades físicas fundamentales involucradas: tiempo (T), masa (M) y longitud (L_0). Esta diferencia se denota como; $\pi = m - k$, donde π es el número de variables adimensionales que representaran el sistema.

La ecuación (17), se encuentra en términos de 11 variables físicas independientes y de 1 variable física dependiente, por lo que $m=12$ variables. Asimismo, del análisis dimensional de cada una de las variables se observó que todas las variables involucran las tres unidades fundamentales: tiempo, masa y longitud, entonces $k=3$. De acuerdo con el teorema de Pi de Buckingham, el número de variables adimensionales para la estructura de la Figura 2 son: $\pi = n - k = 12 - 3 = 9$, es decir 8 variables independientes y una dependiente. Donde las 8 variables independientes se pueden definir como:

$$\upsilon = \frac{\omega_A}{\omega_s} \quad (18) \qquad \eta = \frac{\omega_B}{\omega_s} \quad (19)$$

$$\mu = \frac{m_B}{m_A} \quad (20) \qquad \delta = \frac{b}{m_B} \quad (21)$$

$$\beta = \frac{m_A + m_B}{M_t} \quad (22) \qquad \zeta_B = \frac{C_B}{2m_B\omega_B} \quad (23)$$

$$\zeta_s = \frac{C_s}{2M_t\omega_s} \quad (24) \qquad \Omega = \frac{\omega}{\omega_s} \quad (25)$$

mientras que la variable adimensional dependiente es:

$$H_s = \frac{X_s\omega_s{}^2}{\ddot{X}_g} \quad (26)$$

Definidas las variables adimensionales independientes (18) - (25), se sustituyen en el sistema de ecuaciones en el dominio de Fourier (12) - (14). De esta manera, se obtiene el modelo dinámico en forma adimensional en el dominio de la frecuencia correspondiente a la estructura SDOF mostrada en la Figura 2.

$$-\left(1 + \beta + \frac{\delta\mu\beta}{1+\mu}\right)\Omega^2\mathrm{X_s} - \frac{\beta\Omega^2}{1+\mu}\mathrm{X_A} - \frac{\beta\mu(1+\delta)}{1+\mu}\Omega^2\mathrm{X_B} + 2j\zeta_s\Omega X_s + X_s = -(1+\beta)\frac{\ddot{X}_g}{\omega_s^2} \quad (27)$$

$$-\Omega^2(X_A + X_s) + 2j\mu\zeta_B\eta\Omega(X_A - X_B) + \upsilon^2 X_A + \mu\eta^2(X_A - X_B) = -\frac{\ddot{X}_g}{\omega_s^2} \quad (28)$$

 ISSN en trámite

$$-(1+\delta)\Omega^2(X_B+X_s)+2j\zeta_B\eta\Omega(X_B-X_A)+\eta^2 (X_B-X_A)=-\frac{\ddot{X}_g}{\omega_s^2} \quad (29)$$

De las ecuaciones (27)–(29) se puede observar que los desplazamientos X_s, X_A y X_B no son adimensionales, por lo que las ecuaciones presentan unidades de desplazamiento en los términos del lado izquierdo como en el término del lado derecho.

3.3 Función de Respuesta en Frecuencia Adimensional

Despejando X_s de las ecuaciones (27) – (29) se obtiene una expresión similar a la ecuación (17) en función de las 8 variables adimensionales independientes:

$$X_s = f\left(\nu,\eta,\beta,\mu,\delta,\zeta_s,\zeta_B,\Omega\right)\frac{\ddot{X}_g}{\omega_s{}^2} \quad (30)$$

Despejando $f(\nu,\eta,\beta,\mu,\delta,\zeta_s,\zeta_B,\Omega)$ de la ecuación (30) y comparando con la amplitud de vibración adimensional (26) resulta:

$$\frac{X_s\omega_s{}^2}{\ddot{X}_g}=H_s=f\left(\nu,\eta,\beta,\mu,\delta,\zeta_s,\zeta_B,\Omega\right) \quad (31)$$

considerando que el amortiguamiento interno del material de la base aislada ζ_s es pequeño en comparación con el amortiguamiento ζ_B del absorbedor propuesto, es posible despreciar ζ_s sin tener cambios significativos en la respuesta del sistema, por tanto:

$$H_s=f(\nu,\eta,\beta,\mu,\delta,\zeta_B,\Omega) \quad (32)$$

La FRF de la ecuación (32) se expresa analíticamente como:

$$H_s=\frac{N_4\Omega^4+iN_3\Omega^3+N_2\Omega^2+iN_1\Omega+N_0}{D_6\Omega^6+iD_5\Omega^5+D_4\Omega^4+iD_3\Omega^3+D_2\Omega^2+iD_1\Omega+D_0} \quad (33)$$

Nótese que los coeficientes N_i *(i=0,1,…4)* y D_i *(i=0,1,…6)* de la ecuación (33) están en términos de seis variables adimensionales de las ecuaciones (18)-(23), éstos se muestran en el Apéndice A. Para expresar la FRF (33) en términos de variable real, se obtiene su magnitud multiplicando su numerador y denominador por el número complejo conjugado del denominador, posteriormente se aplica el teorema de Pitágoras. Por lo tanto:

$$H_s=\sqrt{\frac{A^2+B^2}{C^2+D^2}} \quad (34)$$

Donde:
$A=N_4\Omega^4+N_2\Omega^2+N_0$
$B=N_3\Omega^3+N_1\Omega$
$C=D_6\Omega^6+D_4\Omega^4+D_2\Omega^2+D_0$ y
$D=D_5\Omega^5+D_3\Omega^3+D_1\Omega$.

En la Figura 3 se muestra el comportamiento de dos FRFs de la estructura principal de la Figura 2, con una relación de masas de $\beta=0.07$ y con valores de las variables adimensionales ν, η, μ, δ y ζ_B (18)-(23) dados de forma arbitraria. Ambas gráficas tienen 3 frecuencias resonantes, FRF verde: $\Omega_1=0.802$, $\Omega_2=1.019$ y $\Omega_3=1.21$, FRF roja: $\Omega_1=0.82$, $\Omega_2=1.031$ y $\Omega_3=1.31$. Con el objetivo de optimizar el rendimiento del absorbedor propuesto, es necesario formular problemas de optimización para encontrar las variables adimensionales que minimicen la amplitud de vibración en resonancia o la energía total de vibración de la estructura.

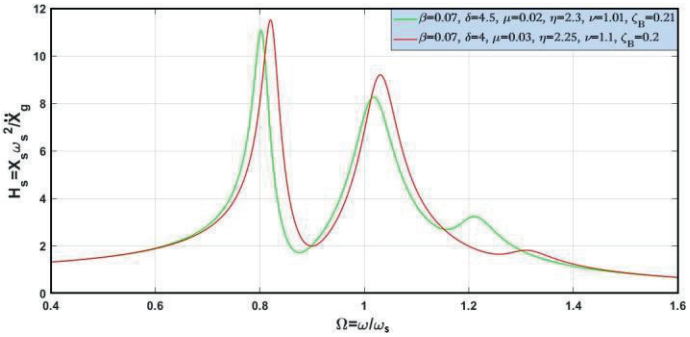


Figura 3: Curvas de respuesta en frecuencia de M_t utilizando valores arbitrarios de las variables adimensionales.

4. VIBRACIÓN ESTOCÁSTICA

Para conocer la respuesta en el tiempo del edificio aislado en la base, sujeto a vibración estocástica (Figura 2), es necesario resolver las ecuaciones diferenciales (6), (7) y (9) considerando excitación sísmica o de ruido blanco Gaussiano. La señal que emula la excitación sísmica puede ser representada como una serie de Fourier, en donde la amplitud, frecuencia y ángulo de fase de cada una de las armónicas que componen la señal, tienen un comportamiento aleatorio (Shinozuka & Deodatis, 1991), las diferentes amplitudes y frecuencias de la señal se relacionan mediante una función de densidad espectral. Las ecuaciones (35) y (36) representan la señal estocástica de excitación y la función de densidad espectral de potencia sísmica respectivamente (Zuo et al, 2021) y (Liang et al, 2021).

$$\ddot{x}_g(t)=\sqrt{2}\sum_{n=0}^{N-1}\sqrt{2S_f(\omega_n)\Delta\omega}\cos\left(\omega_n t+\phi_n\right) \quad (35)$$

$$S_f(\omega)=\frac{\omega_g{}^4+4\zeta_g^2\,\omega_g{}^2\omega^2}{\left(\omega_g{}^2-\omega^2\right)^2+4\zeta_g^2\,\omega_g{}^2\omega^2}\cdot\frac{\omega^4\cdot S_0}{\left(\omega_f{}^2-\omega^2\right)^2+4\zeta_f^2\,\omega_f{}^2\omega^2} \quad (36)$$

Donde: $S_0=\frac{0.141\,\zeta_g\,\ddot{x}_{gmax}{}^2}{\omega_g\sqrt{1+4\zeta_g{}^2}}$ (37)

La definición y valores de los parámetros ω_n, $\Delta\omega$, ϕ_n, ω_g, ζ_g, ω_f, ζ_f y S_0 se muestran en (Shinozuka & Deodatis, 1991), (Buchholdt & Nejad, 2012) y (Zuo et al, 2021). Los parámetros

ISSN en trámite

ω_g, ζ_g, ω_f y ζ_f representan tres tipos de suelo: suave, medio y firme (Zuo et al, 2021). La simulación numérica de la ecuación (35) se muestra en la Figura 4.

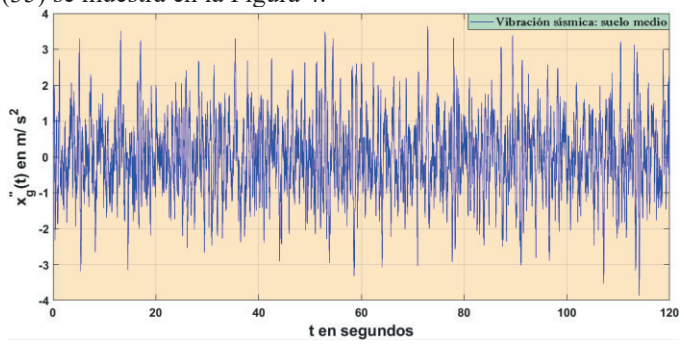


Figura 4: Vibración estocástica con densidad espectral de potencia sísmica y media aproximadamente igual a cero.

5. CONCLUSIONES

El nuevo absorbedor de doble masa sintonizadas con inercia rotacional fue propuesto con base en el buen rendimiento dinámico que han presentado el TMDI Y el absorbedor de doble masa en serie, utilizados por Di Matteo et al. (2019) y Asami, Mizukawa, & Ise (2018) respectivamente. En este trabajo se presentó el desarrollo de las ecuaciones diferenciales de movimiento del absorbedor propuesto conectado a una estructura MDOF. Se consideró que el edificio MDOF se comporta como un cuerpo rígido, lo que simplifica el modelo dinámico de *n+3* grados de libertad en uno de uno de *3* grados de libertad.

Se propusieron *8* variables adimensionales para representar la FRF en forma adimensional. Las cuáles simplifican la formulación de problemas de optimización para mejorar el rendimiento del absorbedor propuesto. A partir del modelado matemático realizado, se concluye que la respuesta en el dominio del tiempo de edificios aislados en la base, puede ser mejorada con respecto a la que se obtiene al acoplar el TMDI y otras redes mecánicas utilizadas extensamente en la literatura (Hu & Chen, 2015).

REFERENCIAS

Ardema, M. D. (2005). Analytical dynamics: theory and applications. Springer Science & Business Media.

Asami, T., Mizukawa, Y., & Ise, T. (2018). Optimal design of double-mass dynamic vibration absorbers minimizing the mobility transfer function. Journal of Vibration and Acoustics, 140(6).

Buchholdt, H., & Nejad, S. M. (2012). Structural Dynamics for Engineers Second edition. Londres: ICE Publishing.

Cheung, Y. L., & Wong, W. O. (2011). H2 optimization of a non-traditional dynamic vibration absorber for vibration control of structures under random force excitation. journal of sound and vibration, 330(6), 1039-1044.

Di Matteo, A., Masnata, C., & Pirrotta, A. (2019). Simplified analytical solution for the optimal design of tuned mass damper inerter for base isolated structures. Mechanical Systems and Signal Processing, 134, 106337.

Evans, JH (1972). Análisis dimensional y teorema del Pi de Buckingham. Revista estadounidense de física , 40 (12), 1815-1822.

Giaralis, A., & Petrini, F. (2017). Wind-induced vibration mitigation in tall buildings using the tuned mass-damper-inerter. Journal of Structural Engineering, 143(9), 04017127.

Hu, Y., & Chen, M. Z. (2015). Performance evaluation for inerter-based dynamic vibration absorbers. International Journal of Mechanical Sciences, 99, 297-307.

Liang, Q., Li, L., & Zhang, Y. (2021). Structural optimal hybrid control strategies employing dynamic dual units: inerter and spring. Earthquake Engineering & Structural Dynamics.

Love, J. S., Tait, M. J., & Toopchi-Nezhad, H. (2011). A hybrid structural control system using a tuned liquid damper to reduce the wind induced motion of a base isolated structure. Engineering Structures, 33(3), 738-746.

Marian, L., & Giaralis, A. (2014). Optimal design of a novel tuned mass-damper–inerter (TMDI) passive vibration control configuration for stochastically support-excited structural systems. Probabilistic Engineering Mechanics, 38, 156-164.

Petrini, F., Giaralis, A., & Wang, Z. (2020). Optimal tuned mass-damper-inerter (TMDI) design in wind-excited tall buildings for occupants' comfort serviceability performance and energy harvesting. Engineering Structures, 204, 109904.

Rao, S. S. (2012). Vibraciones Mecánicas Quinta Edición. México: Pearson Educación.

Smith, M. C. (2002). Synthesis of mechanical networks: the inerter. IEEE Transactions on automatic control, 47(10), 1648-1662.

Shinozuka, M., & Deodatis, G. (1991). Simulation of stochastic processes by spectral representation.

Zuo, H., Bi, K., Hao, H., & Ma, R. (2021). Influences of ground motion parameters and structural damping on the optimum design of inerter-based tuned mass dampers. Engineering Structures, 227, 111422.

APÉNDICE A. Coeficientes de la FRF.

$$N_4 = (\delta+1)(\mu+1),$$
$$N_3 = -2\eta\left[(\delta+1)\mu+1\right](\mu+1)\zeta_B,$$
$$N_2 = -\left[(\delta+1)\mu+1\right](\mu+1)\eta^2 - \nu^2(\delta+1)(\mu+\beta+1),$$
$$N_1 = 2\eta\nu^2(1+\beta)(\mu+1)\zeta_B,$$
$$N_0 = \eta^2\nu^2(1+\beta)(\mu+1),$$
$$D_6 = (\delta+1)(\mu+1),$$
$$D_5 = -2\eta\left[(\delta+1)\mu+1\right](\mu+1)\zeta_B,$$
$$D_4 = -\left[(\delta+1)\mu+1\right](\mu+1)\eta^2 - \left[(\nu^2+1)\mu+1+(1+\beta)\nu^2\right](\delta+1),$$
$$D_3 = 2\{(\delta+1)\mu^2+\left[(\beta\delta+\beta+1)\nu^2+\delta+2\right]\mu+1 +(1+\beta)\nu^2\}\zeta_B\eta,$$
$$D_2 = \{(\delta+1)\mu^2+\left[(\beta\delta+\beta+1)\nu^2+\delta+2\right]\mu+1+(1+\beta)\nu^2\}\eta^2 +\nu^2(\delta+1)(\mu+1),$$
$$D_1 = -2\eta\nu^2\zeta_B(\mu+1),\quad D_0 = -\eta^2\nu^2(\mu+1).$$

ISSN en trámite

Evaluación anual del desempeño térmico de un muro Trombe con un material de cambio de fase

L. Aparicio-Mercado*, E. Vázquez-Beltrán*, A. Carmona-Núñez, I. Hernández-López***

**Universidad de Sonora, DIQyM-UNISON, Blvd. Luis Encinas y Rosales S/N, Hermosillo, Sonora, CP 83000 (e-mail: a214206165@unison.mx).*
***Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Zacatepec, Zacatepec, Morelos, CP 62780*

Resumen: Se presenta la evaluación térmica de un sistema de muro Trombe con un material de cambio de fase (PCM-TW) bajo las condiciones climáticas de Tacubaya, Ciudad de México. Para realizar la predicción del desempeño térmico del sistema, se implementó un modelo matemático en dos etapas. El primero está basado en el método de balances globales (BG) para la conducción en el vidrio colector, así como la convección y la radiación en el canal de aire. Por otro lado, para la transferencia de calor por difusión en el muro masivo con PCM, se utilizó el método de volumen finito (MVF). La evaluación anual del sistema PCM-TW se realizó considerando un PCM con punto de fusión de 29 °C (P29-TW). El desempeño de este sistema se comparó contra un muro Trombe de concreto (C-TW). Los resultados de las simulaciones mostraron que el sistema C-TW presentó un mejor desempeño en la energía suministrada a la edificación en el periodo diurno de 42% en comparación con el P29-TW. Por otro lado, el P29-TW mostró hasta 35 veces un mejor desempeño nocturno con respecto al C-TW.

Palabras clave: Muro Trombe, Calentamiento Solar Pasivo, Confort térmico.

1. INTRODUCCIÓN

El sector energético es uno de los sectores con mayor crecimiento y demanda. Donde la energía eléctrica producida mediante los combustibles fósiles, carbón y sus derivados representan el 81.4 % a nivel mundial de acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés). El consumo energético de las edificaciones representa el 21.22 %. IEA, (2019). Adicionalmente, considerando que el ser humano, durante la mayor parte su vida diaria realiza actividades dentro de edificaciones, resulta necesario establecer condiciones de confort en ellas.

Para ello, existen tecnologías tradicionales como los equipos de aire acondicionado o calefactores que ayudan a mantener condiciones térmicamente agradables en las edificaciones. Sin embargo, su uso involucra un mayor consumo energético. De hecho, tan sólo en México, el consumo de energía en el sector de edificaciones representa el 20 % (SENER, 2019). En este sentido, y con el propósito de reducir el uso de estas tecnologías tradicionales, es necesario encontrar alternativas que permitan aprovechar las energías renovables y mantener condiciones de confort térmico.

Para atender estas cuestiones existe el concepto arquitectura bioclimática. La cual, es una rama del diseño arquitectónico e ingenieril que opta por el ahorro en gasto energético mediante el diseño de edificaciones que permitan el máximo aprovechamiento de sus recursos disponibles (Sol, viento, lluvia) reduciendo así, en lo posible, el consumo energético y a su vez minimizando el impacto ambiental de las mismas. En particular, para propósitos de calentamiento pasivo, el sistema de muro Trombe (TW) es una tecnología ideal con la principal característica de almacenar energía en forma de calor sensible.

Actualmente, este sistema es usado para proporcionar calentamiento diurno mediante la recirculación de aire calentado por la exposición solar. Si el muro es lo suficientemente grueso como para almacenar energía, el calentamiento pasivo puede extenderse un par de horas después de la puesta del sol mediante la liberación de energía a través de los mecanismos de convección y radiación (Hernández-López, 2016). Sin embargo, la incorporación de materiales de cambio de fase (PCM) al muro incrementa su capacidad de almacenamiento y con ello, el desempeño térmico del sistema sin la necesidad de emplear muros gruesos (Rabani et al., 2013).

En años recientes, investigadores se han enfocado en estudiar este sistema con la finalidad de optimizarlo para incrementar su desempeño. Utzinger et al. (1980), realizaron un estudio teórico mediante el método de balances globales. Con el propósito de reducir la complejidad del modelo teórico y a su vez, el tiempo de cómputo, en este estudio se propuso un modelo unidimensional alimentado con información de un perfil de velocidades bidimensional. Se encontró que, el modelo

ISSN en trámite

propuesto reproduce satisfactoriamente los resultados obtenidos con un modelo bidimensional.

Con respecto al material, Vázquez-Beltrán et al. (2021) realizo un estudio paramétrico del material (Adobe, Ladrillo y Concreto) en el muro masivo siendo el concreto el material con mejor desempeño térmico, posteriormente evaluó el sistema de TW bajo condiciones climáticas para una ciudad con clasificación Köppen *Cws-Cwb* de México encontrando que un muro de concreto de 30 cm de espesor tiene el potencial para implementarse en ciudades de clima generalmente frio. Con relación a estudios sobre calentamiento pasivo con TW en condiciones climáticas mexicanas, a través de un estudio paramétrico con CFD, Hernández-López (2016) encontró que la configuración de un muro de concreto de 30 cm de ancho con 20 cm de longitud en las ventilas y en el canal produce el mejor rendimiento para este sistema en una ciudad con clasificación Köppen Cwb.

Por otro lado, Rabani et al. (2013) estudiaron numéricamente el efecto del material del muro masivo en el tiempo de calentamiento. Consideraron ladrillo, hormigón y dos materiales de cambio de fases. Los autores descubrieron que la cera de parafina presenta un mejor rendimiento ya que proporciona un calentamiento nocturno durante más tiempo que los otros materiales.

Recientemente, Aparicio (2021) realizó un estudio del efecto del punto de fusión de un PCM en un PCM-TW. Se consideraron puntos de fusión de 29, 37, 48 y 60 °C. Se encontró que el mejor desempeño del sistema se obtiene al utilizar un PCM con punto de fusión de 29 °C.

Por consiguiente, debido a la propiedad de almacenamiento por calor latente que tiene, se prevé que la incorporación de un PCM adecuado en el TW mejorará su desempeño. Así, el propósito de este trabajo es realizar un análisis dinámico de un sistema PCM-TW para predecir su desempeño bajo condiciones climáticas de una ciudad mexicana con clima templado y compararlo con un muro Trombe convencional.

2. MODELO FÍSICO Y MATEMÁTICO

La Figura 1 muestra el modelo físico del sistema, el cual está constituido por los siguientes elementos: 1) Un vidrio colector de espesor L_g; 2) un muro masivo con PCM encapsulado por dos losas de concreto de espesor L_{cr} cada una. El muro tiene una altura de H_w, un espesor en conjunto de L_w, con espesor de PCM de L_{PCM} = 1 cm, siendo L_w=2L_{cr}+L_{PCM}; 3) un canal de aire formado por el vidrio y el muro; 4) un canal con un ancho de L_c. El sistema cuenta con ventilas en la parte superior e inferior que funcionan para establecer un lazo convectivo entre el canal y la habitación. Cada ventila tiene una longitud de apertura H_v igual al ancho del canal (H_v=L_c). El sistema tiene una profundidad W y una altura H. El PCM-TW se considera con una orientación hacia el sur con el fin de maximizar la radiación solar sobre el absorbedor a lo largo del día.

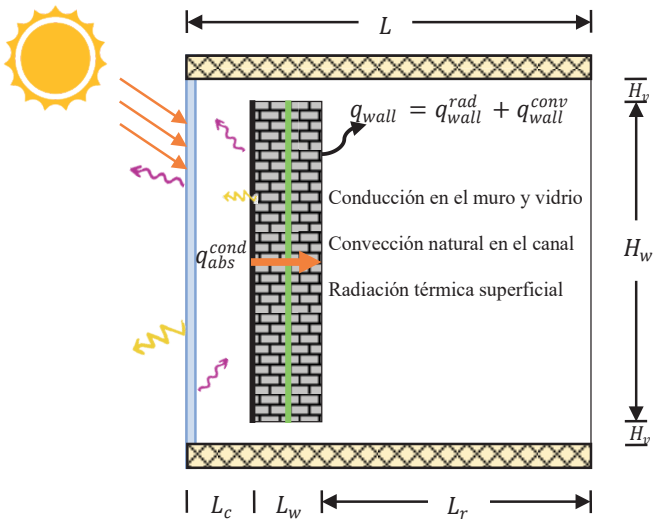


Fig. 1 Modelo físico.

Dado que el sistema de muro Trombe este compuesto por distintos componentes (vidrio, canal, muro masivo, PCM etc.), este se dividió en dos sistemas principales con el fin de reducir la complejidad del modelo matemático. El primer sistema es el vidrio-canal. Éste agrupa la pared semitransparente, el fluido y el canal. Aquí ocurren tres mecanismos de transferencia de calor: conducción en el vidrio, convección en el aire y radiación térmica con las superficies que lo componen. Para resolver las ecuaciones gobernantes de dicho sistema se implementó el método de balances globales de energía (BG). Por otro lado, el segundo sistema corresponde al muro masivo con PCM. En este se lleva a cabo el fenómeno de difusión térmica a través de todo el dominio. Para el sistema de muro-PCM se eligió el método de volumen finito (MVF).

2.1 Modelo de balances globales de energía en el sistema vidrio-canal.

Para modelar la transferencia de calor en el sistema de vidrio-canal, se utilizaron 5 nodos. La Figura 2 muestra la disposición de los puntos nodales en el sistema, 3 se ubican en el vidrio ($T_{g,1}$, $T_{g,2}$, $T_{g,3}$), uno en el canal de aire (T_f) y otro en el absorbedor del muro masivo. Este último nodo funge de enlace para el acoplamiento con el muro masivo. Los coeficientes convectivos en el canal se determinaron mediante las correlaciones de Churchill y Chu (1975). Estas correlaciones se tomaron de Incropera y De Witt (2002).

El modelo matemático de transferencia de calor en el sistema vidrio-canal se encuentra descrito por las Ecs. (1)-(5):

Nodo $T_{g,1}$:

$$\alpha_g^* G_{sol} = h_{ext}^{conv}\left[T_{g,1} - T_{amb}\right] + \varepsilon_g^* \sigma\left[T_{g,1}^4 - T_{sky}^4\right] + \lambda_g \frac{T_{g,1} - T_{g,2}}{L_g / 2} \quad (1)$$

Nodo $T_{g,2}$:

ISSN en trámite

$$\lambda_g \frac{T_{g,1}-T_{g,2}}{L_g/2} - \lambda_g \frac{T_{g,2}-T_{g,3}}{L_g/2} = \rho_g C_{P,g} L_g \frac{T_{g,2}-T_{g,2}^{\circ}}{\Delta t} \quad (2)$$

Nodo $T_{g,3}$:

$$\lambda_g \frac{T_{g,2}-T_{g,3}}{L_g/2} + \varepsilon^*_{g-abs}\sigma\left[T_{abs}^4 - T_{g,3}^4\right] = h_{g-f}^{conv}\left(T_{g,3}-T_f\right) \quad (3)$$

Nodo T_f:

$$h_{g-f}^{conv}\left(T_{g,3}-T_f\right) + h_{abs-f}^{conv}\left(T_{abs}-T_f\right) - q_c A_t = \rho_f C_{P,f} L_c \frac{T_f - T_f^{\circ}}{\Delta t} \quad (4)$$

Nodo T_{abs}:

$$\alpha^*_{abs}\tau^*_g G_{sol} = \varepsilon^*\sigma\left[T_{abs}^4 - T_{g,3}^4\right] + h_{abs-f}^{conv}\left(T_{abs}-T_f\right) + q_{abs}^{cond} \quad (5)$$

Donde las condiciones iniciales para cada punto nodal son igual la temperatura de la habitación (T_{room}=24°C).

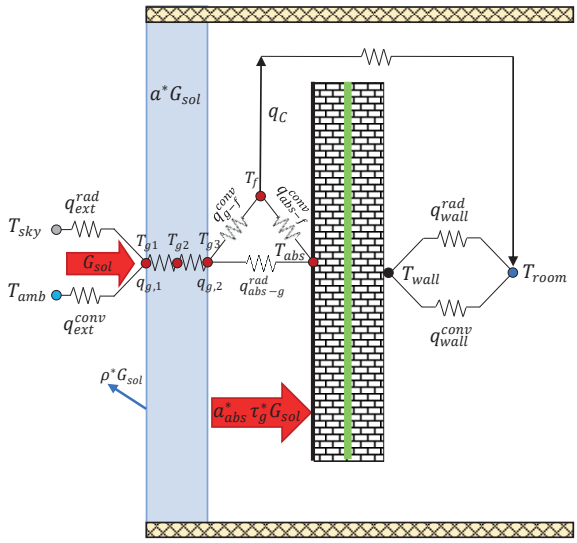


Fig. 2. Diagrama térmico resisitvo del sistema TW-PCM

2.2 Modelo conductivo del muro almacenador.

En la Figura 3 se presenta el modelo físico del PCM-TW el cual se trabajó bajo el método de volumen finito. Debido a que el espesor del muro (x) es mucho menor a su altura (y) y a su profundidad (z), se consideró flujo de calor unidimensional en dirección x. Adicionalmente, dado que el espesor del PCM es de 1 cm y a que los cambios de temperatura en el muro son suaves y graduales, se despreciaron los efectos de convección de calor cuando éste alcanzó su fase líquida, i.e. sólo se consideró difusión de calor en el sistema del muro masivo.

De acuerdo con lo anterior, el modelo matemático de la transferencia de calor por difusión térmica en el muro corresponde a la Ec. (6):

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right) = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

Donde C es el calor específico efectivo ($C = C_P + h_{ls}/\Delta T_{ls}$) el cual representa la suma de las contribuciones de la energía sensible y la energía latente por unidad de masa y por unidad de temperatura Voller y Swaminathan (1991).

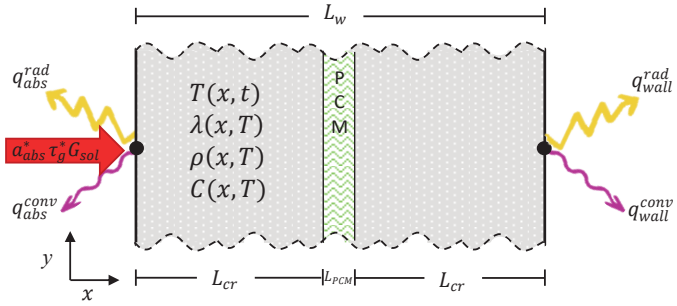


Fig. 3. Modelo físico del sistema muro masivo.

3. VERIFICACION Y VALIDACION DEL MODELO

Como parte de la verificación del modelo matemático se resolvió el problema de difusión de calor unidimensional en un sistema de losa concreto-PCM.

El Modelo físico se muestra en la Figura 4. Éste consiste en una losa compuesta por concreto y un PCM (PureTemp29). El PCM tiene un espesor de 1 cm, se ubica entre dos secciones idénticas de concreto de 5 cm de espesor, donde se considera que el área transversal es A=1 m^2. En la Frontera x=*0* incide un flujo de calor q_s (750 W/m^2) y la Frontera x=H_x se encuentra aislada.

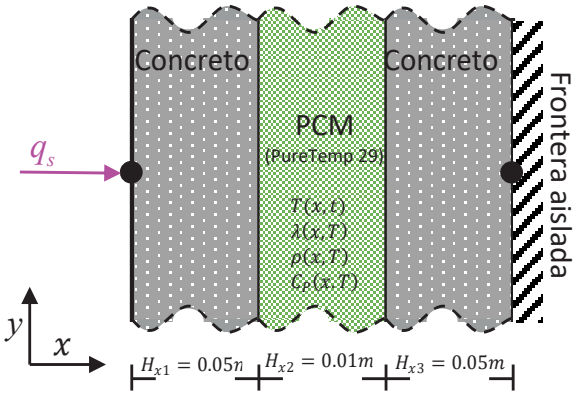


Fig. 4. Modelo físico de losa compuesta de concreto-PCM.

ISSN en trámite

Se realizó una comparación de la cantidad de energía almacenada por el sistema. La comparación se hizo mediante dos enfoques distintos: un enfoque termodinámico global y uno de transferencia de calor diferencial (código desarrollado).

Las Ecuaciones (7) y (8) proporcionan la energía almacenada desde el enfoque termodinámico y de transferencia de calor, respectivamente. La Ecuación (7) se obtiene mediante la primera ley de la termodinámica, mientras que la Ecuación (8) se determina mediante la integración en tiempo y espacio del térmico transitorio de la Ecuación (6):

$$\Delta E_{sto}^{BG} = A q_s t_f \tag{7}$$

$$\Delta E_{sto}^{dif} = A \int_0^{t_f} \int_0^{H_x} \left(\rho C \frac{\partial T}{\partial t} \right) \cdot dx dt \tag{8}$$

La Tabla 1 muestra los valores de energía almacenada en tres diferentes instantes de tiempo (3600 s, 7200 s y 10800 s). Se observa una desviación máxima de 0.24 % al tiempo de 10,800 s. Esto confirma que la solución numérica (enfoque diferencial de transferencia de calor) reproduce satisfactoriamente a la solución del enfoque termodinámico global, lo cual da certeza de la implementación del algoritmo.

Tabla 1. Energía almacenada (MJ) en el sistema.

t (s)	ΔE_{sto}^{BG}	ΔE_{sto}^{dif}	ε [%]
3600	2.70	2.70	0.00
7200	5.40	5.41	0.18
10800	8.10	8.12	0.24

Por otro lado, con el propósito de validar el modelo conductivo en una losa de concreto, se reprodujeron los datos experimentales de Chagolla-Aranda et al. (2017). Los datos experimentales corresponden a mediciones realizadas del 21 al 23 de noviembre de 2016 en la ciudad de Cuernavaca, Morelos.

Para realizar la simulación, se realizó un ajuste de funciones para la radiación solar y la temperatura ambiente. Por otro lado, debido al comportamiento variable de la velocidad del viento, sus valores fueron introducidos al código en intervalos de 1 h y fueron interpolados con una relación lineal. Posteriormente, con estas funciones, se alimentó el código numérico que resuelve el modelo conductivo en el muro, así como con los parámetros proporcionados por Chagolla-Aranda et al. (2017).

En la Figura 5 se muestra la temperatura de la superficie exterior del techo de concreto experimental y la obtenida mediante el modelo matemático. La diferencia máxima encontrada fue de 1.9 ºC, presentándose el día 22 de noviembre. Adicionalmente, se observó que el 90% de los valores calculados se acercan significativamente a las mediciones experimentales con una diferencia menor al 10% durante todo el período analizado. Por lo que se observa que el modelo se ajusta a los datos experimentales de forma satisfactoria.

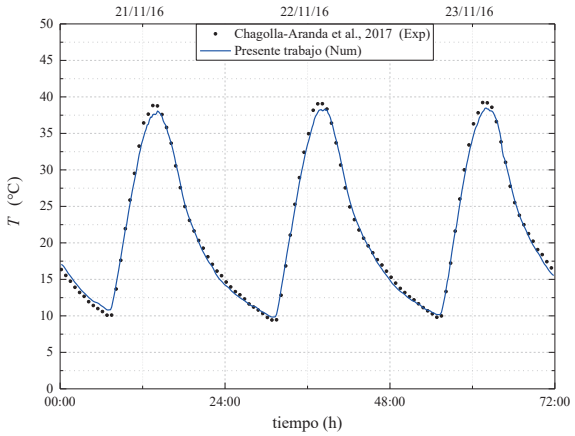


Fig. 5. Comparación de la Temperatura exterior de la losa de concreto.

4. RESULTADOS

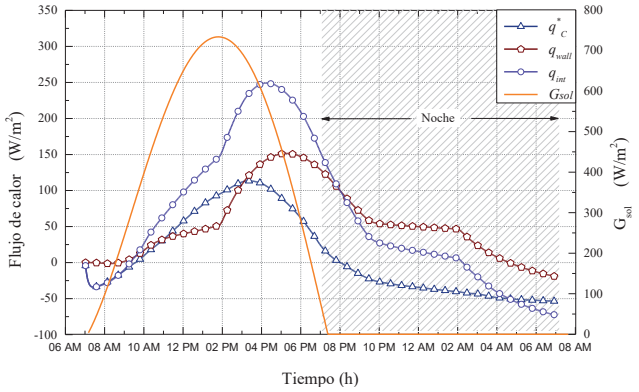
Para el estudio, se eligieron los días más fríos de cada mes de la alcaldía de Tacubaya en la Ciudad de México. Con relación a las dimensiones del PCM-TW, de acuerdo con Hernández-López (2016), las dimensiones del ancho de canal y de las ventilas que proporcionan el mejor desempeño de un TW en una habitación de 3 m de altura son L_c=20 cm, H_v=20 cm. En ese sentido, estas dimensiones fueron consideradas para el presente trabajo. El espesor del muro almacenador es de 11 cm. 1 cm corresponde al PCM el cual se encuentra entre dos losas de concreto, cada una con un espesor de 5 cm. Por otro lado, la temperatura de la habitación es constante y se estableció a un valor de 24 °C. De acuerdo con los resultados de L.F. Aparicio (2021), se eligió el PCM PureTemp 29 con punto de fusión de 29 °C. Las propiedades del material se presentan en la hoja de datos de PureTemp, (2021)

4.1 Análisis del día más frío.

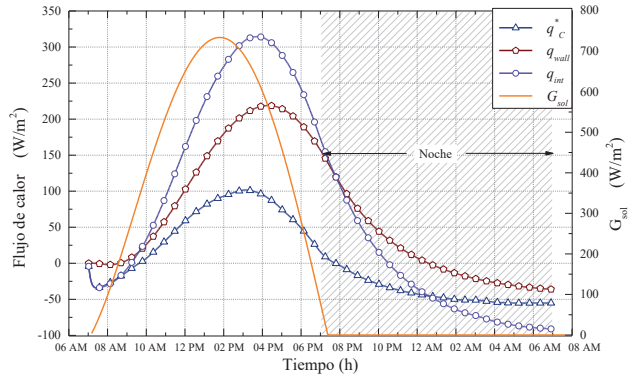
En la Figura 6 se muestran los flujos de calor q_{wall} (flujo de calor suministrado por el muro hacia la habitación), q_c*(calor util) y q_{int} (flujo de calor al interior) junto con G_{sol} (radiación solar). Se observa cómo para los dos sistemas, q_{wall} es prácticamente nulo hasta las 10:00 AM. Para ambos casos q_c* empieza con valores negativos, significando que se está extrayendo energía de la habitación. Pasando las 10:00 AM el flujo de calor pasa a ser positivo. Desde ahí el comportamiento para ambos sistemas pasa a ser prácticamente el mismo. Por otro lado, q_{wall}, exhibe diferencias notables en ambos sistemas. Primeramente, para el caso del P29-TW, es durante el periodo diurno en el cual se muestra un aumento amortiguado del flujo de calor en comparación con C-TW.

ISSN en trámite

Finalmente, q_{int} permite observar que el suministro total de calor a la habitación. En la Figura 6a se puede ver como el P29-TW suministrar calor a la edificación durante un periodo más largo en comparación con el C-TW: específicamente 3 horas y media más. Para el C-TW, se presenta un comportamiento persistente y suave a lo largo del periodo de modelación. Durante el ciclo diurno logra alcanzar valores por encima del flujo de calor obtenido por el P29-TW. Sin embargo, es por la noche momento en que se invierte este comportamiento. Una vez que el Sol se oculta, q_{int} del C-TW disminuye en una manera más acelerada que el correspondiente para P29-TW. En conclusión, el sistema P29-TW deja de suministrar energía pasadas las 2:00 AM mientras que el C-TW pierde esta capacidad cerca de las 10:30 PM.



(a)



(b)

Fig. 6 Comportamiento de los flujos de calor hacia la habitación.

4.2 Evaluación anual.

Por último, en la Figura 7 se muestra el comportamiento anual de la energía almacenada en el muro durante el ciclo diurno ($E_{sto,d}$), la energía suministrada a la edificación durante el día ($E_{int,d}$) y la energía suministrada a la edificación durante la noche ($E_{int,n}$). Comparando los resultados obtenidos para los periodos diurno y nocturno, se puede observar como en la Figura 7a, para $E_{sto,d}$, el C-TW no es capaz de almacenar más energía en este periodo para todo el año en comparación con P29-TW.Esta incapacidad se atribuye al uso del PCM y su capacidad para almacenar energía en forma de calor latente.

Ambos sistemas tienden a almacenar más energía durante el otoño e invierno, mientras que en primavera y verano ésta disminuye considerablemente. Algo similar ocurre en la Figura 7b donde se observa que la energía suministrada en periodo diurno, el P29-TW suministra una menor cantidad de energía a la edificación durante este lapso en comparación al C-TW, siendo en abril cuando se presenta la máxima diferencia (42%): 1.33 MJ/m^2 y 2.30 MJ/m^2 para P29-TW y C-TW, respectivamente. Esto se reproduce para todos los meses del año. Por lo que se puede decir que, para uso diurno, el C-TW es preferible a el P29-TW. Adicionalmente del mismo modo que para el almacenamiento de energía, para ambos sistemas éstos también presentan valores superiores de suministro diurno de energía durante los meses de otoño e invierno, mientras que los valores mínimos se presentan en verano y primavera. Finalmente como se puede ver en la Figura 7c, $E_{int,n}$ muestra valores negativos para ambos sistemas a lo largo del año. Siendo así que, durante las horas nocturnas, la edificación termino cediendo energía al muro.

Cabe destacar que para el C-TW estas pérdidas se presentan para todo el año. Sin embargo, el sistema P29-TW solamente presenta pérdidas durante los meses de abril a agosto, presentando valores positivos para el resto de los meses. Una vez más, esto indica que, durante los de otoño e invierno, el sistema P29-TW fue lo suficientemente eficiente para suministrar energía durante las horas de noche. Siendo así el sistema nocturno óptimo para brindar un mayor confort térmico en durante los meses más fríos del año en comparación del concreto.

5. CONCLUSIONES

Se evaluó el P29-TW bajo condiciones climáticas de la alcaldía de Tacubaya en la Ciudad de México. El comportamiento de este sistema se comparó con un C-TW. Con base en los resultados, puede concluirse lo siguiente:

- De acuerdo con los resultados de la evaluación térmica anual: el P29-TW almacena más energía que el C-TW durante todo el año, siendo más notable para los meses de otoño e invierno y alcanzando una máxima diferencia de hasta 95% en noviembre.

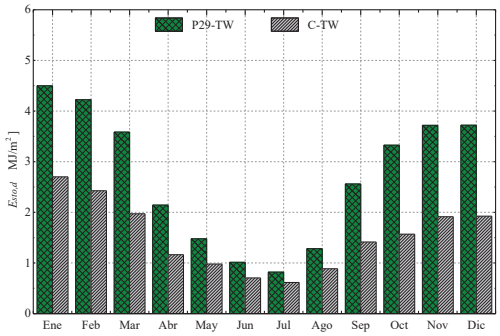
- Para periodos diurnos, el C-TW suministró más energía a la habitación comparado con el P29-TW para todo el año, presentando un máximo de 42 % en abril y un mínimo de 24 % junio.

- Durante el periodo nocturno, el P29-TW proporciona más energía que el C-TW, en especial durante los

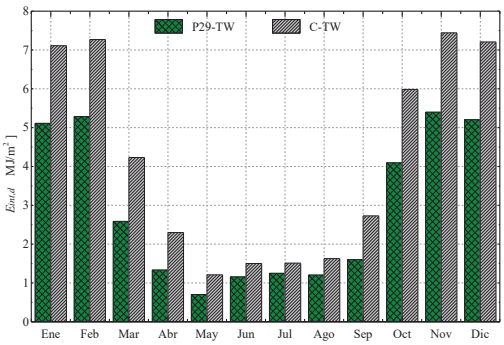
ISSN en trámite

meses de otoño e invierno y alcanzando en febrero un desempeño de hasta 35 veces mejor que el C-TW.

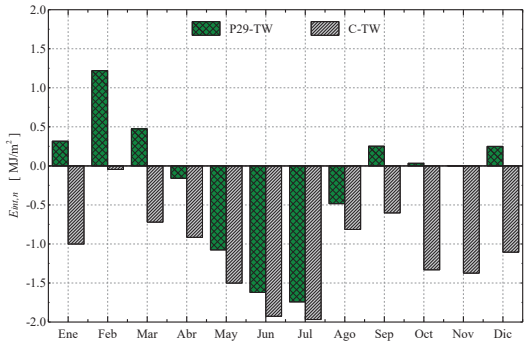
Como conclusión general, se puede afirmar que el sistema de PCM-TW tiene la capacidad para ser implementado en Tacubaya en la Ciudad de México. Finalmente, antes de incorporar un PCM al sistema de TW, debe considerarse el uso que tendrá la edificación. Si la edificación es de uso diurno como un aula de clase, el C-TW es la opción más adecuada para calefacción pasiva. Por otro lado, si la edificación tendrá un uso nocturno como un dormitorio, el P29-TW es el ideal.



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 Evaluación térmica anual de la energía (a) almacenada, (b) suministrada en el día y (c) suministrada en la noche.

6. REFERENCIAS

Aparicio, L.F. (2021). Análisis dinámico de un sistema solar pasivo de muro Trombe con un material de cambio de fase bajo condiciones climáticas de México, Tesis de maestría, Universidad de Sonora.

ASHRAE. (Standard 55-2004). Thermal environmental conditions for human occupancy approve.

Chagolla-Aranda, M.A., Simá, E., Xamán, J., Álvarez G., Hernández-Pérez, I., Téllez-Velázquez E. (2017). Effect of irrigation on the experimental thermal performance of a green roof in a semi-warm climate in Mexico. *Energy and Buildings*, 154, 232-243.

Churchill, S. y Chu, H. (1975). Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 18, 1323-1329.

Hernández-López, I., Vázquez-Beltran, E., Xáman, J., Chávez, Y., Hinijosa, J.F. (2021). Heating potencial of a trombe wall system under temperate climate conditions of Mexico: Case of Cwa-Cwb Koppen classification. *Building Engineering*, 44, 103380.

Hernández-López, I., Xamán, J., Chávez, Y., Alvarado-Juárez, R. (2016). Thermal energy storage and losses in a room-trombe wall system located in México. *Energy*, 109, 512-524.

International Energy Agency. (2019). World Energy Balance.

Incropera, F., De Witt, D. (2002). *Fundamentals of heat and mass transfer*, (5ta ed.), John Wiley, New York.

PureTemp (2021), *Hoja de datos de PureTemp:* https://puretemp.com/?p=220

Rabani, M., Kalantar, V., Faghih A.K., Rabani, M., Rabani, R. (2013). Numerical simulation of a trombe wall to predict the energy storage rate in non-sunny periods. *Heat Mass Transfer*, 49, 1395-1404.

SENER. (2019). Balance nacional de energía.

Utzinger, D., Klein, S., Mitchell, J. (1980). The effect of air rate in collector-storage wall, *Solar Energy*, 25, 511-519.

Voller, V.R., Swaminathan, C.R. (1991). General source-based method for solidification phase-change, *Numerical Heat Transfer B,* 19, 175-189.

ISSN en trámite

Evaluación numérica de las propiedades de fractura de un material de microestructura compleja

Miguel A. Rodríguez Marquez[1*]. Carlos A. Mora Santos[1]**
Orlando Susarrey Huerta[2*]. Guillermo Zarate Sampedro[2****]. Marcos Bedolla Hernandez[1*****].**

[1]Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Apizaco, Av. Instituto Tecnológico S/N. CP. 90300, Apizaco Tlaxcala, México.
[2]Grupo "Mecánica Fractal", ESIME-Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional, México, D.F. 07738, Mexico
** e-mail: m19371390@apizaco.tecnm.mx*
***e-mail: carlos.ms@apizaco.tecnm.mx*
**** osusarrey@yahoo.com*
*****e-mail: gzarates2100@alumno.ipn.mx*
******e-mail: mbedollah@gmail.com*

Resumen: En el presente trabajo se evaluó numéricamente el comportamiento de las propiedades mecánicas de fractura en un material de microestructura compleja, en específico, el módulo elástico y la resistencia tensil, para muestras con muesca inicial de longitud a_0 y desorden microestructural D, a través del Modelo de Fusibles Aleatorios. Se encontró que cuando $a_0 \rightarrow 0$, tanto el módulo elástico como la resistencia tensil, tienden a tener un comportamiento constante e independiente de a_0, mientras que cuando la muesca inicial es lo suficientemente grande, tienen un comportamiento aproximadamente lineal dependiente de a_0. Se observó que el efecto del desorden microestructural en la pendiente de la zona de comportamiento lineal de la resistencia tensil es mayor para las muestras de menor tamaño, mientras que en las muestras de mayor tamaño el efecto del desorden es mucho menor. Con base en lo anterior, se muestra, a través de ecuaciones que las propiedades en estudio quedan en función del tamaño de grieta inicial.

Palabras clave: Materiales, microestructura compleja, fractura, desorden, modelo de fusibles aleatorios.

1. INTRODUCCIÓN

El problema de la fractura de los materiales ha sido uno de los más importantes en ciencia e ingeniería de materiales (Balankin et. al., 2011), debido a que, como condición de falla, limita la capacidad de respuesta del material ante la aplicación de cargas. El interés por el estudio de este fenómeno en los materiales ha llevado al desarrollo de la *Mecánica de la Fractura*. Sin embargo, aun cuando la teoría, basada en la *Idealización de Medios Continuos* ha sido bien establecida y se ha logrado predecir con éxito su comportamiento, la caracterización de la fractura de materiales de microestructura compleja continúa presentando un reto a los investigadores debido a la presencia de desorden microestructural, el cual se sabe tiene un efecto en las propiedades de resistencia de los materiales (Salminen, 2003), tales como el módulo elástico (E) y la resistencia tensil (σ_M). El desorden en estos materiales se manifiesta a través de variaciones locales en las propiedades del material, esto es; en un material heterogéneo, diferentes partes del material presentan diferentes valores en sus propiedades, y estas diferencias dependen de las características locales de la microestructura del material. Esto causa que las propiedades macroscópicas del material no puedan obtenerse promediando las propiedades locales, debido a que el valor promedio será mayor que el valor de la misma propiedad para una zona más débil del material; sin embargo, la falla del material está dominada por los puntos del material más débiles, no por el comportamiento promedio del material.

La fractura de materiales de microestructura compleja viene precedida de una acumulación de daño en diferentes partes de la muestra, debido a la aleatoriedad de la distribución de las zonas débiles en el material, de tal manera que no siempre es posible aislar el punto más débil del material para su estudio. Para resolver este problema se realiza una muesca en el material para introducir un defecto preexistente en el material que pueda ser controlado. Cuando la longitud de la muesca a_0 es lo suficientemente grande se reduce el área efectiva incrementando el efecto del desorden intrínseco del material medido a través de la deformación local (Kettunen, 2000). Se ha demostrado que, entre menor sea la escala de observación del material, mayor será el efecto microestructural del material, por lo cual se ha se considerar un *Efecto del Tamaño* de la muestra y del defecto al estudiar estos materiales (Bažant, 2004). Se han llevado a cabo varios estudios para determinar el efecto microestructural en el comportamiento de fractura de los materiales heterogéneos en la presencia de defectos iniciales, a

ISSN en trámite

través de pruebas experimentales y numéricas (Alava, 2006; Bonamy & Bouchaud, 2011), sin embargo, aún no se ha logrado una descripción adecuada del comportamiento de los materiales de microestructura compleja en todas las escalas.

En este trabajo se estudia numéricamente el comportamiento de las propiedades de fractura de materiales de microestructura compleja, en específico, el módulo elástico (E) y la resistencia tensil (σ_M), a través del Modelo de Fusibles Aleatorios (MFA), el cual permite realizar pruebas de fractura de materiales desordenados, considerando variaciones del desorden microestructural en el material. En las pruebas numéricas, se crea una muesca inicial con la que se estudia su efecto en el comportamiento del material. El estudio se realiza en la escala meso, en la cual la fractura del material puede ser estudiada a través de la interacción de elementos que representan el comportamiento de la falla local. A partir del comportamiento meso emerge el comportamiento macro, por lo que es de interés el estudio en esta escala para encontrar el puente entre el comportamiento micro (local) y macro del material.

2. MODELO NUMÉRICO

La fractura de materiales con desorden microestructural en la escala mesoscópica ha sido ampliamente estudiada a través de modelos numéricos, los cuales brindan la ventaja de poder realizar variaciones continuas del desorden y una gran cantidad de pruebas a un bajo coste en comparación con pruebas experimentales. En el presente trabajo se emplea el modelo de fusibles aleatorios (MFA), introducido por De Arcangelis et. al. (1985), mediante el cual se explota la analogía entre la elasticidad lineal y la electricidad, esto es, el caso discreto escalar de la elasticidad lineal (Shekhawat, 2013). A través de este enfoque, es posible transformar las ecuaciones diferenciales parciales que describen la fractura de un material en un sistema de ecuaciones lineales. El comportamiento de un cuerpo elástico lineal que obedece la ley de Hooke esta dado por la ecuación vectorial:

$$(\lambda+\mu)\nabla(\nabla\cdot u)+\mu\nabla^2 u=0 \qquad (1)$$

donde u es un vector que representa los desplazamientos en el cuerpo, μ y λ con conocidos como coeficientes de Lamé. El comportamiento del MFA esta gobernado por la ecuación:

$$\nabla^2 V=0 \qquad (2)$$

La ecuación (2) corresponde al caso particular la ecuación (1) donde solo los componentes escalares son tomados en cuenta, y donde V toma el lugar de los desplazamientos u. El MFA ha sido ampliamente usado en estudios de fractura de materiales con desorden microestructural asignando un valor critico de resistencia a la falla a los elementos locales del material basando en la analogía presentada entre la ecuación (1) y (2) (Chakrabarti & Benguigui, 1997; Herrmann & Roux, 2014). El objetivo del modelo MFA es reproducir cualitativamente las características de la fractura en un material heterogéneo, manteniendo solo los dos componentes principales que caracterizan la falla de los materiales; la aleatoriedad de la microestructura del material y el acoplamiento de largo alcance (Bonamy & Bouchaud, 2011).

El modelo empleado consiste en una retícula de tamaño L_x en la dirección horizontal y L_y en la dirección vertical, donde cada elemento de la red es un fusible eléctrico. Debido a que estudios han demostrado que la influencia de la topología de la red en el comportamiento de la fractura en el modelo MFA no es significante (Alava et. al. 2006), se elige una topología cuadrada para la red, dada su simpleza y facilidad para programar. Como condiciones de frontera para el modelo empleado, una diferencia de potencial V es impuesta entre los extremos inferior y superior, mientras que se imponen condiciones periódicas constantes a los extremos verticales, esto es; no se aplica ningún voltaje externo a los nodos del extremo izquierdo ni derecho de la muestra. Para el estudio del efecto de las muescas en las propiedades de fractura de los materiales heterogéneos, se crea una muesca inicial de tamaño a_0 eliminando fusibles en el lado derecho de la retícula. Se elige $L_x=L_y-1$ de manera que la muesca realizada quede justo a la mitad del tamaño en la dirección vertical para asegurar la simetría de la muestra respecto al eje que pasa sobre la muesca cuando L_x es un numero par (Fig. 1a).

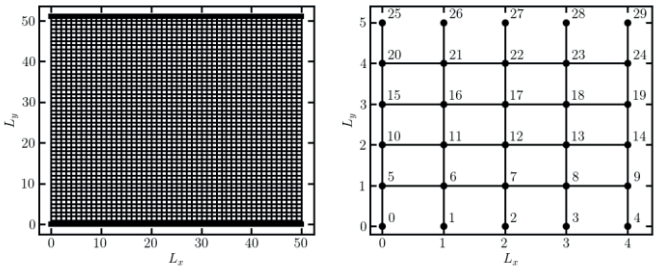


Fig. 1. Modelo de fusibles aleatorios. a) Esquema de la red de fusibles para $L_x=50$. La diferencia de voltaje se aplica en los buses inferior y superior. b) Numeración de los nodos de la red de fusibles con $L_x=4$.

A cada fusible de la red ij (que va desde el nodo i al j), donde los nodos se han numerado de izquierda a derecha y de abajo a arriba, (Fig. 1b) se le asigna una conductancia $g_{ij}=1$ y una corriente crítica t_{ij}. La heterogeneidad del material se introduce asignando a cada corriente crítica un valor aleatorio dado por la expresión:

$$t_{ij}=X^D \qquad (3)$$

en donde X es una variable aleatoria uniforme en el intervalo [0,1] y $D \in [0,1]$ es una medida del desorden, esto es, entre mayor sea D, mayor será el desorden. Las corrientes individuales i_{ij} en cada fusible se obtienen al resolver

ISSN en trámite

numéricamente las ecuaciones de Kirchhoff. El sistema de ecuaciones es resuelto con el algoritmo presentado por Nukala & Simunovic (2003). Al aplicar al nodo i la ley de corrientes de Kirchhoff, que establece que la suma de las corrientes en un nodo es igual a cero, se obtiene:

$$g_{i,i-L-1}(v_i - v_{i-L-1}) + g_{i,i-1}(v_i - v_{i-1}) - g_{i,i+1}(v_{i+1} - v_i) - g_{i,i+L+1}(v_{i+L+1} - v_i) = 0 \quad (4)$$

donde $L+1<i<(L+1)^2$, v_i es el voltaje en el nodo i y

$$g_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si existe el fusible } ij \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (5)$$

Al hacer que el voltaje en el borde inferior de la retícula sea 0 y el superior V, se obtiene que para $i \leq L_x+1$, $v_i=0$, y cuando $(L_x+1)^2 \leq i$, $v_i=V$. La corriente individual en cada elemento ij se calcula con la expresión:

$$i_{ij} = g_{ij}(v_i - v_j) \quad (6)$$

Una vez que se han calculado las corrientes en cada fusible, se calcula el valor $r_{ij}=max(i_{ij}/t_{ij})$ y se remueve permanentemente el fusible ij de la red haciendo $g_{ij}=0$. Cada vez que se elimina un fusible de la red, se recalculan todas las corrientes en los fusibles para determinar el siguiente fusible a eliminar, asumiendo una redistribución de las corrientes instantánea. Esto a su vez significa una redistribución instantánea de los esfuerzos en el material al crear una grieta en el material. La fractura se alcanza una vez que una grieta en el material crece y separa en dos partes la muestra (Fig. 2), haciendo que la conductancia total de la red sea cero, esto es, no existe flujo de corriente desde la parte superior de la red a la inferior. Debido al comportamiento lineal de las ecuaciones que describen el sistema, el único efecto de cualquier incremento del voltaje externo $V \rightarrow \xi V$ es escalar los voltajes locales por el mismo factor. Así, se puede calcular el factor ξ necesario para eliminar un elemento de la red como:

$$\xi^{-1} = r_{ij} \quad (7)$$

Se establece $V=1$, con lo que el voltaje externo al cual se eliminan los fusibles es ξ. Con esto, en lugar de realizar incrementos progresivos al voltaje externo aplicado a la red, se calculan únicamente los voltajes necesarios para eliminar fusibles hasta la fractura de la red, reduciendo el tiempo de cómputo. De acuerdo con Picallo (2010), podemos definir el esfuerzo (σ) y deformación unitaria (ε) del modelo como:

$$\sigma = I / L_x \quad (8)$$

$$\varepsilon = V / L_y \quad (9)$$

en donde I es la corriente en la red suministrada por la fuente y V el voltaje externo aplicado a la red. La validez de la analogía presentada en las ecuaciones (8) y (9) se basa en el análisis presentado para las ecuaciones (1) y (2), donde se establece la equivalencia entre los desplazamientos u y el voltaje de la red V.

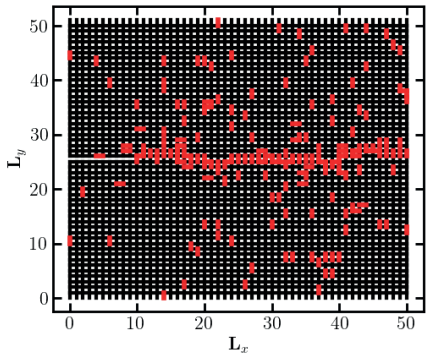


Fig. 2. Prueba de fractura de un materia desordenado con el modelo numérico (MFA), con $L_x=50, a_0=10$ y $D=0.5$. La grieta resultante se muestra en color rojo.

Las propiedades de resistencia E y σ_M se obtienen a través del diagrama esfuerzo-deformación (σ-ε) resultante, donde σ y ε se calcularon usando (6) y (7). En la Tabla 1, se muestran los valores utilizados en el presente trabajo para los diferentes tamaños de muestra (L), tamaño de muesca inicial (a_0), desorden (D), y numero de pruebas (N). Para cada combinación de los valores presentados en la Tabla 1 de a_0 y D se realizan N simulaciones (Por ejemplo, para $L_x=26$, $a_0=0$, $D=0.2$ se hicieron 1000 simulaciones). Para cada configuración se realizaron el mayor numero de simulaciones para reducir el error estadístico.

Tabla 1. Configuraciones para las pruebas numéricas

L_x	a_0	D	N
26	0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,12 14,16,18,20,22,24,25	0.2,0.5,0.8	1000
50	0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,15,20, 25,30,35,40,45,49	0.2,0.5,0.8	1000
100	0,2,4,6,8,10,12,14,16,18,20, 30,40,50,60,80,90,98	0.2,0.5	1000
		0.8	200
200	0,4,8,12,16,20,24,28,32,36,40,60, 80,100,120,140,160,180,196	0.2,0.5	200

3. RESULTADOS

3.1 Modulo Elástico

El módulo elástico es una constante elástica del material que relaciona el esfuerzo aplicado en el material con la deformación que sufre el mismo. El comportamiento del módulo elástico para las pruebas numéricas realizadas se muestra en la Fig. 3.

 ISSN en trámite

Puede observarse que, cuando $a_0/L_x<0.05$, el valor de E tiende a un valor constante e independiente de a_0, mientras que para $a_0/L_x>0.3$, se obtiene un comportamiento casi lineal del módulo elástico que depende del tamaño de la muesca inicial, esto es, $E/E_0 \sim K(a_0/L_x)$, donde K es una constante que define la pendiente de la relación entre E/E_0 y a_0/L_x, y es aproximadamente igual a -1 para todas las pruebas realizadas. Así, se tiene que el módulo elástico no depende sensiblemente del tamaño inicial de la muesca, siempre que este sea lo suficientemente pequeña en comparación con el tamaño de la muestra. Esto puede atribuirse al desorden microestructural del material, ya que, cuando el tamaño de la muesca inicial es pequeño, el incremento de la deformación local en la en la punta de la grieta no es lo suficientemente grande para que la falla se localice en la punta de la grieta, por lo que la probabilidad para que la falla del material inicie en algún otro punto del material incrementa, lo cual a su vez da lugar a que la muesca inicial no tenga un efecto significativo en las propiedades globales del material. Por otra parte, cuando el tamaño de a_0 es lo suficientemente grande, la muesca inicial domina sobre el resto de los defectos y variaciones preexistentes en el material, dando lugar a la dependencia de E respecto a a_0.

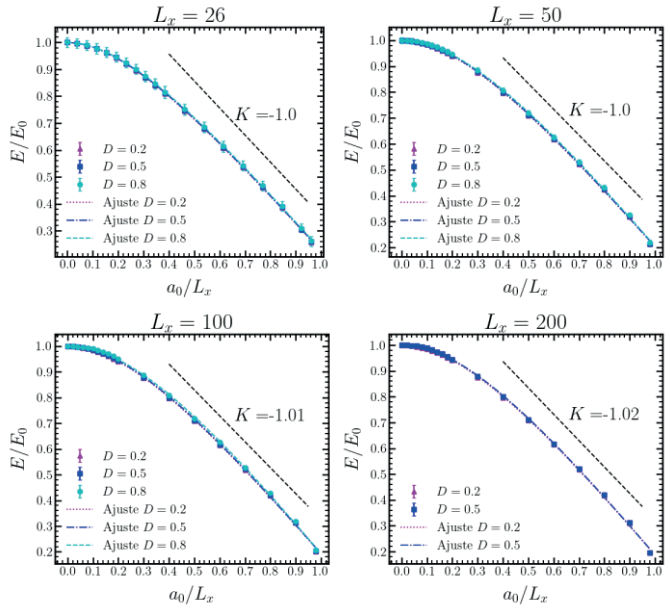


Fig. 3. Comportamiento de E respecto a a_0 para las pruebas realizadas. El ajuste de los datos fue realizado usando (11).

Al realizar el análisis sobre E respecto a los incrementos de a_0 (Fig. 4), se obtuvo que para todos los tamaños y valores de desorden microestructural considerados en el modelo, los datos obtenidos se ajustan a la expresión

$$\frac{\Delta E}{\Delta a_0} = C_0 + C_1 \exp(-m\,a_0) \qquad (10)$$

para $a_0/L<0.9$, donde C_0, C_1 y m son constantes. Aplicando la condición $E(0)=E_0$ a (10), donde E_0 es el módulo elástico para una muestra sin muesca, y sabiendo que el comportamiento del módulo elástico tiende a ser constante cuando $a_0 \to 0$, se obtiene una expresión para el comportamiento de E que depende del tamaño inicial de la muesca:

$$E = E_0(1-\alpha a_0) + \frac{\alpha}{m} E_0(1-\exp(-m\,a_0)) \qquad (11)$$

donde α es una constante. Los valores de los ajustes realizados con (11), mostrados en la Fig.3 (líneas punteadas) para las diferentes configuraciones se muestran en la Tabla 2. El comportamiento del módulo elástico respecto al tamaño inicial de la muesca obtenido en las pruebas numéricas realizadas en este trabajo también ha sido observado en pruebas experimentales en papel (Rodríguez et. al. 2021).

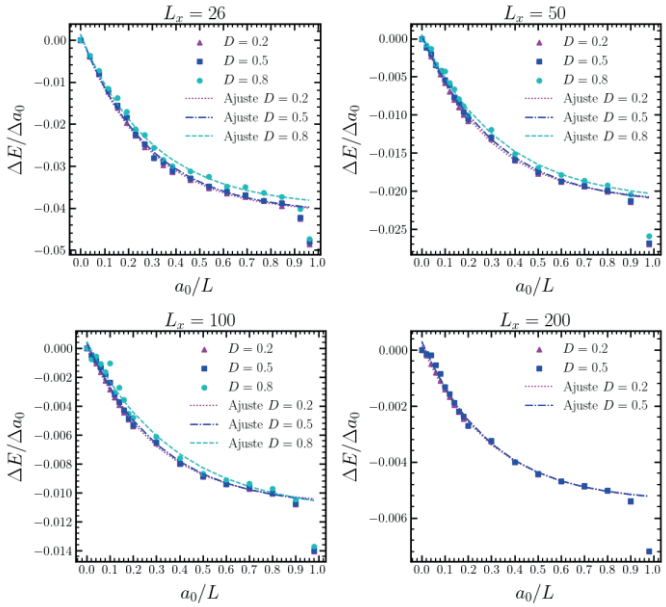


Fig. 4. Incremento de E respecto a a_0. El ajuste de los datos fue realizado usando (10).

3.2 Resistencia Tensil

Una importante medida de la resistencia de un material es la resistencia tensil, que es el esfuerzo máximo obtenido de la curva σ-ε. Con base en los resultados obtenidos de las pruebas numéricas para σ_M (Fig. 5), se observaron dos efectos. Cuando el tamaño del defecto inicial es lo suficientemente chico, σ_M es constante e independiente de a_0 que es un comportamiento claro en escala macro. Para $a_0/L_x>0.3$, se observa una dependencia de σ_M respecto al tamaño de la muesca inicial, que al igual que con el módulo elástico, tiende a ser lineal, esto es, $\sigma_M \sim M(a_0/L_x)$.

ISSN en trámite

Tabla 2. Valores obtenidos para el ajuste de los datos numéricos de *E* con (11)

L	D	E_0	m	α
26	0.2	1.037	0.139	0.041
	0.5	1.027	0.135	0.041
	0.8	0.978	0.129	0.042
50	0.2	1.019	0.065	0.023
	0.5	1.010	0.062	0.023
	0.8	0.969	0.058	0.024
100	0.2	1.010	0.031	0.012
	0.5	1.003	0.030	0.012
	0.8	0.968	0.026	0.013
200	0.2	1.005	0.015	0.006
	0.5	1.000	0.015	0.006

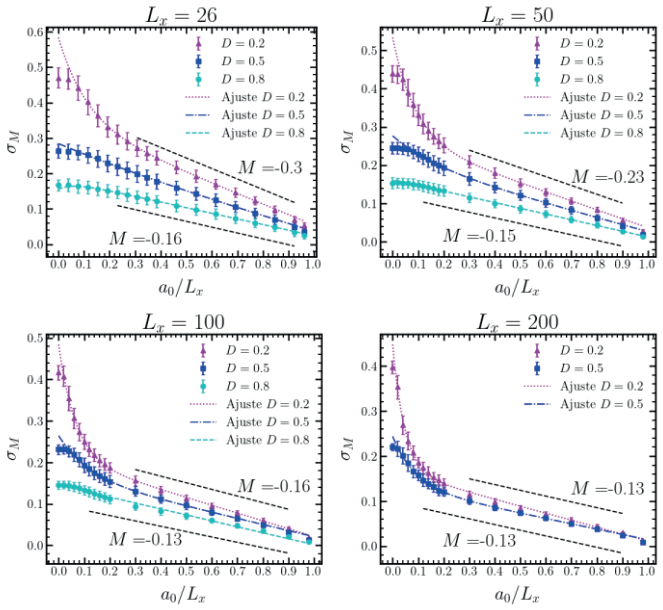


Fig. 5. Comportamiento de σ_M respecto a a_0 para las pruebas realizadas. El ajuste de los datos fue realizado usando (12).

La pendiente M que relaciona σ_M con (a_0/L_x) varía con el desorden y el tamaño de la muestra, en mucha mayor medida que la pendiente K de la zona del comportamiento lineal de E (Fig. 6). Se observa que cuando L_x es lo suficientemente grande, el valor de M depende del tamaño de la muestra, por lo que el comportamiento de la resistencia tensil depende del tamaño de la muestra, mientras que la dependencia de la resistencia tensil con el desorden microestructural tiende a ser menor cuando el tamaño de la muestra incrementa y $a_0/L_x>0.3$. Así, al igual que para el módulo elástico, la resistencia tensil no depende sensiblemente del tamaño de la muesca inicial cuando esta es lo suficientemente pequeña. Sin embargo, a diferencia del módulo elástico donde el comportamiento del E respecto a a_0/L_x es continuo, la dependencia de σ_M con a_0/L_x no es continua, ya que cuando $a_0/L_x>0.05$, existe un cambio abrupto en el comportamiento de σ_M, pasando de un valor constante a uno que depende sensiblemente del tamaño de la muesca inicial. Para valores $a_0/L_x > 0.05$ se observa que σ_M tiene un comportamiento de la forma:

$$\sigma_M = C_2(1-\beta a_0) + C_3(1-\exp(-n a_0)) \qquad (12)$$

donde C_2, C_3, β y n son constantes. Los valores de los ajustes realizados con (12), mostrados en la Fig.5 (líneas punteadas) para las diferentes configuraciones se muestran en la Tabla 3. El comportamiento constante de σ_M cuando $a_0 \to 0$ también ha sido observado pruebas numéricas y experimentales (Alava et. al. 2008).

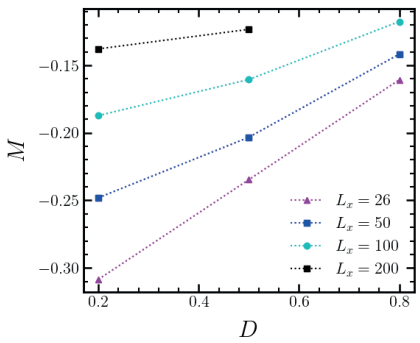


Fig. 6. Pendiente le la zona lineal del comportmaineto de σ_M respecto a a_0.

Tabla 3. Valores obtenidos para el ajuste de los datos numéricos de σ_M con (12)

L	D	C_2	C_3	n	β
26	0.2	0.584	-0.233	0.350	0.020
	0.5	0.284	-0.041	0.085	0.029
	0.8	0.156	0.028	0.677	0.039
50	0.2	0.533	-0.263	0.227	0.009
	0.5	0.276	-0.066	0.119	0.013
	0.8	0.157	0.006	2.957	0.019
100	0.2	0.484	-0.274	0.152	0.004
	0.5	0.264	-0.097	0.086	0.006
	0.8	0.145	0.000	3.030	0.010
200	0.2	0.448	-0.282	0.106	0.002
	0.5	0.244	-0.111	0.056	0.002

ISSN en trámite

El comportamiento obtenido con el modelo numérico coincide con datos experimentales de pruebas de fractura en papel impresión (Fig. 7), material de microestructura compleja que ha encontrado muchas aplicaciones como material modelo en estudios de fractura de medios desordenados (Alava & Niskanen, 2006). Los datos experimentales mostrados pertenecen al trabajo realizado por Rodríguez et. al. (2021), bajo la misma configuración geométrica que las pruebas numéricas. Los parámetros de las pruebas experimentales son L_x=*50 mm*, L_y=100 *mm*, a_0=1,5,20,40 *mm*. El ajuste mostrado en la Fig. 7 para los datos experimentales del módulo elástico y la resistencia tensil fue realizado usando las ecuaciones (11) y (12). Se observa que el comportamiento de las pruebas numéricas y experimentales coinciden, además de poder ser explicadas por las mismas ecuaciones.

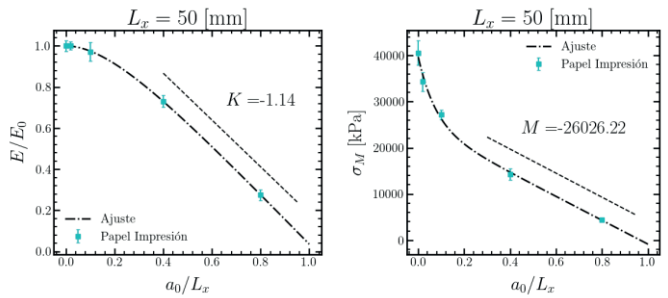


Fig. 7. Datos experimentales de pruebas de fractura de papel impresión. La linea negra punteada es el ajuste de los datos con las ecuaciones (11) y (12) respectivamente.

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se determinó el comportamiento del módulo elástico E y la resistencia tensil σ_M, a través del MFA, en la presencia de desorden y un defecto inicial a_0. Se mostró que ambas cantidades, como propiedades de la resistencia de materiales de microestructura compleja, muestran dos tipos de comportamientos: uno constante e independiente del tamaño de la muesca inicial, y otro aproximadamente lineal respecto a a_0. Esto se atribuye a la influencia del desorden microestructural, ya que cuando el tamaño de la muesca es pequeño, el área efectiva del material tiende al tamaño de la muestra, reduciendo el efecto microestructural; mientras, cuando a_0 es lo suficientemente grande, el efecto del desorden microestructural es mayor. Al reducir el área efectiva del material, hay un cambio de escala en la cual el desorden se hace presente, afectando el comportamiento de fractura del material. Este efecto depende del desorden D y del tamaño de la muestra L_x, lo que se muestra a través de la pendiente M (Fig. 6). Se observa que el comportamiento de las pruebas numéricas coincide con el comportamiento para pruebas experimentales hechas en papel impresión, el cual es un material de microestructura compleja con espesor despreciable. El comportamiento constante en el material esta dado por el número de los elementos de la red eliminados para la muesca, y en el papel impresión, por el número de fibras y enlaces interfibra rotos que dan lugar a la musca inicial. Finalmente se observa que la resistencia tensil es más sensible al desorden y al tamaño de la muestra que el módulo elástico.

REFERENCIAS

Alava, M., & Niskanen, K. (2006). The physics of paper. *Reports on progress in physics*, 69(3), 669.

Alava, M. J., Nukala, P. K., & Zapperi, S. (2006). Statistical models of fracture. *Advances in Physics*, 55(3-4), 349-476.

Alava, M. J., Nukala, P. K., & Zapperi, S. (2008). Role of disorder in the size scaling of material strength. *Physical review letters*, 100(5), 055502.

Balankin, A. S., Susarrey, O., Santos, C. A. M., Patino, J., Yoguez, A., & García, E. I. (2011). Stress concentration and size effect in fracture of notched heterogeneous material. *Physical Review E*, 83(1), 015101.

Bažant, Z. P. (2004). Scaling theory for quasibrittle structural failure. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(37), 13400-13407.

Bonamy, D., & Bouchaud, E. (2011). Failure of heterogeneous materials: A dynamic phase transition?. *Physics Reports*, 498(1), 1-44.

Chakrabarti, B. K., & Benguigui, L. G. (1997). *Statistical physics of fracture and breakdown in disordered systems* (No. 55). Oxford University Press.

De Arcangelis, L., Redner, S., & Herrmann, H. J. (1985). A random fuse model for breaking processes. *Journal de Physique Lettres*, 46(13), 585-590.

Herrmann, H. J., & Roux, S. (Eds.). (2014). *Statistical models for the fracture of disordered media*. Elsevier.

Kettunen, H., & Niskanen, K. (2000). Microscopic damage in paper. Part I: Method of analysis. *Journal of pulp and paper science*, 26(1), 35-40.

Nukala, P. K. V., & Simunovic, S. (2003). An efficient algorithm for simulating fracture using large fuse networks. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 36(45), 11403.

Picallo González, C. B. (2011). A mesoscopic study of plasticity and fracture in disordered materials.

Rodriguez, M., Mora, C., Mollinedo, R., Diaz, J., & Hernández, J. (2021). Characterization of the crack propagation in a microstructurally random material. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 130, 123-131.

Salminen, L. (2003). Aspects of fracture processes in paper. Helsinki University of Technology.

Shekhawat, A. (2013). Fracture in Disordered Brittle Media. *Cornell University*.

ISSN en trámite

Alternativas de climatización para edificios no-residenciales en climas cálidos de México

Jessica Gabriela Sánchez-Montes *. José Jassón Flores-Prieto *

**Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Cuernavaca, Morelos, México, C.P 62490*
(Tel: 777-349-58-03; e-mail: d19ce009@cenidet.tecnm.mx).

Resumen: En este trabajo se presenta un estudio de las cargas de enfriamiento en edificaciones no-residenciales, utilizando cinco alternativas de climatización en ciudades con clima cálido y con alta demanda de aire acondicionado en México, sin comprometer el confort térmico. La edificación simulada corresponde a la establecida en la NOM-008-ENER-2001 referente a edificios no-residenciales, considerando las ciudades de Villahermosa (clima tropical monzón, *Am*), Hermosillo (clima cálido muy seco, *Bwh*), Acapulco (clima tropical, *Aw*) y Monterrey (cálido seco, *Bsh*). La reducción de la carga de enfriamiento se determina con un comparativo térmico, tomando como referencia la edificación climatizada convencionalmente en el contexto de la norma NOM-008-ENER-2001. El comparativo considera las cargas de enfriamiento con simulación en TRNSYS, al utilizar climatización con el enfoque adaptativo, techos/paredes con alta reflectancia solar, número de ventanas considerando la orientación, proporción ventana pared del 20%, y ventanas con bajo coeficiente de ganancia de calor solar (*SHGC*). En el comparativo, el ahorro de las cargas térmicas estimado fue de 175.41 kWh/m^2-*año* para Acapulco, 165.21 kWh/m^2-*año* para Villahermosa, 153.94 kWh/m^2-*año* para Hermosillo; y 124.78 kWh/m^2-*año* para Monterrey. La alternativa de climatización evaluadas por separado, utilizando ventanas *low-SHGC*, presentó el mayor ahorro de cargas de enfriamiento llegando a ser de 92.44 kWh/m^2-*año,* seguido del modelo de confort térmico adaptativo con un ahorro de 61.86 kWh/m^2-*año* para el caso de Acapulco.

Palabras clave: Ahorro de energía, alternativas de climatización, modelo de confort térmico adaptativo, carga térmica de enfriamiento, edificio no-residencial, alta reflectancia solar, ventanas low-SHGC.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, se estima que en promedio las edificaciones consumen más del 30% de la demanda de energía en todo el mundo (Pérez-Fargallo *et al*., 2018). El diseño de edificios con mínimo consumo de energía convencional ha venido surgiendo como una estrategia en la búsqueda de nuevas alternativas para mitigar el cambio climático, ya que en general, las personas pasan más del 80% de su tiempo dentro de una edificación (Karyono *et al*., 2020; López-Pérez *et al*., 2021). Así, el concepto de edificaciones cero energías ya no se perciben más como un concepto de futuro, ahora se percibe como una solución para la mitigación del calentamiento global, que implica reducir las emisiones de CO_2 utilizando energías renovables (Marszal *et al*., 2011).

El consumo de energía en edificios en México, con aire acondicionado, varía dependiendo el tipo de clima y los consumos más altos corresponden a los climas cálidos y húmedos de acuerdo con datos publicados por Calixto-Aguirre & Huelsz-Lesbros, 2018. Además, mencionan que, el promedio del consumo de energía por unidad de área para un clima cálido seco es de 95 kWh/m^2, para un clima cálido húmedo de 93 kWh/m^2, para un clima cálido semi-húmedo 84 kWh/m^2 y para un clima cálido seco extremoso es de 121 kWh/m^2. El diseño de edificios climatizados depende del clima, el espacio disponible y el rendimiento de las alternativas utilizadas (Bhamare *et al*., 2019). Las alternativas de climatización permiten mitigar el consumo de energía y ayudan a mejorar el ambiente térmico en el interior (Oropeza-Perez, 2019; Yang *et al*., 2020). La integración de dos o más alternativas ayudan a mantener temperaturas más bajas en el interior y poder alcanzar la mejora del confort térmico (Ran & Tang, 2018). Algunas de las alternativas usadas para climatizar edificaciones son la orientación óptima del edificio, reflectancia solar, el nivel de aislamiento térmico, acristalamiento, la masa térmica, ventilación nocturna, y aislamiento de paredes (Eshraghi *et al*., 2014; Hsieh *et al*., 2018; Perlova *et al*., 2015). Las alternativas de climatización, en edificios con aire acondicionado, contribuyen al mejoramiento de las condiciones de confort térmico en interiores y a la reducción en la carga de energía, logrando ahorros de 10-27% (Synnefa *et al*., 2007)

Actualmente, la importancia del ahorro de energía ha dado lugar a edificaciones con bajo consumo energético para la climatización. Sin embargo, el potencial de reducción de cargas térmicas de algunas alternativas aún es incierto, y más en climas cálidos. Con lo anterior, en este trabajo se presenta un estudio del potencial de reducción de cargas de enfriamiento utilizando alternativas de climatización en edificaciones no-

ISSN en trámite

residenciales, mejorando simultáneamente el ahorro de energía sin afectar el nivel de confort térmico. El estudio se aplica a una edificación en cuatro ciudades con climas cálidos, que se consideran con alto consumo de aire acondicionado en México.

2. DESCRIPCIÓN DE CASO DE ESTUDIO

Los climas cálidos predominantes en México son los secos, muy secos y subhúmedos; donde respectivamente resaltan por su consumo de energía en la climatización. Las ciudades con climas cálidos que presentan un alto consumo de energía son; Acapulco, Villahermosa, Hermosillo y Monterrey por ser ciudades con temperaturas que pueden alcanzar hasta los 40 ^{o}C.

La ciudad de Acapulco se ubica al sur del estado de Guerrero con un clima tropical sabana (*Aw*), considerada un destino playa a nivel turístico de los más importantes de México. Villahermosa cuenta con un clima tropical monzón (*Am*) considerada como una de las ciudades con mayor humedad relativa y actividad económica de México. Hermosillo se ubica al norte del país con un clima cálido desértico (*BWh*) y se considera una de las ciudades más cálidas del mundo. Monterrey está ubicada al norte del país con un clima cálido semiárido (*BSh*) considerada dentro de las tres ciudades con mayor crecimiento en México y Latinoamérica. En la Fig. 1 se muestra el mapa de la República mexicana resaltando los estados de las ciudades consideradas en el estudio.

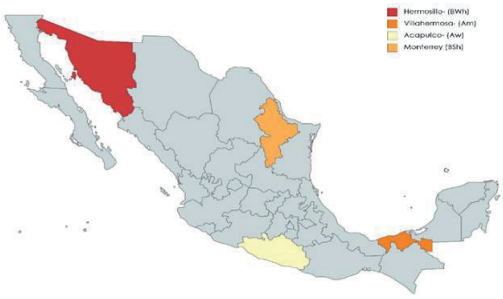


Fig. 1. Mapa de la República mexicana resaltando los estados de las ciudades consideradas para el estudio.

En la Fig. 2 se muestra en promedios mensuales la temperatura ambiente y humedad relativa de Acapulco (*ACP*), Villahermosa (*VSA*), Hermosillo (*HMO*) y Monterrey (*MTY*). La información climática de las ciudades se obtuvo de la base de datos de Meteonorm V7.1. Es de observar que, Acapulco, Villahermosa, y Monterrey presentan una humedad relativa (*RH*) por arriba de 50%, mientras que Hermosillo presenta una *RH* menor al 30%. Villahermosa y Acapulco presentan altas temperaturas teniendo temperaturas similares en todos los meses del año. Monterrey presenta altas temperaturas de mayo a septiembre con un descenso en invierno. En el caso de Hermosillo presenta las temperaturas más altas los meses de julio a septiembre, mientras que en la temporada de invierno hay un descenso significativo al igual que Monterrey.

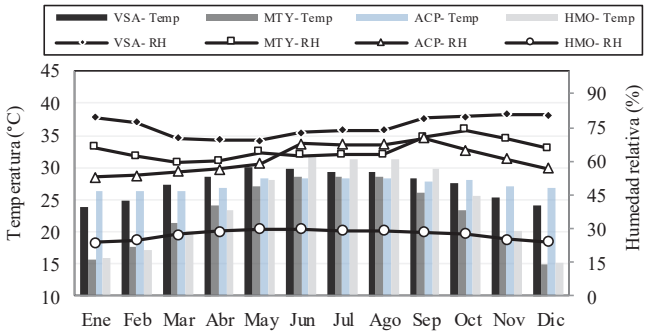


Fig. 2. Temperatura media y humedad relativa en promedios mensuales de las ciudades consideradas.

La edificación se definió en concordancia con el estándar mexicano para edificios no-residenciales NOM-008-ENER-2001 y de acuerdo a lo descrito por Álvarez-García *et al*, 2014. En la Fig. 3 se muestra esquemáticamente la edificación utilizada para el caso de estudio que satisface lo establecido en la norma. La superficie de cada piso es de 625 m^2, cuenta con 25 m de cada lado y una proporción ventana-pared del 40%. El sistema de climatización funciona durante las horas de ocupación de 08:00 a 22:00 horas de lunes a viernes. La temperatura operativa de referencia (*Set point*) es de 25 ^{o}C y la reflectancia solar de las paredes exteriores y el techo es de 0.25.

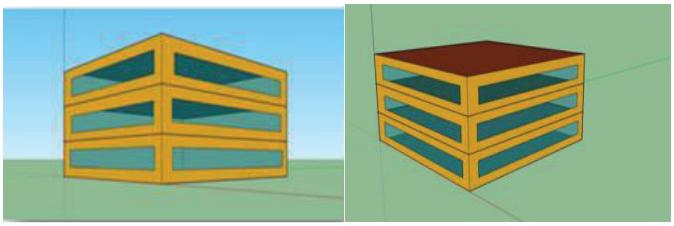


Fig. 3. Edificio no-residencial.

En la Tabla 1 se muestran los materiales de construcción y sus propiedades termofísicas. En el edificio de referencia, las paredes se consideran principalmente de tabique rojo, el techo de hormigón con recubrimiento impermeable en el exterior, los pisos de losa de hormigón con terminados de azulejo y las ventanas de marco de aluminio con vidrios claro de 4 *mm* (Álvarez-García *et al*, 2014).

Tabla 1. Propiedades de la envolvente.

Elementos de la construcción	Nombre del material	Espesor (m)	Conductividad térmica ($kJ/h{\cdot}m{\cdot}K$)	Densidad (kg/m^3)	Calor específico ($kJ/kg{\cdot}K$)
Muros	Mortero	0.015	2.5956	1890	0.837
	Ladrillo	0.140	2.9304	1600	0.8
	Yeso	0.015	1.3500	800	1
Techo	Impermeabilizante	0.02	0.612	1127	0.8
	Concreto	0.1	6.264	2300	0.84
	Yeso	0.015	1.35	800	1
Piso planta baja	Concreto	0.1	6.264	2300	0.84
	Loseta	0.01	4.0896	2600	0.795
	Yeso	0.015	1.35	800	1
Piso planta alta	Concreto	0.1	6.264	2300	0.84
	Loseta	0.01	4.0896	2600	0.795

ISSN en trámite

3. METODOLOGÍA

El comparativo se realiza mediante simulación de las cargas térmicas de enfriamiento, considerando el caso de referencia climatizado convencional con lo reportado por Álvarez-García *et al*., 2014 y la integración de las alternativas de climatización. En la Tabla 2 se presentan las condiciones del caso de referencia y las alternativas de climatización consideradas. La metodología de estudio se toma en cuenta con lo descrito por Sánchez-Montes & Flores-Prieto, 2021.

Tabla 2. Consideraciones utilizadas en el comparativo.

Parámetros	Climatizado convencional	Climatizado con alternativas
Temperatura operativa	25ºC	Modelo Guía A CIBSE
Reflectancia solar en techo/paredes	0.25	0.80
Tipo de ventanas	Vidrio claro	Vidrio doble low-SHGC
Proporción ventana/pared	40%	20%
Número de ventanas	4	2

3.1 Plataforma de simulación

La simulación computacional de las cargas de enfriamiento se realizó en el software TRNSYS para un edificio no-residencial. El software calcula la carga térmica de enfriamiento utilizando la información climática y las propiedades termofísicas de la edificación. El software trabaja mediante modelos basados en balances de energía. Las simulaciones se realizan en estado transitorio por medio de componentes que modelan el sistema, los cuales se conectan de manera gráfica en el interfaz visual *simulation studio*. En la Tabla 3 se presentan los types utilizado en la plataforma de simulación con su respectiva descripción. El modelado del comportamiento térmico del edificio se realiza con el type 56, para utilizarlo se ejecuta un programa de procesamiento independiente TRNBuild, el cual lee y procesa un archivo que contiene la descripción del edificio.

Tabla 3. Descripción de los types utilizados en la plataforma.

Type	Descripción
Type 109-TMY2	Lector de datos meteorológicos
Type33	Cálculo de la temperatura del bulbo seco y humedad relativa
Type69b	Cálculo de la temperatura efectiva del cielo
Type56a	Modela el comportamiento térmico del edificio
Type 9c	Ingresa base de datos en formato Excel
Type25a	Genera un archivo de salida en formato Excel
Type24	Integra datos durante un periodo de tiempo

En la simulación, los parámetros de entrada son las propiedades termofísicas de la envolvente, los parámetros meteorológicos y las alternativas de climatización. En la Fig. 4 se presenta de manera gráfica la plataforma de simulación con los types que la componen.

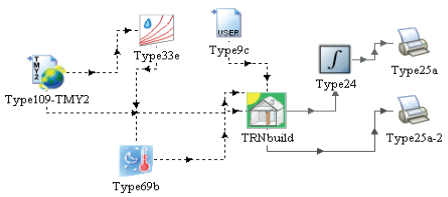


Fig. 4. Plataforma de simulación.

3.2 Verificación de la plataforma de simulación

La plataforma de simulación se verifica comparando la carga térmica de enfriamiento con los datos reportados por Álvarez-García *et al*., 2014. En la Fig.5 se presenta el comparativo variando la reflectancia solar de 0.2-0.9, con incrementos de 0.1, para el caso de Hermosillo. La plataforma, en la carga térmica de enfriamiento, presentó una desviación mínima de 0.046% para la reflectancia solar de 0.7, una desviación máxima de 2.24% para la reflectancia solar de 0.3 y una desviación promedio de 0.97%.

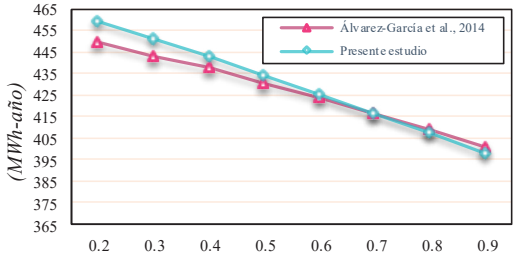


Fig. 5. Comparativo de las cargas térmicas variando la reflectancia solar de 0.2-0.9 para Hermosillo.

El comparativo identifica la reducción de la carga térmica de enfriamiento y permite priorizar la sensibilidad de cada alternativa propuesta. Los resultados se expresan en términos de unidad de área (kWh/m^2-*año*). A continuación, el uso de las alternativas de climatización propuestas se describe.

Enfoque adaptativo

El modelo de confort térmico que se utiliza como alternativa de climatización es el propuesto en la Guía A de CIBSE bajo el concepto adaptativo, el cual se presenta en la Ec.1.

$$T_{conf} = 0.09 \cdot T_{rm} + 22.6 \qquad (1)$$

donde T_{conf} es la temperatura de confort y T_{rm} es la temperatura radiante media que se calcula con la Ec. 2.

$$T_{rm(hoy)} = (\alpha) \cdot T_{rm(ayer)} + (1-\alpha) \cdot T_m \qquad (2)$$

donde $T_{rm(hoy)}$ y $T_{rm(ayer)}$ representan la temperatura media de corriente libre para el día de hoy y ayer en grados Celsius, respectivamente, T_m es la temperatura media exterior del día, las cuales se obtienen de la base de datos de Meteonorm, α es una constante en el rango (0,1), donde el valor recomendado es 0.8 (López-Pérez *et al*., 2019). Para el comparativo se considera como referencia una temperatura operativa de 25 ℃ de acuerdo a la NOM-008-ENER-2001 (Álvarez-García *et al*, 2014).

Reflectancia solar

En el comparativo, la reflectancia solar se considera de 0.25, de acuerdo a lo reportado por Álvarez-Garcia *et al*, 2014 y de 0.8 como alternativa de climatización. La alta reflectancia solar (ρ) coadyuva a que los materiales reflejan la radiación solar, permitiendo reducir la demanda térmica de enfriamiento en edificaciones.

ISSN en trámite

Tipo de ventanas

Para el comparativo de las cargas de enfriamiento, el tipo de ventana del caso de referencia (V_r) se considera de vidrio claro de 4 *mm* (Álvarez-García *et al*, 2014) y como alternativa (V_a) de climatización se utiliza una ventana *low-SHGC* tomada de la librería de TRNSYS. En la Tabla 4 se presentan las propiedades térmicas de las ventanas V_r y V_a. El factor-U o coeficiente de transferencia de calor indica la capacidad que tiene una ventana para bloquear los flujos de calor. El *SHGC* o coeficiente de ganancia de calor solar indica la cantidad de calor que puede ingresar a través de la ventana. Para climas cálidos es importante considerar un vidrio con bajo *SHGC*. Además, para utilizar el tipo de ventanas es importante considerar el costo y la disponibilidad de la ventana en el mercado.

Tabla 4. Propiedades térmicas de las ventanas.

Ventana	Acristalamiento	Composición (*mm*)	Factor-U (W/m^2K)	SHGC
V_r	1 vidrio claro	4	5.95	0.75
V_a	Doble Low- SHGC, Ar, gold	6/16/6	1.26	0.21

Número de ventanas

El caso de referencia de acuerdo con Álvarez-García *et al*, 2014 considera cuatro ventanas en todas las paredes de los tres pisos. Para el comparativo de las cargas de enfriamiento, se considerarán dos ventanas por cada piso ubicadas al norte y al sur de la envolvente. La distribución de las ventanas se presenta en la Tabla 5, la palabra *si* es para referenciar el uso de ventanas y s/v para considerar sin ventana en la pared.

Tabla 5. Distribución de las ventanas en la pared.

Pisos	Ventana	Caso de referencia	Alternativa de climatización
1,2,3	$V_{1\text{-sur}}$	Si	Si
	$V_{2\text{-norte}}$	Si	Si
	$V_{2\text{-este}}$	Si	s/v
	$V_{2\text{-oeste}}$	Si	s/v

Proporción ventana/pared

La edificación de estudio cuenta con cuatro paredes exteriores, el área de cada una es de 100 m^2. Para el comparativo de las cargas de enfriamiento se utiliza como referencia el caso de referencia con la proporción ventana/pared (*WWR*) del 40% de acuerdo con Álvarez-García *et al*, 2014, como alternativa de climatización se utiliza un *WWR* del 20%. En la Tabla 6 se presenta la *WWR* y el área de acristalamiento, en este caso al ser una pared de 100 m^2 el *WWR* de 40% presenta un área de acristalamiento de 40 m^2.

Tabla 6. Proporción ventana/pared y área de acristalamiento.

WWR (%)	Área de acristalamiento (m^2)
40	40
20	20

4. RESULTADOS

En la Fig. 6 se presenta el ahorro en la carga de enfriamiento en *kWh/m²-año* aplicando las alternativas de climatización por separado, para las cuatro ciudades consideradas en el estudio. El tipo de ventana *low-SHGC* presenta los mayores ahorros para las cuatro ciudades consideradas, en el caso de Acapulco, el ahorro llega a ser de 92.44 *kWh/m²-año*. El cumplimiento del modelo adaptativo de climatización propuesto por la Guía A de CIBSE es la segunda alternativa con mayores ahorros en la carga de enfriamiento, llegando a ser de 61.86 *kWh/m²-año* para el caso de Acapulco, mientras que, para Monterrey es de 40.30 *kWh/m²-año*. Es de observar que, el número de ventanas en las cuatro paredes de los tres pisos, con vidrio claro, tiene un impacto significativo en la carga de enfriamiento. Cuando se redujeron de cuatro a dos ventanas de vidrio claro en los tres pisos, el ahorro en la carga térmica de enfriamiento fue de 53-57 *kWh/m²-año* para Acapulco, Villahermosa y Hermosillo. La alternativa de *WWR* presentó ahorros de 48.66 *kWh/m²-año* para Acapulco, de alrededor de 45.37 *kWh/m²-año* para Villahermosa y Hermosillo, para Monterrey los ahorros fueron de 35.46 *kWh/m²-año*. La reflectancia solar como alternativa de climatización presentó los menores ahorros, los cuales estuvieron alrededor de 21-26 *kWh/m²-año* para todas las ciudades consideradas en el estudio.

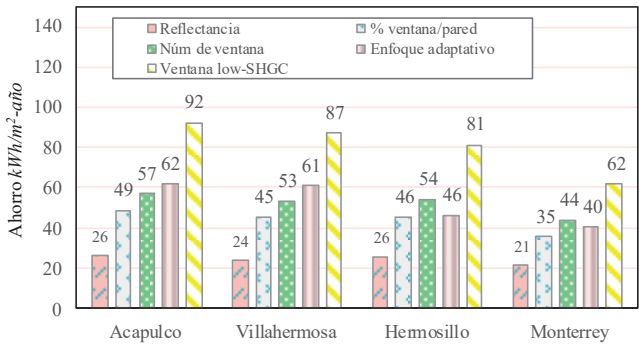


Fig. 6. Ahorro en la carga de enfriamiento por alternativa en las ciudades consideradas en el estudio.

En la Tabla 7 se presenta el comparativo térmico de la edificación convencional y la climatizada con las alternativas, los resultados son obtenidos al aplicar las alternativas en conjunto. El caso de referencia de Acapulco presenta una carga de enfriamiento de 281.51 *kWh/m²-año*, mientras que, el caso con alternativas presenta una carga de 106.10 *kWh/m²-año,* lo que indica que se generan ahorros anuales de hasta el 62% en la carga de enfriamiento. Villahermosa con el caso de referencia presenta una carga de 272.40 *kWh/m²-año* y con las alternativas la carga es de 107.19 *kWh/m²-año,* lo que representa ahorros de hasta el 60% en la carga de enfriamiento anual. Hermosillo para el caso de referencia presenta una carga de 242.87 *kWh/m²-año* y con las alternativas de 88.93 *kWh/m²-año*, lo que permite lograr ahorros de hasta el 63.4%. Por último, Monterrey con el caso de referencia presenta una carga de 198.16 *kWh/m²-año* y

ISSN en trámite

con las alternativas llega a ser de 73.38 *kWh/m²-año,* generando ahorros anuales del 63% en la carga de enfriamiento.

Tabla 7. Comparativo térmico de la edificación convencional y la climatizada con alternativas.

Ciudades	*KWh/m²-año* Climatizado convencional	Climatizado con alternativas
Acapulco	281.51	106.10
Villahermosa	272.40	107.19
Hermosillo	242.87	88.93
Monterrey	198.16	73.38

5. CONCLUSIONES

Las cargas de enfriamiento, de una edificación climatizada convencionalmente y aplicando alternativas de climatización, se estudiaron comparativamente. Las alternativas propuestas al evaluarlas por separado presentaron ahorros energéticos significativos para la edificación. Las ventanas *low-SHGC* mostraron los mayores ahorros en la carga de enfriamiento de 62-92 *kWh/m²-año*. Climatizar con el enfoque adaptativo generó ahorros en la carga de enfriamiento de 40-62 *kWh/m²-año* sin comprometer el confort de los ocupantes. Considerar el número de ventanas es importante, ya que, utilizar dos ventanas al norte y sur, en vez de cuatro en todas direcciones, presentan ahorros de 44-57 *kWh/m²-año*. La orientación de las ventanas al norte-sur se tomó en cuenta considerando la orientación óptima para México. La *WWR* del 20% en comparación con una de 40% presentó ahorros de 35-49 *kWh/m²-año*. También, la reflectancia solar en techos y paredes ayudó a disminuir la carga de enfriamiento y mostró ahorros para todas las ciudades de 39-48 *kWh/m²-año*. La integración de las alternativas permite ahorros significativos, para el caso de Acapulco que llegan a ser de 175.41 *kWh/m²-año* representando el 62% de la carga total anual. Para Villahermosa los ahorros fueron de 309.77 *kWh/m²-año* lo que representa el 60% de la carga total anual. Hermosillo presentó ahorros de 288.64 *kWh/m²-año* representando el 63% de la carga de enfriamiento total anual. Así mismo, Monterrey presentó potenciales ahorros de 124.78 *kWh/m²-año* con el 63% del total anual. Con lo anterior se observa que, el uso de alternativas de climatización y los modelos adaptativos ayudan a eficientar el uso de la energía y generar ahorros en la climatización. Como recomendaciones y puntos importantes que se pueden considerar como área de mejora son las siguiente:

a) Considerar la ventilación natural como una alternativa importante, no solo para el ahorro energético, si no, como estrategia para la renovación del aire, ya que hoy en día es importante evitar espacios cerrados.

b) Es importante considerar que aplicar las alternativas de climatización o bien el diseño bioclimático puede ser funcional en un clima y no así en otro, ya que depende de la interacción con su entorno.

c) Para considerar las alternativas de climatización es importante evaluar el costo y la disponibilidad en el mercado.

REFERENCIAS

Bhamare, D. K., Rathod, M. K., & Banerjee, J. (2019). Passive cooling techniques for building and their applicability in different climatic zones—The state of art. *Energy and Buildings*, *198*, 467–490. https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2019.06.023

Calixto-Aguirre, V. I., & Huelsz-Lesbros, G. (2018). Consumo de energía en edificios en México. *Legado de Arquitectura y Diseño*, *13*(24), 40–47. https://www.redalyc.org/jatsRepo/4779/477957975006/html/index.html

Eshraghi, J., Narjabadifam, N., Mirkhani, N., Sadoughi Khosroshahi, S., & Ashjaee, M. (2014). A comprehensive feasibility study of applying solar energy to design a zero energy building for a typical home in Tehran. *Energy and Buildings*, *72*, 329–339. https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2014.01.001

G. Álvarez-Garcia. B. Shah, F. Rubin, H. Gilbert, G. Domínguez, K. S. (2014). *Evaluación del impacto del uso de "CoolRoof" en el ahorro de energía en edificaciones no---residenciales y residenciales en México*. https://www.coolrooftoolkit.org/wp-content/uploads/2014/05/Informe-Cool-Roofs-CONUEE-Mayo-22-2014-Español.pdf

Hsieh, C. M., Li, J. J., Zhang, L., & Schwegler, B. (2018). Effects of tree shading and transpiration on building cooling energy use. *Energy and Buildings*, *159*, 382–397. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.045

Karyono, K., Abdullah, B. M., Cotgrave, A. J., & Bras, A. (2020). The adaptive thermal comfort review from the 1920s, the present, and the future. *Developments in the Built Environment*, *4*, 100032. https://doi.org/10.1016/J.DIBE.2020.100032

López-Pérez, L. A., Flores-Prieto, J. ., & Ríos-Rojas, C. (2021). Comfort temperature prediction according to an adaptive approach for educational buildings in tropical climate using artificial neural networks. *Energy and Buildings*, *251*, 111328. https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2021.111328

López-Pérez, L. A., Flores-Prieto, J. J., & Ríos-Rojas, C. (2019). Adaptive thermal comfort model for educational buildings in a hot-humid climate. *Building and Environment*, *150*, 181–194. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.12.011

Marszal, A. J., Heiselberg, P., Bourrelle, J. S., Musall, E., Voss, K., Sartori, I., & Napolitano, A. (2011). Zero Energy

ISSN en trámite

Building – A review of definitions and calculation methodologies. *Energy and Buildings*, *43*(4), 971–979. https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2010.12.022

Oropeza-Perez, I. (2019). The influence of an integrated driving on the performance of different passive heating and cooling methods for buildings. *Buildings*, *9*(11). https://doi.org/10.3390/buildings9110224

Pérez-Fargallo, A., Pulido-Arcas, J. A., Rubio-Bellido, C., Trebilcock, M., Piderit, B., & Attia, S. (2018). Development of a new adaptive comfort model for low income housing in the central-south of chile. *Energy and Buildings*, *178*, 94–106. https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2018.08.030

Perlova, E., Platonova, M., Gorshkov, A., & Rakova, X. (2015). Concept Project of Zero Energy Building. *Procedia Engineering*, *100*(January), 1505–1514. https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2015.01.522

Ran, J., & Tang, M. (2018). Passive cooling of the green roofs combined with night-time ventilation and walls insulation in hot and humid regions. *Sustainable Cities and Society*, *38*, 466–475. https://doi.org/10.1016/J.SCS.2018.01.027

Sánchez-Montes, J. G., & Flores-Prieto, J. . (2021). *Diseño de una habitación climatizada con cero energías convencionales, considerando el enfoque adaptativo*. Tesis de Maestría, CENIDET TecNM.

Synnefa, A., Santamouris, M., & Akbari, H. (2007). Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions. *Energy and Buildings*, *39*(11), 1167–1174. https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2007.01.004

Yang, L., Fu, R., He, W., He, Q., & Liu, Y. (2020). Adaptive thermal comfort and climate responsive building design strategies in dry–hot and dry–cold areas: Case study in Turpan, China. *Energy and Buildings*, *209*, 109678. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109678

ISSN en trámite

Cinemática de un Robot Paralelo 3-RPS con la Teoría de Tornillo

J. Alexis Mayo-Álvarez *, Andrés Blanco-Ortega*, Wilberth M. Alcocer-Rosado*, Dariusz Slawomir Szwedowicz *, Eladio Martínez-Rayón*, Arturo Abúndez Pliego*

** Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Morelos, México, C.P. 62490*
(Tel: 777-362-7770; e-mail: andres.bo@cenidet.tecnm.mx) (Tel: 734-147-7238; e-mail: m20ce083@cenidet.tecnm.mx).

Resumen: En el diseño de un robot paralelo es necesario establecer las ecuaciones cinemáticas que rigen su funcionamiento; en este robot con una configuración de 3 cadenas de Revoluta-Prismática-Esférica (3-RPS) el actuador final o base móvil tendrá tres grados de libertad (GDL) con respecto a la base fija, un movimiento traslacional en Z y dos movimientos rotacionales en los ejes X y Y. En este artículo se presenta el desarrollo del análisis cinemático del robot 3-RPS estableciendo un sistema de ecuaciones que establece la posición de la base móvil con los ángulos de inclinación y altura deseados, utilizando la teoría de tornillos, también se presenta el estado de velocidad de la base móvil y de las cadenas cinemáticas. Para establecer los movimientos deseados de la base móvil respecto a la base fija, se realizó una reconfiguración ficticia del robot, una cadena cinemática ficticia compuesta de un par prismático y un par esférico. También, se presentan resultados de simulación con el prototipo virtual del robot paralelo en el software de *MSC Adams View*™.

***Keywords**:* Parallel robot, screw theory, inverse kinematic, forward kinematic.

1. INTRODUCCIÓN

Los robots paralelos están formados por dos plataformas, una fija y otra móvil, unidas por dos o más cadenas cinemáticas en paralelo, y por ello, forman cadenas cinemáticas cerradas, ver Fig. 1. Los robots paralelos se caracterizan por ser ligeros y presentar una mayor rigidez, lo que les permite soportar mayores cargas y lograr mayores aceleraciones [1]. Los manipuladores y robots paralelos también pueden clasificarse por su diseño modular o de geometría variable. El diseño modular está integrado por un conjunto de partes estandarizadas que pueden ensamblarse y desensamblarse fácilmente para formar diferentes configuraciones, mientras el diseño variable modifica sus dimensiones durante su funcionamiento [2].



Fig. 1 Robot o manipulador paralelo Tipo-Delta, conformado por tres cadenas cinemáticas cerradas [3].

Para caracterizar a los robots es necesario realizar los análisis de la cinemática directa y de la cinemática inversa. La cinemática directa determina los parámetros cinemáticos de los actuadores finales de los robots o manipuladores en serie o paralelo, una vez establecidos los pares cinemáticos que conforman las cadenas cinemáticas [1].

El análisis directo de posición consiste en determinar las coordenadas del par cinemático que une el actuador final con la cadena cinemática en un sistema de referencia global XYZ, en robots o manipuladores paralelo determina las coordenadas polares de los pares cinemáticos que une la base móvil con las cadenas cinemáticas que conforman el robot [4].
El análisis directo de velocidad en robots o manipuladores paralelos consiste en determinar el estado de velocidad de la base móvil con respecto a la fija, dado un conjunto de velocidades generalizadas [5].
La cinemática inversa consiste en determinar los parámetros cinemáticos de las cadenas cinemáticas que conforman los robots o manipuladores tanto para los tipo serie como para los paralelo; igual que en la cinemática directa, según el orden de análisis, determina la posición, velocidad, aceleración de los eslabones [1].
La teoría de tornillos infinitesimales ha permitido simplificar considerablemente la cinemática de los robots paralelos, así como la síntesis tanto de tipo como de forma de los mecanismos. También ha permitido el análisis de orden superior como son el de aceleración, pulso e hiperpulso de cadenas seriales y cadenas cerradas [6].
La teoría de tornillos puede ser empleada exitosamente en el análisis de aceleración de cadenas espaciales, Rico M, *et al* [7] introdujeron un nuevo método para el análisis cinemático de velocidad, aceleración y *"jerk"* en cadenas espaciales. También mostraron cómo el análisis en cadenas abiertas tipo serie es aplicable a cadenas cerradas en manipuladores paralelos. El método puede ser fácilmente generalizado para análisis de orden mayor.
Con la teoría de tornillos Gallardo J, *et al* [8] realizaron un análisis cinemático de un manipulador esférico asimétrico, compuesto por tres cadenas cinemáticas asimétricas. El manipulador con tres grados de libertad, está compuesto por una cadena cinemática cilíndrica-prismático-esférico (CPS

ISSN en trámite

por sus siglas en inglés), otra esférico-prismático-esférico (SPS por sus siglas en inglés) y la tercera extremidad del robot, compuesta por un par cinemático esférico, analizaron de forma cerrada para determinar su posición y para determinar su velocidad.

Gallardo J, *et al* [9] realizaron el análisis cinemático de un robot paralelo, el cual modelaron como un manipulador de seis grados de libertad para facilidades de cálculo. Para esto agregaron una cadena cinemática ficticia y pares cinemáticos tipo prismáticos ficticios a cada cadena cinemática, con lo cual determinaron una configuración 4-PRUP. Realizaron un análisis de posición en forma semi-cerrada con base en las coordenadas de dos puntos de referencia en la base móvil. Utilizaron la teoría de tornillos para realizar el análisis de velocidad y aceleración.

Ruiz N, *et al* [10] diseñaron un robot paralelo con configuración 3-RPS con fines de aplicación para el anaveaje, ver Fig. 2, el cual coadyuva en el sincronismo de aterrizaje del helicóptero con el buque, reduciendo las perturbaciones en el movimiento de la embarcación producidas por el oleaje. En su investigación solo reportaron el análisis cinemático de posición por su complejidad en la solución de las ecuaciones. Consideraron los movimientos de cabeceo y balance del buque, dos grados rotacionales (horizontal y vertical), y el desplazamiento en el eje Z y. El robot es controlado por un controlador proporcional integral generalizado (GPI). En este caso se utilizaron acelerómetros para detectar los movimientos angulares y en el GPI asignaron los valores de desplazamiento de los actuadores derivados de la cinemática inversa, necesarios para mantener la base móvil en horizontal.

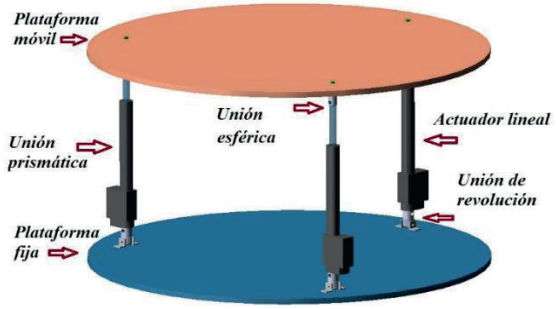


Fig. 2 Robot paralelo 3-RPS [10].

El robot paralelo 3-RPS diseñado en el TECNM/CENIDET presenta una dirección particular en dos de sus cadenas cinemáticas, de 180° una con respecto de la otra y ambas 90° con la primera de éstas. Esta configuración facilita contrarrestar los movimientos de balance y deriva ocasionados por el oleaje en los buques, en función de los incrementos o decrementos de longitud de los pares prismáticos; con una longitud inicial de l_1, l_2 y l_3 iguales entre sí como se observa en la Fig. 3, e iguales a la mitad de la carrera de los actuadores lineales, siendo estos valores constantes para obtener un rango de respuesta igual para valores negativos y positivos.

En la presente investigación se desarrolla el análisis cinemático de segundo orden para el robot presentado por Ruiz, *et al.* [10], mediante la teoría de tornillos para obtener el estado de velocidad de la base móvil y los tornillos asociados a los pares cinemáticos que conforman el robot.

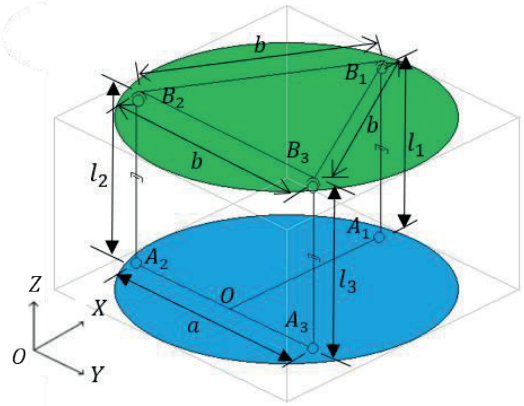


Fig. 3 Configuración cinemática del robot 3-RPS.

Para obtener una solución singular en la que la plataforma móvil rote netamente sobre el X y Y respectivamente, se establece como punto de origen "O" la intersección de la arista inferior compuesta por las revolutas de las cadenas cinemáticas 2 y 3 con el vértice proyectado de la revoluta de la cadena número 1, como se muestra en la Fig. 3. Posteriormente, se inserta un par cinemático esférico fijo ficticio sobre el eje Z en el punto C a una altura l_0 con valor igual a l_1, l_2 o l_3; donde C es el punto medio de la arista superior compuesta por los pares esféricos de las cadenas 2 y 3. Con esto, se obtienen movimientos de rotación en X y Y de la base móvil sobre el punto C y un balance simétrico en el eje X de la base móvil. Para generar el grado de libertad en el eje Z del robot, se inserta un par cinemático prismático en la cadena ficticia perpendicular a la base fija, del punto "O" al par esférico ficticio en el punto "C"; con lo cual se podrá agregar incrementos en l_0 como se muestra en la Fig. 4. Con la reconfiguración del robot las cadenas cinemáticas describirán movimientos en el plano.

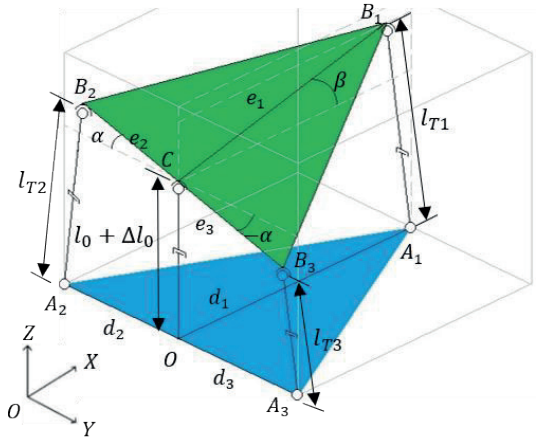


Fig. 4 Configuración cinemática del robot con inclinación $-\alpha$ en Y y β en X con incremento en l_0.

 ISSN en trámite

Donde:

$$l_{T1} = l_1 + \Delta l_1 \quad (1)$$
$$l_{T2} = l_2 + \Delta l_2 \quad (2)$$
$$l_{T3} = l_3 + \Delta l_3 \quad (3)$$

En la Fig. 5 se puede observar la distribución geométrica de las bases que establece la reconfiguración.

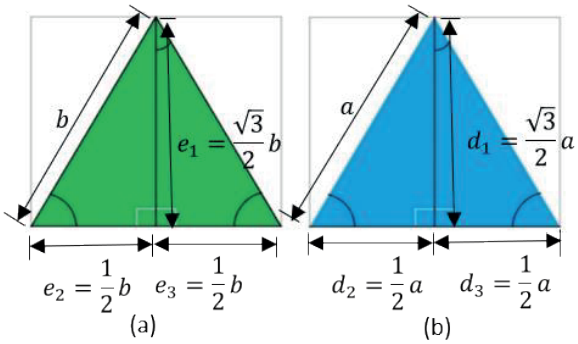


Fig. 5 Distribución de la base móvil (a) y de la base fija. (b).

Con la reconfiguración ficticia, las cadenas cinemáticas tendrán un movimiento plano y debido a la simetría de las cadenas cinemáticas se puede obtener un sistema de ecuaciones homogéneo.

2. ANÁLISIS CINEMÁTICO

2.1 Cinemática directa de posición

De manera generalizada, para las tres cadenas cinemáticas el análisis directo de posición puede establecerse de la siguiente manera al considerar la Fig. 6.

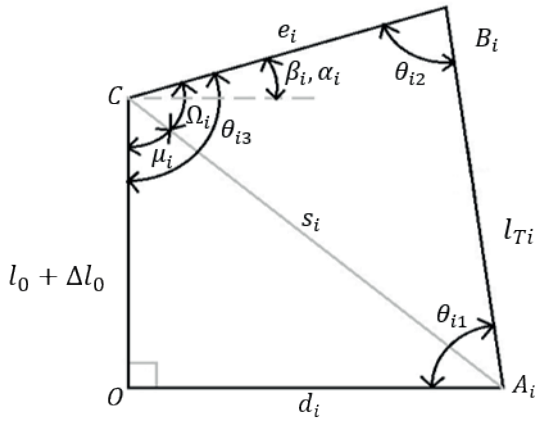


Fig. 6 Cadena plana para la cinemática directa de posición.

Por la ley de coseno o por el teorema de Pitágoras se puede determinar que

$$s_i = \sqrt{(l_0 + \Delta l_0)^2 + {d_i}^2} \quad (4)$$

Mediante la ley de seno es posible determinar μ_i ya que se tiene que

$$\frac{d_i}{\sin \mu_0} = \frac{s_i}{\sin 90°} \quad (5)$$

Por tanto,

$$\mu_i = \operatorname{asin} \frac{d_i}{s_i} \quad (6)$$

Nuevamente, de la ley de cosenos puede establecerse que

$$(l_{Ti})^2 = {s_i}^2 + {e_i}^2 - 2 s_i e_i \cos \Omega_i \quad (7)$$

Con lo cual se determina que

$$\Omega_i = acos\left(\frac{{s_i}^2 + {e_i}^2 - (l_{Ti})^2}{2 s_i e_i}\right) \quad (8)$$

De la Fig. 6 puede observarse que

$$\theta_{i3} = \Omega_i + \mu_i \quad (9)$$
$$\beta_i = \theta_{i3} - 90° \quad (10)$$

Entonces

$$\beta_i = \Omega_i + \mu_i - 90° \quad (11)$$

Donde:

$$i = 1, 2, 3 \quad (12)$$

Que representan las cadenas cinemáticas que conforman el robot.

2.2 Cinemática inversa de posición

El análisis inverso de posición, de manera generalizada, para las tres cadenas cinemáticas puede establecerse a partir de la Fig. 7, de la siguiente manera.

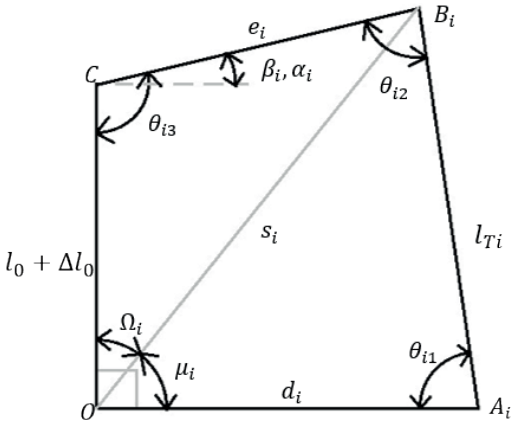


Fig. 7 Cadena plana para la cinemática inversa de posición.

ISSN en trámite

Por la ley de cosenos se tiene que

$$s_i{}^2 = (l_0 + \Delta l_0)^2 + e_i{}^2 - 2 l_0 e_i \cos\theta_{i3} \quad (13)$$

En la Fig. 7 se observa que

$$\theta_{i3} = 90° + \beta_i \quad (14)$$

Por tanto

$$s_i = \sqrt{(l_0 + \Delta l_0)^2 + e_i{}^2 - 2 l_0 e_i \cos(90° + \beta_i)} \quad (15)$$

De la ley de senos se tiene que

$$\frac{e_1}{\sin\Omega_i} = \frac{s_i}{\sin\theta_{i3}} \quad (16)$$

En donde

$$\Omega_i = asin\left(\frac{e_i \sin(90° + \beta_i)}{s_i}\right) \quad (17)$$

Con lo cual se puede determinar que

$$\mu_i = 90° - \Omega_i \quad (18)$$

Finalmente, nuevamente a partir de la ley de cosenos se puede determinar la longitud total del cilindro de la cadena analizada.

$$(l_{Ti})^2 = s_i{}^2 + d_i{}^2 - 2 s_i d_i \cos\mu_i \quad (19)$$

$$l_{Ti} = \sqrt{s_i{}^2 + d_i{}^2 - 2 s_i d_i \cos(90° - \Omega_i)} \quad (20)$$

IMPORTANTE: establecer las variables β y α de manera correcta con β, α y $-\alpha$ para las cadenas cinemáticas 1, 2 y 3 respectivamente como se muestra en la Fig. 4.
Con lo cual se puede determinar un sistema de ecuaciones que dicte las inclinaciones deseadas β y α de la base móvil, así como, el desplazamiento en Z de la misma.

$$l_{T1} = \sqrt{s_1{}^2 + d_1{}^2 - 2 s_1 d_1 \cos(90° - \Omega_1)} \quad (21)$$

$$l_{T2} = \sqrt{s_2{}^2 + d_2{}^2 - 2 s_2 d_2 \cos(90° - \Omega_2)} \quad (22)$$

$$l_{T3} = \sqrt{s_3{}^2 + d_3{}^2 - 2 s_3 d_3 \cos(90° - \Omega_3)} \quad (23)$$

2.3 Análisis de velocidad utilizando la teoría de tornillos.

De igual manera que para el análisis de posición, se realiza un análisis generalizado de una cadena cinemática plana;

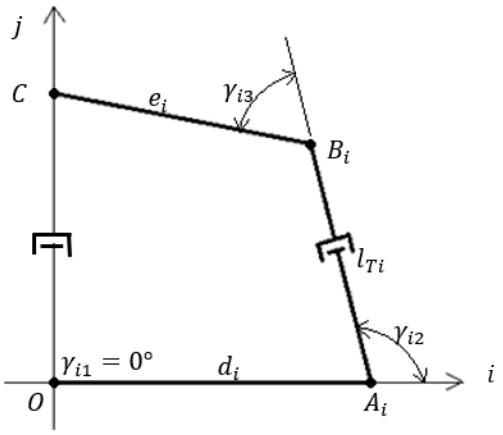


Fig. 8 Cadena plana para el análisis de velocidades.

Analizando la cadena cinemática plana de la Fig. 8 de manera abierta mediante la teoría de tornillos se determinan los tornillos asociados a los pares cinemáticos,

$$^{o}\$_i{}^{1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$^{1}\$_i{}^{2} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ d_i \cos\gamma_{i1} \\ -d_i \sin\gamma_{i1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$^{2}\$_i{}^{3} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \cos\gamma_{i2} \\ sin\,\gamma_{i2} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$^{3}\$_i{}^{4} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ +d_i \cos\gamma_{i1} + (l_{Ti}) \sin\gamma_{i2} \\ -d_i \sin\gamma_{i1} - (l_{Ti}) \cos\gamma_{i2} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

Para el par prismático ficticio, el tornillo asociado es;

$$^{o}\$^{C} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \cos 90° \\ sin\ 90° \\ 0 \end{bmatrix} \quad (28)$$

Asociados a los pares cinemáticos como se muestra en la Fig. 9.

 ISSN en trámite

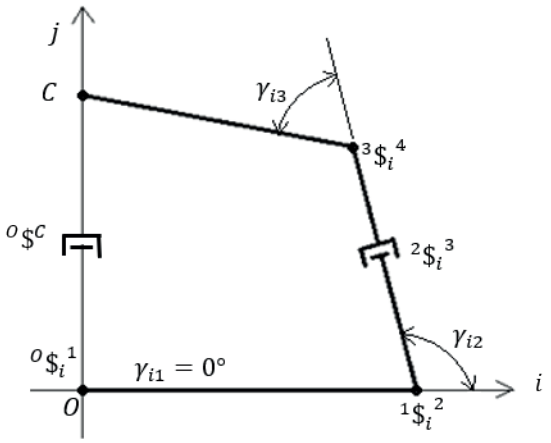


Fig. 9 Cadena plana con tornillos asociados.

Debido a la reconfiguración ficticia, los tornillos asociados a los pares esféricos en los puntos B_i representan pares de revoluta. Es posible determinar los tornillos asociados a los pares esféricos del robot proyectando los tornillos asociados a los puntos B_i hacia el punto C asociándose a par esférico ficticio, ver Fig. 10.

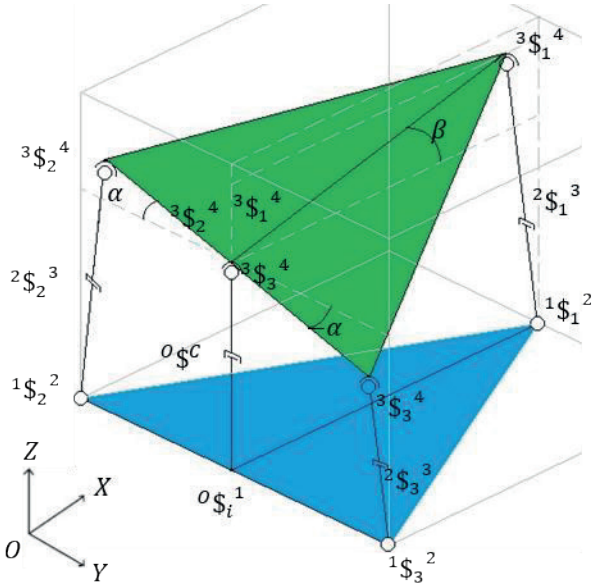


Fig. 10 Distribución de los tornillos asociados al robot.

El estado de velocidad de un cuerpo rígido se compone de dos vectores: la velocidad angular del cuerpo rígido y la velocidad en un punto del mismo [9]. De manera generalizada;

$$^0\vec{V}^n = \begin{bmatrix} ^0\vec{\omega}^n \\ ^0\vec{b}^n \end{bmatrix} \tag{29}$$

$$^0\vec{V}^n = {}^0\vec{\omega}^1\,{}^o\$^1 + {}^1\vec{\omega}^2\,{}^1\$^2 + {}^2\vec{\omega}^3\,{}^2\$^3 + \cdots + {}^{n-1}\vec{\omega}^n\,{}^{n-1}\$^n \tag{30}$$

Para establecer el estado de velocidad del punto C visto desde O con base en la cadena cinemática plana, se tiene; (31)

$$^o\overrightarrow{V_C}^4 = \begin{bmatrix} ^o\vec{\omega}^4 \\ ^o\vec{b}^4 \end{bmatrix}$$

$$^o\vec{V}_C{}^4 = \dot{\gamma}_{i1}\,{}^o\$_i^1 + \dot{\gamma}_{i2}\,{}^1\$_i^2 + \dot{l}_{Ti}\,{}^2\$_i^3 + \dot{\gamma}_{i3}\,{}^3\$_i^4 \tag{32}$$

$$^o\vec{V}_C{}^4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & d_i\cos\gamma_{i1} & \cos\gamma_{i2} & +d_i\cos\gamma_{i1} + (l_{Ti})\sin\gamma_{i2} \\ 0 & -d_i\sin\gamma_{i1} & \sin\gamma_{i2} & -d_i\sin\gamma_{i1} - (l_{Ti})\cos\gamma_{i2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\gamma}_{i1} \\ \dot{\gamma}_{i2} \\ \dot{l}_{Ti} \\ \dot{\gamma}_{i3} \end{bmatrix} \tag{33}$$

3. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Se realizaron unas simulaciones del robot paralelo 3-RPS en el software de *MSC Adams View™*, ver Fig. 11, con los siguientes parámetros:

$$l_0 = l_1 = l_2 = l_3 = 0.7679\ m$$
$$e_1 = d_1 = 0.74998\ m$$
$$e_2 = e_3 = d_2 = d_3 = 0.433\ m$$

Con las ecuaciones obtenidas de la cinemática inversa, se realiza una simulación del movimiento del robot; ingresando las ecuaciones con los valores deseados de α y β, así también, el valor del incremento de Δl_0. Graficando en X y Y el ángulo de las inclinaciones de la base móvil.



Fig. 11 Prototipo virtual del robot paralelo 3-RPS en el entorno de *MSC Adams View™*.

Se realizó la simulación del robot con los valores deseados de α=8°, β=8° y $\Delta l_0 = 0.04\ m$, posicionándose como se muestra en la Fig. 12.

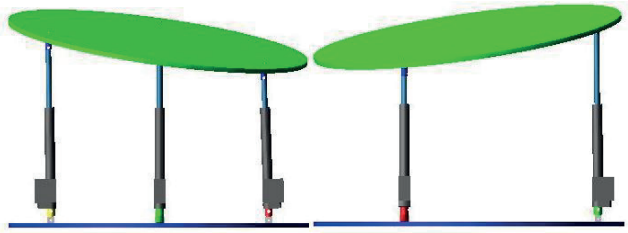


Fig. 12 Robot paralelo en una posición angular de α=8°, β=8° y $\Delta l_0 = 0.04\ m$.

Durante la simulación se graficó las inclinaciones de la base móvil mostrados en la Fig. 13.

ISSN en trámite

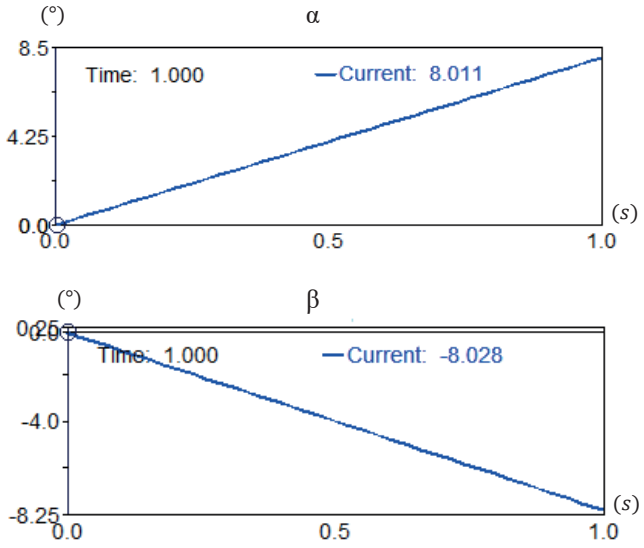


Fig. 13 Respuesta del robot paralelo para un movimiento angular de α=8°, β=8° y $\Delta l_0 = 0.04\ m$.

También se graficaron los incrementos de los pares prismáticos de las cadenas cinemáticas, mostrados en la siguiente Fig. 14,

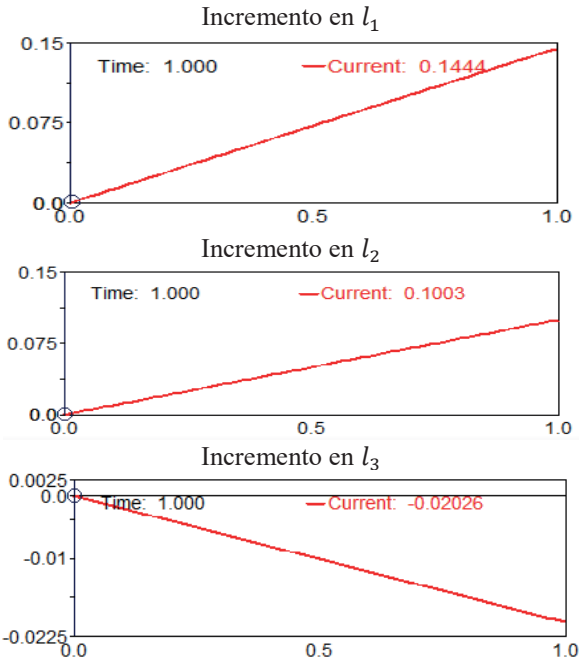


Fig. 14 Robot paralelo en una posición angular de α=8°, β=8° y $\Delta l_0 = 0.04\ m$.

Del ejemplo numérico realizado en *Scientific Workplace*™ con α=8°, β=8° y $\Delta l_0 = 0.04\ m$, se obtuvo que la longitud total l_{Ti} de las cadenas para obtener la posición deseada es;

$$l_{T1} = 0.91236\ m$$
$$l_{T2} = 0.86817\ m$$
$$l_{T3} = 0.74765\ m$$

Utilizando (1) – (3), se tiene que,

$$\Delta l_1 = 0.14446\ m$$
$$\Delta l_2 = 0.10027\ m$$
$$\Delta l_3 = -0.02025\ m$$

4. CONCLUSIONES

En este artículo se presentó el análisis cinemático de posición y velocidad de un robot paralelo en configuración 3-RPS con la teoría de tornillos. Los resultados fueron validados con las simulaciones realizadas con el prototipo virtual en MSC Adams. Como se puede observar en la Fig. 13, las inclinaciones de la base móvil corresponden a los valores deseados, establecidos en las ecuaciones de la cinemática inversa, también es observable en la Fig. 14 que los valores de los incrementos de los pares prismáticos son iguales a los valores obtenidos en el ejemplo numérico. Como trabajo futuro se utilizará la cinemática para implementar un control de posición del robot paralelo.

REFERENCIAS

[1] J. P. Merlet, *Parallel Robots*, (Second Edition) Netherlands, Springer (2006).
[2] Sánchez, R., González, J., Castillo, E., García, M., 2016, "Análisis cinemático de un novedoso robot paralelo reconfigurable", Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, vol. 13, pp. 247-257.
[3] D. Schütz, M. W. Friedrich, Robotic Systems for Handling and Assembly, Springer (2010)
[4] Ruiz, N., Blanco, A., Abúndez, Colin, J., Alcocer, W., 2019, "*Dynamic analysis and control of a three-revolute-prismatic-spherical parallel robot by algebraic parameters identification*", International Journal of advanced robotic systems, pp. 1-12.
[5] Gallardo, J., Rico, J., Caudillo, M., 2006, "Análisis cinemático directo de un manipulador paralelo esférico asimétrico", Ingeniería Investigación y Tecnología, vol. 7, núm. 4, pp. 205-215.
[6] Gallardo, J. Análisis cinemáticos de orden superior de cadenas espaciales, mediante el ´algebra de tornillos, y sus aplicaciones. Tesis Doctoral, Instituto Tecnológico de la Laguna, 1999.
[7] Rico, M., Gallardo, J., Duffy, J., 1999, "*Screw theory and higher order kinematic analysis of open serial and closed chains*", Mechanism and Machines Theory, vol. 34, pp. 559-586.
[8] Gallardo, J., Rico, J., Caudillo, M., 2006, "Análisis cinemático directo de un manipulador paralelo esférico asimétrico", Ingeniería Investigación y Tecnología, vol. 7, núm. 4, pp. 205-215.
[9] Gallardo, J., García, M., 2017, "Análisis cinemático del manipulador paralelo 4-PRUR mediante la teoría de tornillos", Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, vol. 14, pp. 299-306.
[10] Ruiz, N., Blanco, A., Colín, J., Antunez, E., Alcocer, W., Abundez, A., 2018, "Diseño de un robot paralelo para el anaveaje", Memorias del XXIV Congreso Internacional Anual de la SOMIM, tema A1b.

REDES SOCIALES
TecNM / CENIDET

@TecNMCenidet.mx

Cenidet

Cenidet_oficial

CENIDET

https://cenidet.tecnm.mx/

cenidet®
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico