

Número: 32

SCOPUS

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR

pISSN: 1390-650X

eISSN: 1390-860X

julio / diciembre 2024

INGENIUS

Revista de Ciencia y Tecnología



Q4
SJIR Journal
Rank

SUBJECT AREA AND CATEGORY
Engineering
(miscellaneous)

- Evaluación estructural de un vehículo tipo mototaxi usando herramientas de simulación: caso México.

Pag. 18

- Optimización del proceso VARTM, para el prototipado de un guardachoque, utilizando materiales compuestos híbridos.

Pag. 48

- Diagnóstico de cáncer oral mediante algoritmos de aprendizaje profundo.

Pag. 58

- Cuentacuentos basado en IA generativa para promover la inclusión de personas con discapacidades.

Pag. 101

Indexada en: **SCOPUS**

INGENIUS

INGENIUS • Número 32 • julio/diciembre 2024. Revista de Ciencia y Tecnología de la Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador. Publicación dedicada a estudios relacionados con las Ciencias de la Ingeniería Mecánica, Ingeniería Eléctrica, Ingeniería Electrónica, Ingeniería Mecatrónica, Ciencias de la Computación y áreas afines.

Consejo de Editores

RAFAEL ANTONIO BALART GIMENO, PhD, Universidad Politécnica de Valencia, España – Editor Jefe.

JOHN IGNACIO CALLE SIGÜENCIA, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador – Editor Jefe.

ESTEBAN MAURICIO INGA ORTEGA, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador – Editor Asociado.

MARLON XAVIER QUINDE ABRIL, MSC, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador – Editor Asociado.

TEODIANO FREIRE BASTOS FILHO, PhD, (Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil – Editor Asociado.

Consejo Científico

JUAN LÓPEZ MARTÍNEZ, PhD, Universidad Politécnica de Valencia, España.

ELENA FORTUNATI, PhD, Universidad de Perugia, Italia.

GUSTAVO ROVELO RUIZ, PhD, Hasselt University, Diepenbeek, Bélgica.

FRANKLIN GAVILANEZ ALVAREZ, PhD, American University, Estados Unidos.

PIEDAD GAÑAN ROJO, PhD, Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia.

JOSÉ ALEX RESTREPO, PhD, Universidad Simón Bolívar, Venezuela.

SERGIO LUJAN MORA, PhD, Universidad de Alicante, España.

MARTHA ZEQUERA DÍAZ, PhD, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia.

GROVER ZURITA, PhD, Universidad Privada Boliviana, Bolivia.

VLADIMIR ROBLES, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

GERMÁN ARÉVALO, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

WILBERT AGUILAR, PhD, Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE, Ecuador.

PABLO PARRA ROSERO, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

JACK BRAVO TORRES, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

WALTER OROZCO, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

MARIELA CERRADA, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

JULIO CÉSAR VIOLA, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

SERGIO GAMBOA SÁNCHEZ, PhD, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

ROGER ABDÓN BUSTAMANTE PLAZA, PhD, Universidad de Chile, Chile.

CHRISTIAN BLUM, PhD, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España.

SILVIA NOEMI SCHIAFFINO, PhD, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.

ANALÍA ADRIANA AMANDI, PhD, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.

RUBÉN DE JESÚS MEDINA MOLINA, PhD, Universidad de Los Andes, Venezuela.

JOHNNY JOSUÉ BULLÓN TORREALBA, PhD, Universidad de Los Andes, Venezuela.

RODRIGO PALMA HILLERNS, PhD, Universidad de Chile, Chile.

GERARDO ESPINOZA PÉREZ, PhD, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

ALEXANDRE MENDES ABRÃO, PhD, Universidad Federal de Minas Gerais, Brasil.

KAMLA ABDEL RADI ISMAIL, PhD, Universidad Estatal de Campinas Unicamp, Brasil.

ARNALDO DA SILVA, PhD, Universidad Estatal de Campinas Unicamp, Brasil.

ÁLVARO ROCHA, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

JOSÉ ANTENOR POMILIO, PhD, Universidad Estatal de Campinas Unicamp, Brasil.

LUIS PAULO REIS, PhD, Universidad de Minho, Portugal.

LUÍS FERNANDES, PhD, Escuela Superior Náutica Infante d. Henrique, Portugal.

ANÍBAL TRAÇA DE ALMEIDA, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

JORGE SÁ SILVA, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

PEDRO MANUEL SOARES MOURA, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

SÉRGIO MANUEL RODRIGUES LOPES, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

RICARDO MADEIRA SOARES BRANCO, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

CARLOS ALEXANDRE BENTO CAPELA, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

FILIPPE ARAUJO, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

LUIS MANUEL GUERRA SILVA ROSA, PhD, Universidad de Lisboa, Portugal.

HÉLDER DE JESUS FERNANDES, PUGA, PhD, Universidad de Minho, Portugal.

FILIPPE SAMUEL, PEREIRA DA SILVA, PhD, Universidad de Minho, Portugal.

CÉSAR SEQUEIRA, PhD, Universidad de Lisboa, Portugal.

JOSÉ TEIXEIRA ESTÊVÃO FERREIRA, PhD,

Universidad de Coimbra, Portugal.

NUNO LARANJEIRO, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

LUÍS AMARAL, PhD, Universidad de Lisboa, Portugal.

JORGE HENRIQUES, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

WILLIAM IPANAQUE, PhD, Universidad de Piura, Perú.

LORENZO LEIJA SALAS, PhD, Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México.

VALERI KONTOROVICH MAZOVER, PhD, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México.

ALEJANDRO ÁVILA GARCÍA, PhD, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México.

PAOLO BELLAVISTA, PhD, Universidad de Bologna, Italia.

CARLOS RUBIO, PhD, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, México.

FERNANDO HERNÁNDEZ SÁNCHEZ, PhD, Centro de Investigación Científica de Yucatán, México.

EMILIO MUÑOZ SANDOVAL, PhD, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, México.

YASUHIRO MATSUMOTO KUWABARA, PhD, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México.

DAVID ZUMOFFEN, PhD, Centro Internacional Franco Argentino de Ciencias de la Información y de Sistemas, Argentina.

VICENTE RODRÍGUEZ GONZÁLEZ, PhD, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, México.

ALEJANDRO RODRÍGUEZ ÁNGELES, PhD, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México.

ALISTAIR BORTHWICK, PhD, Universidad de Edimburgo, Reino Unido.

Consejo de Revisores

FEDERICO DOMINGUEZ, PhD, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador.

ENRIQUE CARRERA, PhD, Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE, Ecuador.

ANDRÉS TELLO, MSc, Universidad de Cuenca, Ecuador.

CRISTIAN GARCÍA BAUZA, PhD, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.

OSVALDO AÑÓ, PhD, Universidad Nacional de San Juan, Argentina.

THALÍA SAN ANTONIO, PhD, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.

VICTOR SAQUICELA, PhD, Universidad de Cuenca, Ecuador.

GONZALO OLMEDO, PhD, Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE, Ecuador.

ROMÁN LARA, PhD, Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE, Ecuador.

GUILLERMO SORIANO, PhD, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador.

MARÍA FERNANDA GRANDA, PhD, Universidad de Cuenca, Ecuador.

RICARDO CAYSSIALS, PhD, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina.

LEONARDO SOLAQUE GUZMAN, PhD, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia.

JOSÉ DI PAOLO, PhD, Universidad Nacional de Entre Ríos, Argentina.

ASTRID RUBIANO FONSECA, PhD, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia.

ROBINSON JIMÉNEZ, PhD, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia.

ALFONSO ZOZAYA, PhD, Universidad de Carabobo, Venezuela.

MAURICIO MAULEDOUX, PhD, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia.

LUIS MEDINA, PhD, Universidad Simón Bolívar, Venezuela.

ERNESTO CUADROS-VARGAS, PhD, Universidad Católica San Pablo, Perú.

SAMUEL SEPÚLVEDA CUEVAS, PhD, Universidad de la Frontera, Chile.

CARLOS CARES, PhD, Universidad de la Frontera, Chile.

RAFAEL SOTELO, PhD, Universidad de Montevideo, Uruguay.

OMAR LOPEZ, PhD, Universidad de Los Andes, Colombia.

JOB FLORES-GODOY, PhD, Universidad Católica del Uruguay, Uruguay.

LUIS MARIO MATEUS, PhD, Universidad de los Andes, Colombia.

AMADEO ARGÜELLES CRUZ, PhD, Instituto Politécnico Nacional, México.

SANTIAGO BENTANCOURT PARRA, PhD, Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia.

ALBERTO SORIA, PhD, Centro de Investiga-

ción y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México.

GERMÁN ZAPATA, PhD, Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

PEDRO GARCÍA, PhD, Universidad Autónoma de Barcelona, España.

ARTURO CONDE ENRÍQUEZ, PhD, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

ALBERTO CAVAZOS GONZÁLEZ, PhD, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

ERNESTO VÁZQUEZ MARTÍNEZ, PhD, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

MIGUEL DÍAZ RODRIGUEZ, PhD, Universidad de Los Andes, Venezuela.

EFRAÍN ALCORTA GARCÍA, PhD, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

LUIS CHIRINOS GARCIA, PhD, Pontificia Universidad Católica de Perú, Perú.

OSCAR AVILÉS, PhD, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia.

DORA MARTÍNEZ DELGADO, PhD, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

DAVID OJEDA, PhD, Universidad Técnica del Norte, Ecuador.

IRENE BEATRÍZ STEINMANN, PhD, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina.

MARIO SERRANO, Universidad Nacional de San Juan, Argentina.

CORNELIO POSADAS CASTILLO, PhD, Universidad Autónoma Nuevo León, México.

MARIO ALBERTO RIOS MESIAS, PhD, Universidad de Los Andes, Colombia.

YUDITH CARDINALE VILLARREAL, PhD, Universidad Simón Bolívar, Venezuela.

JOSE EDUARDO OCHOA LUNA, PhD, Universidad Católica San Pablo, Perú.

DANTE ANGEL ELIAS GIORDANO, PhD, Pontificia Universidad Católica de Perú, Perú.

MANUEL PELAEZ SAMANIEGO, PhD, Universidad de Cuenca, Ecuador.

JUAN ESPINOZA ABAD, PhD, Universidad de Cuenca, Ecuador.

PIETRO CODARA, PhD, Universidad de Milan, Italia.

JOSÉ M. ALLER, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

FERNEY AMAYA F., PhD, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia.

SANTIAGO ARANGO ARAMBURO, PhD, Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

DIEGO ARCOS-AVILÉS, PhD, Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE, Ecuador.

PABLO AREVALO, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

ROBERTO BELTRAN, MSc, Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE, Ecuador.

LEONARDO BETANCUR, PhD, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia.

ROBERTO GAMBOA, PhD, Universidad de Lisboa, Portugal.

PAULO LOPES DOS SANTOS, PhD, Universidad do Porto, Portugal.

PEDRO ANDRÉ DIAS PRATES, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

JOSÉ MANUEL TORRES FARINHA, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

CELSE DE ALMEIDA, PhD, Universidad Estatal de Campinas Unicamp, Brasil.

RAMON MOLINA VALLE, PhD, Universidad Federal de Minas Gerais, Brasil.

CRISTINA NADER VASCONCELOS, PhD, Universidad Federal Fluminense, Brasil.

JOÃO M. FERREIRA CALADO, PhD, Universidad de Lisboa, Portugal.

GUILHERME LUZ TORTORELLA, PhD, Universidad Federal de Santa Catarina, Brasil.

MAURO E. BENEDET, PhD, Universidad Federal de Santa Catarina, Brasil.

ARTEMIS MARTI CESCHIN, PhD, Universidade de Brasília, Brasil.

GILMAR BARRETO, PhD, Universidad Estatal de Campinas Unicamp, Brasil.

RICARDO EMILIO F. QUEVEDO NOGUEIRA, PhD, Universidad Federal de Ceará, Brasil.

WESLEY LUIZ DA SILVA ASSIS, PhD, Universidad Federal Fluminense, Brasil.

ANA P. MARTINAZZO, PhD, Universidad Federal Fluminense, Brasil.

JORGE BERNARDINO, PhD, Universidad de Coimbra, Portugal.

LUIS GERALDO PEDROSO MELONI, PhD, Universidad Estatal de Campinas Unicamp, Brasil.

FACUNDO ALMERAYA CALDERÓN, PhD, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

FREDDY VILLAO QUEZADA, PhD, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador.

JOSE MANRIQUE SILUPU, MSc, Universidad de Piura, Perú.

GERMÁN ARIEL SALAZAR, PhD, Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional, Argentina.

JOSÉ MAHOMAR JANANÍAS, PhD, Universidad del BIOBIO, Chile.

ARNALDO JÉLVEZ CAAMAÑO, PhD, Universidad del BIOBIO, Chile.

JORGE ANDRÉS URIBE, MSc, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, México.

RICARDO BELTRAN, PhD, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, México.

ADI CORRALES, MSc, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, México.

JORGE URIBE CALDERÓN, PhD, Centro de Investigación Científica de Yucatán, México.

FREDDY BUENO PALOMEQUE, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

JOSÉ TRINIDAD HOLGUÍN MOMACA, MSc, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, México.

JUAN MANUEL ALVARADO OROZCO, PhD, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, México.

ARNALDO JÉLVEZ CAAMAÑO, PhD, Universidad del BIOBIO, Chile.

JAVIER MURILLO, PhD, Centro Internacional Franco Argentino de Ciencias de la Información y de Sistemas, Argentina.

LUCAS DANIEL TERISSI, PhD, Universidad Nacional de Rosario, Argentina.

RENE VINICIO SANCHEZ LOJA, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

DIEGO CABRERA MENDIETA, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

EDWUIN JESUS CARRASQUERO, PhD, Universidad Técnica de Machala, Ecuador.

CARLOS MAURICIO CARRILLO ROSERO, MSc, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.

DIEGO CARRION GALARZA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

CARMEN CELI SANCHEZ, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

DIEGO CHACON TROYA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

PAUL CHASI, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

JUAN CHICA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

DIEGO MARCELO CORDERO GUZMÁN, MSc, Universidad Católica de Cuenca, Ecuador.

LUIS JAVIER CRUZ, PhD, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia.

FABRICIO ESTEBAN ESPINOZA MOLINA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

JORGE FAJARDO SEMINARIO, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

PATRICIA FERNANDEZ MORALES, PhD, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia.

MARCELO FLORES VAZQUEZ, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

CARLOS FLORES VÁZQUEZ, MSc, Universidad Católica de Cuenca, Ecuador.

CARLOS FRANCO CARDONA, PhD, Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

CRISTIAN GARCÍA GARCÍA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

TEONILA GARCÍA ZAPATA, PhD, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú.

LUIS GARZÓN MÑOZ, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

NATALIA GONZALEZ ALVAREZ, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

ERNESTO GRANADO, PhD, Universidad Simón Bolívar, Venezuela.

ADRIANA DEL PILAR GUAMAN, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

JUAN INGA ORTEGA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

ESTEBAN INGA ORTEGA, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

PAOLA INGAVÉLEZ, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

CESAR ISAZA ROLDAN, PhD, Universidad Pontificia Bolivariana.

NELSON JARA COBOS, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

RUBEN JERVES, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

VICTOR RAMON LEAL, PhD, Investigador de PDVSA, Venezuela.

GABRIEL LEON, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

EDILBERTO LLANES, PhD, Universidad Internacional SEK, Ecuador.

LUIS LÓPEZ LÓPEZ, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

CARLOS MAFLA YÉPEZ, MSc, Universidad Técnica del Norte, Ecuador.

HADER MARTÍNEZ, PhD, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia.

JAVIER MARTÍNEZ, PhD, Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables, Ecuador.

ALEX MAYORGA, MSc, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.

JIMMY MOLINA, MSc, Universidad Técnica de Machala, Ecuador.

ANDRES MONTERO, PhD, Universidad de Cuenca, Ecuador.

VICENTE MORALES, MSc, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.

FABIÁN MORALES, MSc, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.

DIEGO MORALES, MSc, Ministerio de Electricidad y Energías Renovables del Ecuador.

YOANDRYS MORALES TAMAYO, PhD, Universidad Técnica de Cotopaxi, Cotopaxi.

OLENA LEONIDIVNA NAIDIUK, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

OSCAR NARANJO, MSc, Universidad del Azuay, Ecuador.

PAUL NARVAEZ, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

HERNÁN NAVAS OLMEDO, MSc, Universidad Técnica de Cotopaxi, Ecuador.

CESAR NIETO, PhD, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia.

FABIO OBANDO HERRERA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

LUIS ORTIZ FERNANDEZ, MSc, Universidade Federal de Rio Grande del Norte, Brasil.

PABLO PARRA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

PAULO PEÑA TORO, PhD, Ministerio de Productividad, Ecuador.

PATSY PRIETO VELEZ, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

DIEGO QUINDE FALCONI, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

DIANA QUINTANA ESPINOZA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

WILLIAM QUITIAQUEZ SARZOSA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

FLAVIO QUIZHPI PALOMEQUE, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

WASHINGTON RAMIREZ MONTALVAN, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

FRAN REINOSO AVECILLAS, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

NÉSTOR RIVERA CAMPOVERDE, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

JORGE ROMERO CONTRERAS, MSc, Universidad de Carabobo, Venezuela.

FABIAN SAENZ ENDERICA, MSc, Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE, Ecuador.

LUISA SALAZAR GIL, PhD, Universidad Simón Bolívar, Venezuela.

GUSTAVO SALGADO ENRÍQUEZ, MSc, Universidad Central del Ecuador., Ecuador.

JUAN CARLOS SANTILLÁN LIMA, MSc, Universidad Nacional de Chimborazo.

ANDRÉS SARMIENTO CAJAMARCA, MSc, Universidad Federal de Santa Catarina, Brasil.

RODOLFO BOJORQUE CHASI, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

PAUL TORRES JARA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

RODRIGO TUFÍÑO CÁRDENAS, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

FERNANDO URGILES ORTÍZ, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

JUAN VALLADOLID QUITOISACA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

MARY VERGARA PAREDES, PhD, Universidad de los Andes, Merida, Venezuela.

JENNIFER YEPEZ ALULEMA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

JULIO ZAMBRANO ABAD, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

PATRICIA ZAPATA MOLINA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Consejo de publicaciones

JUAN CÁRDENAS TAPIA, SDB, PhD
JOSÉ JUNCOSA BLASCO, PhD
ESTEBAN MAURICIO INGA ORTEGA, PhD
ÁNGEL TÓRRES TOUKOUMIDIS, PhD
JAIME PADILLA VERDUGO, PhD
SHEILA SERRANO VINCENTI, MSc
JORGE CUEVA ESTRADA, MSc
JOHN CALLE SIGÜENCIA, PhD
FLORALBA AGUILAR GORDÓN, PhD
BETTY RODAS SOTO, MSc
MÓNICA RUIZ VÁSQUEZ, MSc
JORGE ALTAMIRANO SÁNCHEZ, MSc
DAVID ARMENDÁRIZ GONZÁLEZ, MSc

Editor General

ÁNGEL TÓRRES TOUKOUMIDIS, PhD

Consejo Técnico

DRA. MARCIA PEÑA, Revisora de Estilo,
Centro Gráfico Salesiano - Editorial Don Bosco
MARLON QUINDE ABRIL, MSc, Diagramación y Maquetación
LCDA. MARÍA JOSÉ CABRERA, Técnica Marcalyc
LCDO. CHRISTIAN ARPI, Coordinador Community Managers
LCDO. ANDRÉS LÓPEZ, Community Manager - Diagramación y Maquetación

Servicio de Publicaciones

HERNÁN HERMOSA (Coordinación General)
MARCO GUTIÉRREZ (Soporte OJS)
PAULINA TORRES (Edición)
RAYSA ANDRADE (Maquetación)
MARTHA VINUEZA (Maquetación)
YIXI GONZALEZ, (Revisora de Estilo)

Editorial

Editorial Abya Yala (Quito-Ecuador),
Avenida 12 de octubre N422 y Wilson,
Bloque A, UPS Quito, Ecuador.
Casilla 17-12-719 Teléfonos: (593-2) 3962800 ext. 2638
Correo electrónico: editorial@abyayala.org

Tiraje: 800 ejemplares

Sistema tipográfico usado en la composición de este documento L^AT_EX.

INGENIUS

REVISTA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Número 32

julio – diciembre 2024

ISSN impreso 1390-650X / ISSN electrónico 1390-860X

La administración de INGENIUS se realiza a través de los siguientes parámetros:

La revista utiliza el sistema antiplagio académico



Los artículos cuentan con código de identificación (*Digital Object Identifier*)



El proceso editorial se gestiona a través del *Open Journal System*



Es una publicación de acceso abierto (*Open Access*) con licencia *Creative Commons*



Las políticas *copyright* y de uso *postprint*, se encuentran publicadas en el Repositorio de Políticas de Autoarchivo *Sherpa/Romeo*.



Los artículos de la presente edición pueden consultarse en

<https://ingenius.ups.edu.ec/>



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA DEL ECUADOR

La Revista INGENIUS está indexada en las siguientes Bases de Datos y sistemas de información científica:

BASE DE DATOS SELECTIVAS



Scopus



Google
scholar



Scientific Indexing Services



PLATAFORMAS DE EVALUACIÓN DE REVISTAS

MIAR



DIRECTORIOS SELECTIVOS



ULRICHSWEB™
GLOBAL SERIALS DIRECTORY

HEMEROTECAS SELECTIVAS



BUSCADORES DE LITERATURA CIENTÍFICA OPEN ACCESS

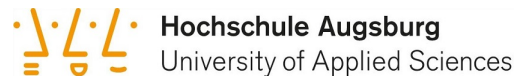


OTRAS BASES DE DATOS BIBLIOGRÁFICAS



PKP|INDEX

CATÁLOGO DE BIBLIOTECAS INTERNACIONALES UNIVERSITARIAS



UNIVERSITÄT BAMBERG



Estimadas y estimados lectores:

En la actualidad, la investigación científica en ciencia y tecnología se encuentra en un momento crucial de expansión y colaboración global, como reflejan los artículos presentados en este número. Provenientes de diversos estamentos académicos y geográficos, estas contribuciones no solo destacan por su rigor y relevancia, sino también por la diversidad de temas que abordan, mostrando un panorama amplio y enriquecedor para nuestra comunidad científica.

Desde la Universidad Estatal Península de Santa Elena en Ecuador, el trabajo de Torres Guin, Sánchez Aquino, Bustos Gaibor, y Coronel Suárez sobre la arquitectura de IoT para el monitoreo de emisiones vehiculares utilizando Machine Learning, resalta por su innovación en la mitigación de contaminantes, un tema crucial para el desarrollo sostenible global.

Por otro lado, desde México, la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla contribuye con una evaluación estructural avanzada de mototaxis mediante simulación, liderada por Cuautle-Gutiérrez, Cordero Guridi, Olivares Rojas y Pena Preza. Este estudio no solo mejora la seguridad vehicular, sino que también muestra el potencial de las herramientas de simulación en aplicaciones automotrices.

En el ámbito energético, el impacto de los vehículos eléctricos en los sistemas de distribución eléctrica es explorado por Zavala-Tubay, Pico-Mera y Pico-Mera desde Ecuador, ofreciendo perspectivas cruciales para la transición hacia una energía más limpia y eficiente.

Desde la Universidad de Guanajuato, México, Camaraza-Medina investiga el intercambio térmico en mezclas de H_2O y CO_2 , aportando a la comprensión fundamental de procesos físicos clave con implicaciones en diversas industrias, desde la ambiental hasta la industrial.

En el ámbito de los materiales compuestos, Jiménez-Pereira y Picoita-Camacho, del Instituto Superior Tecnológico Loja en Ecuador, optimizan el proceso VARTM para el prototipado de guarda-choques, destacando por su aplicación práctica y relevancia en la industria automotriz.

La inclusión de la inteligencia artificial en el diagnóstico médico es un tema crucial, como demuestra el trabajo de Dávila Olivos, Herrera Del Águila y Santos López de la Universidad Nacional de San Marcos en Perú, quienes desarrollan algoritmos de aprendizaje profundo para el diagnóstico de cáncer oral, mejorando así la precisión y velocidad de los diagnósticos médicos.

El análisis experimental de la cinemática en colisiones elásticas, investigado por Arcos Villagómez, Pillalaza, Rivera Gálvez, Michelena Rosero y Camacho Cañar desde la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, resalta por su enfoque interdisciplinario que une la física experimental con la ingeniería de sistemas.

Desde la Universidad de Guanajuato, Trujillo-Romero explora la localización de robots basada en redes neuronales y características visuales, avanzando en la automatización y precisión de sistemas robóticos.

Desde Pakistán, Haider de la Air University Islamabad investiga la integridad estructural de las estaciones de ala de aeronaves de combate, aplicando análisis de elementos finitos para mejorar la seguridad y rendimiento de aeronaves críticas.

Finalmente, desde la Universidad Autónoma del Estado de México, Ramírez Vergara, López-Chau y Rojas Hernández presentan el diseño y la evaluación de un innovador sistema cuentacuentos basado en inteligencia artificial generativa (IAG). Este sistema está destinado a niños de 4 a 6 años y tiene como objetivo promover la inclusión de personas con discapacidad.

Cada artículo refleja no solo el compromiso con la excelencia académica, sino también la diversidad de enfoques y colaboraciones internacionales que caracterizan a la investigación contemporánea. En nuestra labor como editores, es crucial promover y celebrar esta diversidad, asegurando que las voces y perspectivas de investigadores de todo el mundo sean escuchadas y valoradas. Esperamos que este número especial inspire nuevas colaboraciones y avances científicos que beneficien a la sociedad globalmente.

John Calle-Sigüencia, PhD

EDITOR JEFE

ÍNDICE

Arquitectura de IoT para el monitoreo de emisiones de gases contaminantes de vehículos y su validación a través de Machine Learning	9
IoT Architecture for Vehicle Pollutant Gas Emission Monitoring and Validation through Machine Learning	
Washington Torres Guin, José Sánchez Aquino, Samuel Bustos Gaibor, Marjorie Coronel Suárez	
Evaluación estructural de un vehículo tipo mototaxi usando herramientas de simulación: caso México	18
Structural Evaluation of a Three-Wheeler Vehicle Using Simulation Tools: A Case Study in Mexico	
Luis Cuautle-Gutiérrez, José de Jesús Cordero Guridi, Jesús Eduardo Olivares Rojas, Marjorie Nashira Pena Preza	
Los vehículos eléctricos y su impacto en el sistema eléctrico de distribución: Caso de estudio “Alimentador urbano de la ciudad de Portoviejo”	27
Electric Vehicles and Their Impact on the Electric Distribution System: A Case Study of the Urban Feeder in Portoviejo	
Arturo Zavala-Tubay, Hugo Pico-Mera, Gabriel Pico-Mera	
Intercambio térmico radiante en mezclas de H₂O y CO₂	36
Radiative heat transfer in H ₂ O and CO ₂ mixtures	
Yanan Camaraza-Medina	
Optimización del proceso VARTM, para el prototipado de un guardachoque, utilizando materiales compuestos híbridos	48
Optimization of the VARTM Process for Prototyping a Bumper Using Hybrid Composite Materials	
Diego Javier Jiménez-Pereira, Christian Augusto Picoita-Camacho	
Diagnóstico de cáncer oral mediante algoritmos de aprendizaje profundo	58
Diagnosis of oral cancer using deep learning algorithms	
Mayra Alejandra Dávila Olivos, Henry Miguel Herrera Del Águila, Félix Melchor Santos López	
Análisis experimental de la cinemática en la colisión elástica entre dos cuerpos durante el tiempo de contacto	69
Experimental analysis of the kinematics in the elastic collision between two bodies during the contact time	
Suyana Arcos Villagómez, Santiago Álvaro Pillalaza, Xavier Rivera Gálvez,	
César Michelena Rosero, Emilse Camacho Cañar	
Localización de robots basada en red neural utilizando características visuales	77
Neural network-based robot localization using visual features	
Felipe Trujillo-Romero	
Optimización de la integridad estructural de las estaciones de ala de aeronaves de combate: un enfoque de análisis de elementos finitos	90
Optimizing Structural Integrity of Fighter Aircraft Wing Stations: a Finite Element Analysis Approach	
Aun Haider Bhutta	
Cuentacuentos basado en IA generativa para promover la inclusión de personas con discapacidades	101
Storytelling Utilizing Generative AI to Foster Inclusion of Individuals with Disabilities	
Keren Mitsue Ramírez Vergara, Asdrúbal López-Chau, Rafael Rojas Hernández	
Normas editoriales	114
Guidelines	



ARQUITECTURA DE IoT PARA EL MONITOREO DE EMISIONES DE GASES CONTAMINANTES DE VEHÍCULOS Y SU VALIDACIÓN A TRAVÉS DE MACHINE LEARNING

IoT ARCHITECTURE FOR VEHICLE POLLUTANT GAS EMISSION MONITORING AND VALIDATION THROUGH MACHINE LEARNING

Washington Torres Guin^{1,*} , José Sánchez Aquino¹ ,
 Samuel Bustos Gaibor¹ , Marjorie Coronel Suárez¹

Recibido: 16-11-2023, Recibido tras revisión: 12-12-2023, Aceptado: 16-02-2024, Publicado: 01-07-2024

Resumen

Este estudio propone una arquitectura IoT para el monitoreo de emisiones de gases contaminantes en vehículos, en respuesta a la creciente preocupación por la contaminación del aire y el calentamiento global. La arquitectura se basa en un nodo equipado con sensores DHT22, MQ9 y MQ135 para capturar la temperatura, humedad y emisiones de gases, mismo que se comunica de manera efectiva a través de la red LTE para enviar los datos a la plataforma *ThingSpeak*. Se lleva a cabo un análisis de los niveles de contaminación de CO_2 , CO y CH_4 mediante los datos recopilados. Estos datos se validan mediante la revisión técnica de un vehículo de prueba. Posterior, se entrena una red neuronal artificial (ANN) utilizando una base de datos específica de emisiones de CO_2 de vehículos en Canadá, como resultado se obtiene un R^2 alto de 99,2 % y los valores de RMSE y MSE bajos, esto indican que el modelo está haciendo predicciones precisas y se ajusta bien a los datos de entrenamiento. La ANN tiene como objetivo predecir las emisiones de CO_2 y verificar los datos de CO_2 provenientes de la red IoT. La arquitectura demuestra su capacidad para el monitoreo en tiempo real y su potencial para contribuir a la reducción de la contaminación.

Palabras clave: contaminación vehicular, gases contaminantes, IoT, LTE, sensores

Abstract

This study proposes an IoT architecture for monitoring emissions of polluting gases in vehicles, in response to the growing concern about air pollution and global warming. The architecture is based on a node equipped with DHT22, MQ9, and MQ135 sensors to capture temperature, humidity, and gas emissions, respectively. This node effectively communicates through the LTE network to send the data to the ThingSpeak platform. An analysis of CO_2 , CO , and CH_4 pollution levels is conducted using the collected data. These data are validated through the technical review of a test vehicle. Subsequently, an Artificial Neural Network (ANN) is trained using a specific database of CO_2 emissions from vehicles in Canada. As a result, a high R^2 of 99.2 % is achieved, along with low values of RMSE and MSE, indicating that the model is making accurate predictions and fits well to the training data. The ANN aims to predict CO_2 emissions and verify CO_2 data from the IoT network. The architecture demonstrates its capability for real-time monitoring and its potential to contribute to pollution reduction.

Keywords: Vehicle pollution, pollutant gases, IoT, LTE, sensors

^{1,*}Facultad de Sistemas y Telecomunicaciones, Universidad Estatal Península de Santa Elena, Santa Elena, Ecuador.
 Autor para correspondencia ✉: wtorres@upse.edu.ec.

Forma sugerida de citación: Torres Guin, W.; Sánchez Aquino, J.; Bustos Gaibor, S. y Coronel Suárez, M. "Arquitectura de IoT para el monitoreo de emisiones de gases contaminantes de vehículos y su validación a través de Machine Learning," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 32, pp. 9-17, 2024. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n32.2024.01>.

1. Introducción

La urbanización acelerada y el aumento en la demanda de transporte han agravado los problemas ambientales asociados al transporte por carretera [1]. A pesar de la disminución temporal de las emisiones en 2020 debido a la pandemia de COVID-19, el calentamiento global persiste con el aumento de la contaminación atmosférica [2]. Los retos del cambio climático trascienden fronteras y afectan a nivel global, ya que la emisión de gases de efecto invernadero como metano (CH_4), hidrofluorocarbonos (HFC), dióxido de carbono (CO_2) altera el equilibrio entre la Tierra y la atmósfera. En particular, las emisiones de CO_2 se han convertido en un factor crucial en el agravamiento del calentamiento global, liberando aproximadamente ocho mil millones de toneladas anualmente debido a la quema de combustibles fósiles en el transporte, la calefacción y la producción de energía [3]. Estas emisiones, que provienen principalmente de la actividad industrial y vehicular, siendo los automóviles de pasajeros responsables del 75 % de las emisiones de dióxido de carbono [4].

Los vehículos pesados, que incluyen autobuses y camiones, contribuyen con el 25 % aproximadamente de las emisiones totales en carreteras, y existe una tendencia preocupante que podría aumentar este porcentaje si no se toman medidas adecuadas. A pesar de las regulaciones cada vez más estrictas que buscan supervisar la eficiencia del combustible y controlar las emisiones de gases de efecto invernadero, se ha evidenciado un notable aumento en la cantidad de automóviles en circulación. Este incremento se ha traducido en un aumento significativo en la cantidad de kilómetros recorridos por estos vehículos, lo que ha acentuado aún más su contribución a las emisiones de contaminantes atmosféricos [5].

La vigilancia de la contaminación en el ámbito vehicular resulta fundamental por varias razones [6,7]. Ofrece datos esenciales acerca del origen y la intensidad de la contaminación del aire en entornos de transporte público, privado, carga, entre otros, información crucial para la formulación de políticas y medidas destinadas a reducir la exposición y mejorar la calidad general del aire. Asimismo, este seguimiento contribuye a identificar enfoques efectivos para abordar el problema, como la implementación de combustibles más limpios y la adopción de tecnologías avanzadas, desempeñando un papel esencial en la búsqueda de soluciones sostenibles y en la promoción de entornos urbanos más saludables tanto para los viajeros como para la población en general.

Donde, el desafío radica en la carencia de datos precisos y confiables acerca de la calidad del aire en el transporte vehicular, lo que impulsa la necesidad de diseñar y probar un sistema de medición móvil capaz de suplir esta deficiencia [8]. La captura, el procesamiento y el análisis de datos sobre los niveles de contamina-

ción en el transporte urbano resultan cruciales para mejorar la comprensión de las fuentes de contaminación del aire en este entorno, y a su vez, incentivar la elaboración de políticas e intervenciones con miras a abordar este desafío.

A continuación, se presenta una revisión de las propuestas IoT para el monitoreo de emisiones. Senthilkumar *et al.* [9] describen un sistema integrado en el cual los sensores recopilan datos de calidad del aire y los transmiten a nodos de niebla. Moses [10] propone un esquema basado en la nube para monitorear la calidad del aire utilizando sensores que calculan niveles de contaminantes como NO_x , CO, O_3 , PM10, PM2.5 y SO_2 , junto con datos ambientales como humedad y temperatura. Los datos recopilados se actualizan en la nube a través de una infraestructura de Lora Gateway y nodos Lora. Se utiliza el análisis de series temporales junto con modelos de regresión de vectores de soporte y redes neuronales de perceptrón multicapa para predecir la concentración de partículas contaminantes. Behal y Singh [11] emplean el método ANFIS para prever la calidad del aire en función del nivel de contaminantes y el índice de calidad del aire modificado (m-AQI). Donde, un modelo de regresión de vectores de soporte se utiliza para pronosticar valores, lo que implica determinar una línea de mejor ajuste que sea resistente a valores atípicos.

Shetty *et al.* [12] aplican métodos de IoT para supervisar las tasas de emisiones vehiculares y utilizan datos reales a nivel mundial para pronosticar los niveles de monóxido de carbono. Wei *et al.* [13] emplean el monitoreo vehicular para proporcionar a los propietarios detalles sobre la contaminación actual en su ubicación y la tasa de emisiones de sus vehículos, todo ello con el respaldo de técnicas de aprendizaje automático para predecir la contaminación basándose en datos históricos y actuales recopilados por sensores. Mumtaz *et al.* [14] dan una solución que combina sensores de IoT avanzados con capacidades de aprendizaje automático para monitorear y predecir la calidad del aire en entornos interiores, lo que permite la medición de diversos contaminantes y en el trabajo de Mohamed [15] se utiliza una red de sensores IoT para detectar ocho tipos de contaminantes y, mediante técnicas de aprendizaje automático, se logra una alta precisión en la clasificación de la calidad del aire interior, con un 99,1 % de exactitud.

Por lo tanto, en un mundo cada vez más consciente de la importancia de la sostenibilidad y la reducción de la contaminación ambiental, la monitorización de emisiones de gases contaminantes en vehículos se ha vuelto un desafío crítico. La creciente urbanización y la expansión del parque automotor han planteado la necesidad imperiosa de controlar y mitigar la contaminación del aire, tanto para preservar la calidad del entorno como para salvaguardar la salud pública. En este contexto, la Internet de las Cosas (IoT) emerge

como una herramienta poderosa que permite la recopilación y análisis de datos en tiempo real, ofreciendo la capacidad de supervisar y gestionar las emisiones vehiculares de manera eficiente y efectiva.

Este proyecto se centra en el desarrollo de una arquitectura de IoT para la monitorización de emisiones de gases contaminantes en vehículos, respaldada por técnicas de Machine Learning. Esta arquitectura permitirá la recopilación en tiempo real de datos precisos sobre las emisiones de vehículos en funcionamiento, su posterior análisis y la validación de estos datos a través de algoritmos de aprendizaje automático. La implementación de esta propuesta reviste una importancia crítica por diversas razones.

- **Control de emision.** El monitoreo en tiempo real de las emisiones de vehículos ofrece la posibilidad de identificar y gestionar de manera proactiva fuentes de contaminación, lo que es esencial para alcanzar objetivos de calidad del aire y reducir el impacto ambiental.
- **Tecnología y sostenibilidad.** La combinación de IoT y Machine Learning representa un enfoque tecnológico avanzado que refuerza la sostenibilidad y demuestra cómo la innovación puede ser un motor de cambio positivo en la sociedad.

2. Materiales y métodos

En la siguiente sección se expone la arquitectura propuesta, así como los elementos que la componen, destinados a la construcción del nodo sensor para la adquisición de gases en un vehículo de prueba, específicamente un Kia Sportage del año 2012.

2.1. Arquitectura IoT propuesta

En esta arquitectura de Internet de las Cosas (IoT) (Figura 1), se ha diseñado un sistema completo para la monitorización de emisiones de gases contaminantes en vehículos, se toma como referencia las propuestas de [16, 17]. La arquitectura consta de varias capas que trabajan en conjunto para recopilar, almacenar y validar los datos de emisiones.

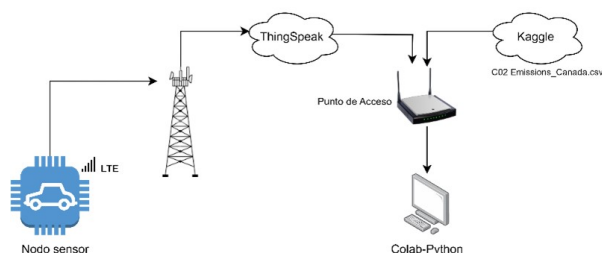


Figura 1. Arquitectura IoT para el monitoreo de gases contaminantes

A continuación, se describe la arquitectura basándose en sus capas y su funcionalidad.

- **Capa de percepción.** En la capa de percepción, se usa un nodo equipado con un sensor de temperatura DHT22, así como sensores MQ-135 y MQ-9 para la detección de gases. Este nodo es responsable de la captura de datos en tiempo real relacionados con la temperatura, humedad y la concentración de gases contaminantes en el aire.
- **Capa de red.** La capa de red o comunicación es esencial para transmitir los datos capturados por el nodo sensor. Se ha optado por utilizar la red LTE como medio de comunicación, lo que permite una conectividad confiable y amplia cobertura para el nodo sensor y posible escalabilidad de la red.
- **Capa de aplicación.** En la capa de aplicación se ha integrado la plataforma IoT ThingSpeak para almacenar y gestionar los datos recopilados por los sensores. ThingSpeak ofrece una interfaz amigable y permite el almacenamiento seguro de los datos a través del protocolo HTTP, lo que facilita su acceso y análisis posterior.
- **Análisis de los datos.** Una vez que los datos se encuentran en ThingSpeak, se procede a realizar análisis más detallados para verificar la distribución de los datos de emisiones de dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), metano (CH_4). Se utiliza la herramienta de Colab, una plataforma de colaboración para la programación en Python.
- **Validación de datos.** Con el objetivo de garantizar la precisión de los datos capturados por los sensores, se lleva a cabo una verificación exhaustiva que incluye pruebas fundamentadas en la revisión técnica de un vehículo de prueba. Además, se realiza una regresión utilizando una base de datos de emisiones de CO_2 de origen canadiense como punto de referencia para comprobar los datos que llegan de la plataforma IoT. Este procedimiento posibilita la comparación, validación y predicción.

2.2. Diseño del nodo sensor

El diseño del nodo sensor (Figura 2) se ha configurado de manera integral utilizando el controlador LILYGO® TTGO T-Call V1.4, que incorpora una variedad de características esenciales. Este dispositivo ofrece conectividad a través de la red LTE porque dispone de un módulo SIM800L, además de contar con la potencia del ESP32 para capacidades inalámbricas, como wifi y Bluetooth. Así mismo, el nodo sensor está equipado con un sistema de posicionamiento GPS incorporado,

lo que permite la geolocalización precisa de las mediciones. En cuanto a los sensores utilizados, se han seleccionado cuidadosamente para garantizar la obtención de datos precisos. El sensor DHT22, conocido por su fiabilidad, se encarga de medir la temperatura y la humedad del entorno. Por otro lado, los sensores MQ135 y MQ9 se utilizan para detectar la concentración de CO, CO_2 y metano (CH_4). Cabe destacar que los sensores DHT22 se conectan a uno de los puertos digitales disponibles en el controlador, mientras que los sensores MQ135 y MQ9 se conectan a puertos analógicos, lo que proporciona una interfaz versátil para la adquisición de datos. Esta configuración integral del nodo sensor permite una medición precisa y la recopilación de datos clave para la monitorización de emisiones de gases contaminantes en vehículos.

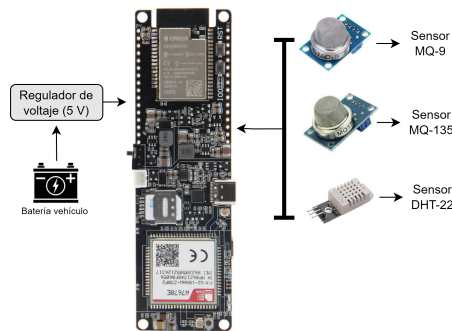


Figura 2. Nodo Sensor IoT

El sensor DHT22 opera con un voltaje de 3,3–5 VCC y es capaz de medir la humedad relativa del aire en un rango de 0–99 % RH, con una precisión de ± 2 % (a 25 °C) y una resolución de hasta 0,1 %. La temperatura se mide en el rango de –40 – 80 °C, con una precisión de $\pm 0,5$ °C y una resolución de 0,1 °C. El sensor tiene una velocidad de actualización de 1 Hz (reporta cada 1 segundo) y utiliza el protocolo Wire. Para su funcionamiento, se emplea la biblioteca DHT.h.

El sensor MQ-135 opera mediante un mecanismo de detección específico que involucra interacciones con gases, lo que resulta en variaciones en su resistencia eléctrica. A pesar de que el sensor no discrimina gases de forma intrínseca, se puede calibrar y configurar para detectar gases particulares en función de sus patrones de respuesta únicos. Al ajustar con precisión los parámetros del sensor y aplicar técnicas avanzadas de procesamiento de señales, es factible distinguir diversos gases y sus concentraciones, permitiendo al sensor diferenciar con eficacia entre gases como CO y CO_2 . De acuerdo con la información técnica proporcionada por el sensor, se establece que la resistencia de carga del sensor es de 20,1 k Ω , mientras que la resistencia del sensor en condiciones de aire limpio es de 10 k Ω . Con estos datos se presenta en la Figura 3 la curva de calibración del sensor con la ecuación de modelo, donde,

Ro se define como una constante que representa la resistencia del sensor en respuesta a una concentración de 0,4 mg/L, mientras que Rs denota la resistencia del sensor en otro contexto.

El sensor MQ-9 se utilizó para determinar la concentración de metano (CH_4). Los datos de salida analógica del sensor se envían a la entrada analógica del controlador. La conversión de los datos recibidos del convertidor analógico-digital (ADC) se realiza en un rango de 0 a 3,3 V. Las características y especificaciones, como la carga y la resistencia al aire fresco, son similares a las del MQ-135, ya que ambos sensores son del mismo fabricante y comparten los mismos valores, por ende, se aplican las mismas configuraciones.

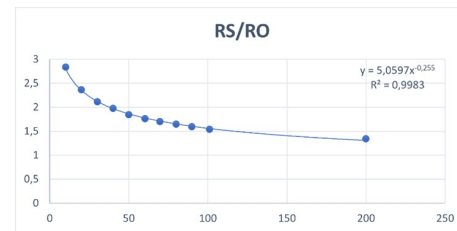


Figura 3. Curva de calibración del sensor MQ-135

2.3. Implementación del nodo sensor al vehículo

El nodo sensor IoT se posiciona siguiendo las indicaciones proporcionadas en la Figura 4, lo que permite una colocación estratégica de los sensores directamente en la salida del tubo de escape del vehículo. El controlador, por su parte, se sitúa de manera segura dentro del vehículo, estableciendo una conexión directa con la computadora a bordo. A través de esta conexión, se logra la visualización en tiempo real de los datos capturados por el sensor. Además, el sensor se conecta a la plataforma ThingSpeak mediante la tecnología LTE, utilizando el protocolo HTTP para la transmisión y almacenamiento eficiente de los datos recopilados. Este diseño integral permite un monitoreo efectivo de las emisiones de gases contaminantes en vehículos, proporcionando información valiosa y en tiempo real. Para la parte de energía el dispositivo se conecta a la batería del vehículo.

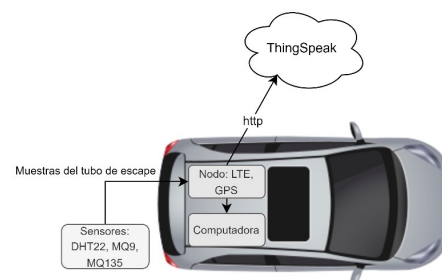


Figura 4. Disposición del nodo sensor IoT en el vehículo

En la Figura 5 se presenta claramente el nodo sensor físico instalado en el vehículo para la recolección de muestras.

En la Figura 6 se evidencian los sensores que se colocaron en el tubo de escape del vehículo.

Es importante destacar que el GPS se emplea con el propósito de visualizar la posición precisa del vehículo y obtener un detallado registro de la trayectoria que ha seguido.

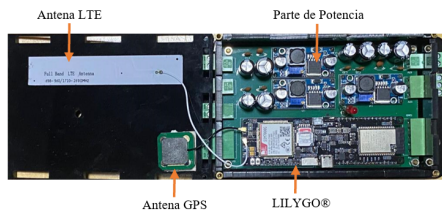


Figura 5. Nodo sensor IoT instalado

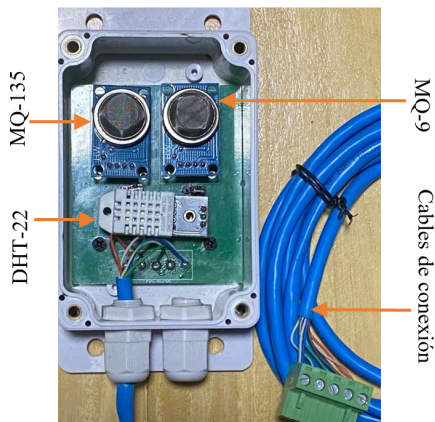


Figura 6. Sensores para la toma de datos

3. Resultados y discusión

En primer lugar, se presentan los resultados obtenidos a partir de las 50 muestras recopiladas del tubo de escape con el motor en ralentí y con ciertos cambios en las revoluciones de este para identificar la variabilidad en la toma de los datos. Estas muestras revelan los niveles de contaminantes, específicamente CH_4 (metano), CO_2 y CO. Los datos proporcionados por los sensores se expresan en partículas por millón (ppm), y los resultados ofrecen una visión detallada de las emisiones.

Al analizar los resultados, se observa que la concentración de CH_4 (Figura 7) varía aproximadamente entre 45 y 65 ppm, reflejando la distribución de los datos. Además, en la Figura 8 se destaca que el CO muestra oscilaciones en el rango de 26 000 a 38 000 ppm y CO_2 se evidencia que sus niveles oscilan entre 121 000 y 140 000 ppm.

Es relevante señalar que estos valores se sitúan dentro de los rangos especificados, tal como se menciona en el estudio [17]. Estos hallazgos subrayan la importancia de monitorear de forma detallada las emisiones vehiculares, proporcionando una comprensión clara de la variabilidad de los contaminantes del motor. Como dato importante las muestras se toman de 3 a 4 minutos aproximadamente esto debido al tiempo que lleva el controlador en procesar y publicar estos datos en la plataforma ThingSpeak.

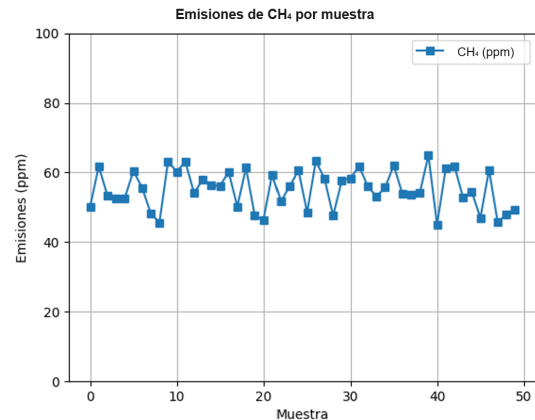


Figura 7. Gráfica de los datos de CH_4

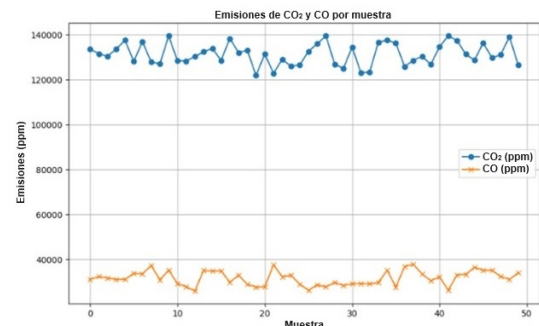


Figura 8. Gráfica de los datos de CO y CO_2

La representación gráfica de los datos de temperatura y humedad no fue realizada porque estos parámetros no varían bruscamente, según la posición del sensor en el tubo de escape. Durante las mediciones la temperatura demostró oscilaciones mínimas, manteniéndose en un rango constante de aproximadamente 30 a 37 °C. Simultáneamente, la humedad exhibió una estabilidad similar, fluctuando entre el 80 % y el 99 %.

La validación de la captura de datos se llevó a cabo mediante la realización de una exhaustiva revisión técnica vehicular en un SUV Kia Sportage del año 2012, utilizado como vehículo de prueba. Como resultado de esta evaluación, se obtuvieron concentraciones de CO_2 en el rango de 12 % a 14 % con el motor en ralentí, y concentraciones de CO en el rango de 2,6 a 3,8 %. Según lo indicado por Segura [18], se puede aplicar este conocimiento para estimar las emisiones en

ppm, situando el CO_2 en su nivel máximo estimado de 140 000 ppm y el CO en 38 000 ppm.

Esta información respalda la confiabilidad de los datos recopilados, ya que los resultados de la revisión técnica vehicular coinciden con las mediciones obtenidas por los sensores. La calibración precisa del sensor para la captura de estos gases refuerza la precisión de las estimaciones, demostrando que la concentración de CH_4 también es precisa y confiable.

Para evaluar el nivel de contaminación del vehículo, centrándonos en el CO_2 como una variable de referencia crucial dada su significativa contribución a las emisiones vehiculares, se realiza una conversión con el objetivo de obtener las unidades de g/km que representan los gramos de contaminación por kilómetro recorrido. La relevancia de este dato radica en su verificación a través de la fuente o ficha técnica de vehículo que estipula un nivel de contaminación de 158 g/km de CO_2 en entornos urbanos.

Por lo tanto, para determinar cuánto dióxido de carbono (CO_2) se libera al recorrer un kilómetro, si el vehículo marco un porcentaje de 14 % de concentración, ese porcentaje significa que el 14 % del volumen del gas en el tubo de escape del vehículo es CO_2 , y el 86 % restante es otro tipo de gases de escape, como nitrógeno, oxígeno e hidrocarburos no quemados (HC) entre otros.

Para calcular la cantidad de CO_2 , se necesita considerar varios factores, como la eficiencia del vehículo, la cantidad de combustible que quema y la cantidad de CO_2 que se produce por litro de combustible quemado.

Eficiencia del vehículo. Este parámetro se toma de la ficha técnica del vehículo, donde se evidencia que tiene un consumo de combustible de 5,7 litros por cada 100 kilómetros.

Cantidad de CO_2 por litro de combustible. La cantidad de CO_2 producida por la quema de un litro de gasolina varía según la composición exacta del combustible, para este caso esta alrededor de 2,8 kg de CO_2 por litro de gasolina, con estos parámetros se procede aplicar la siguiente ecuación (1) para encontrar el CO_2 en g/km.

$$\begin{aligned} CO_2 \left(\frac{g}{km} \right) &= C_{l/km} * CO_{2kg/l} * 100_{g/kg} \\ CO_2 \left(\frac{g}{km} \right) &= 0.057_{l/km} * 2,8_{\frac{kg}{l}} * 100_{\frac{g}{kg}} \\ &= 159,6 \text{ g/km} \end{aligned} \quad (1)$$

Este cálculo demuestra una aproximación casi exacta con la ficha técnica del vehículo donde se tiene una estimación de 158 g/km de contaminación de CO_2 .

Con este dato de conversión establecido, se procede a desarrollar un modelo de red neuronal artificial (ANN) con el objetivo de prever las posibles emisiones de gases contaminantes en el parque automotor. Para este propósito, se usa una base de datos de Kaggle [19] que alberga información sobre emisiones de gases contaminantes vehiculares en Canadá. La elección de esta

base de datos se fundamenta en la presencia de información sobre el mismo vehículo utilizado en nuestras pruebas de sensores. De esta manera, se crea un modelo de aprendizaje que se adapta a nuestro escenario, permitiendo la predicción del nivel de contaminación de CO_2 .

La base de datos contiene parámetros cruciales, como la marca (Make), modelo (Model), clase de vehículo (Vehicle Class), tamaño del motor (Engine Size), número de cilindros (Cylinders), tipo de transmisión (Transmission), tipo de combustible (Fuel Type), consumo de combustible en ciudad (Fuel Consumption City (l/100 km)), consumo de combustible en avenidas (Fuel Consumption Hwy (l/100 km)), así como las emisiones de CO_2 (CO_2 Emissions) medidas en gramos por kilómetro (g/km). Durante el análisis, se realiza una correlación entre estos parámetros y las emisiones de CO_2 para identificar las variables con una relación más significativa. Aquellas variables que presentan una correlación notable se seleccionan para el entrenamiento del modelo de red neuronal artificial (ANN), focalizando así el modelo en las características que más influyen en las emisiones de CO_2 y mejorando su capacidad predictiva.

Esta correlación se puede evidenciar en la Figura 9 donde se especifica que las variables: tamaño del motor, número de cilindros, consumo de combustible en ciudad y consumo de combustible en avenidas son las que más influyen en las emisiones de CO_2 .

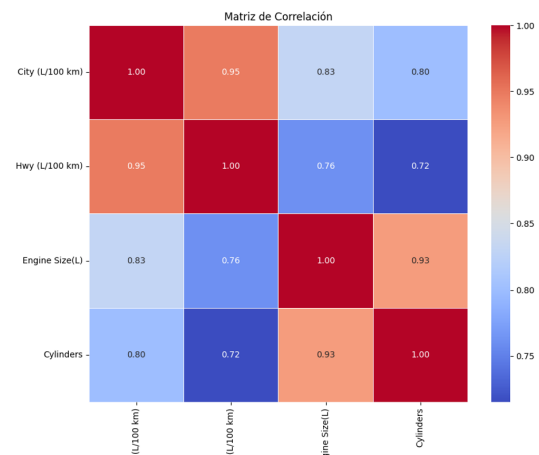


Figura 9. Correlación de variables que influyen en las emisiones de CO_2

Con la información derivada de la correlación, se avanza en la creación del modelo de aprendizaje automático utilizando una red neuronal artificial (ANN). En este proceso, se configura el modelo mediante la librería TensorFlow de Python, sobre la base de la siguiente estructura (Figura 10).

Donde, la estructura del modelo se define como secuencial, lo que implica una arquitectura de red neuronal donde las capas se disponen secuencialmente. Se

observan cuatro capas densamente conectadas (Dense), numeradas como dense, $dense_1$, $dense_2$, y $dense_3$. La primera capa tiene 64 neuronas, la segunda tiene 32, la tercera tiene 16, y la capa de salida tiene 1 neurona. Cada capa utiliza la función de activación 'relu' (Rectified Linear Unit), excepto la capa de salida que emplea la activación 'linear' que corresponde a las emisiones de CO_2 . Los parámetros se calculan automáticamente y se detallan en la Figura 10, donde se muestra la cantidad de parámetros entrenables (Trainable params) y la suma total de parámetros, que asciende a 9089. Estos parámetros representan los pesos y sesgos de la red neuronal que se ajustarán durante el proceso de entrenamiento para optimizar el rendimiento del modelo.

Model: "sequential"

Layer (type)	Output Shape	Param #
dense (Dense)	(None, 64)	6464
dense_1 (Dense)	(None, 32)	2080
dense_2 (Dense)	(None, 16)	528
dense_3 (Dense)	(None, 1)	17
Total params: 9,089		
Trainable params: 9,089		
Non-trainable params: 0		

Figura 10. Estructura de la ANN

Posterior al entrenamiento del modelo, se presenta la Figura 11 que corresponde la pérdida durante el entrenamiento o model loss. Que especifica que cuantas más épocas pasan, se espera que la pérdida disminuya y la precisión aumente, lo que indica que el modelo está aprendiendo y mejorando en su capacidad para hacer predicciones precisas. Por lo tanto, la Figura 11 da a conocer que el modelo está correctamente entrenado.

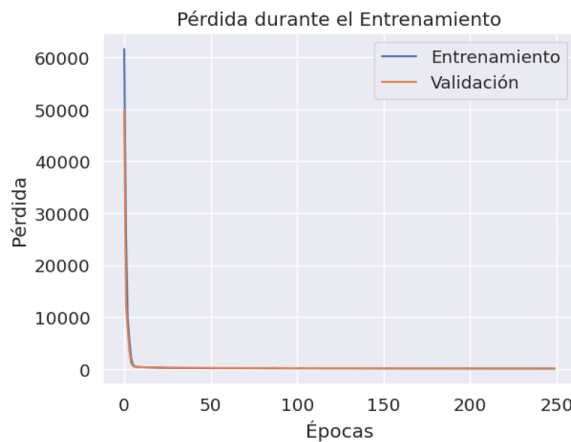


Figura 11. Pérdida durante el entrenamiento

Para evaluar el desempeño de un modelo de aprendizaje automático en sus predicciones, es fundamental medir su precisión. Esto se logra mediante el uso de

métricas de rendimiento como la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), el error cuadrático medio (MSE) y el coeficiente de determinación (R^2). Estas métricas ayudan a confirmar la precisión de los modelos de regresión [19], desempeñan un papel crucial en la evaluación y perfeccionamiento de los modelos de aprendizaje, permitiendo una comprensión más profunda de su capacidad para explicar y predecir datos, estas métricas se presentan a continuación en la ecuación (2):

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{real}^{(i)} - y_{pred}^{(i)})^2$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{real}^{(i)} - y_{pred}^{(i)})^2}$$

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}}$$

Donde SS_{res} se define como la suma de los cuadrados de las discrepancias entre los valores observados y los valores predichos. Por otro lado, SS_{tot} representa la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores observados y la media de dichos valores. Un valor de R^2 cercano a 1 indica un buen ajuste del modelo, mientras que un valor cercano a 0 indica que el modelo no explica la variabilidad de los datos.

Los resultados de las métricas del modelo son altamente prometedores: el coeficiente de determinación (R^2) alcanza un destacado 0,992, indicando una capacidad sobresaliente para explicar la variabilidad en los datos. El error cuadrático medio (MSE) se sitúa en 20,59, lo cual demuestra una magnitud promedio de errores cuadráticos razonablemente baja, mientras que la raíz del error cuadrático medio (RMSE) de 4,53 confirma una precisión significativa en las predicciones del modelo. Estos resultados sugieren una fuerte capacidad del modelo para prever las emisiones de gases contaminantes en el parque automotor, respaldando su idoneidad para aplicaciones predictivas, estos valores se los evidencia en la Figura 12.

Coefficiente de Determinación (R^2): 0.9922332006414919
 Error Cuadrático Medio (MSE): 20.59925370801521
 Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE): 4.538640072534416

Figura 12. Resultados de las métricas del modelo

Para evaluar la eficacia del modelo desarrollado, se llevó a cabo una prueba que comparó los valores reales de las emisiones de gases contaminantes con las predicciones generadas por la red neuronal (Figura 13). En este análisis visual se buscó la proximidad de los puntos a una línea diagonal ideal, la cual representaría una predicción perfecta. La dispersión y la distribución de los puntos en la gráfica permiten una evaluación rápida de la capacidad del modelo para capturar la variabilidad en los datos reales. Una alineación cercana a la diagonal indica una predicción precisa, mientras que una dispersión significativa podría indicar áreas de mejora en la capacidad predictiva del modelo. Este

enfoque proporciona una evaluación intuitiva y visual de la calidad de las predicciones del modelo en relación con los datos reales.

Por lo tanto, la implementación de una ANN en el monitoreo de emisiones de gases contaminantes en vehículos presenta mejoras sustanciales y complementa eficazmente los métodos de monitoreo convencionales. A diferencia de enfoques más simples y lineales, la ANN pueden capturar relaciones no lineales complejas en los datos, ofreciendo una precisión mejorada en las predicciones. Su capacidad para adaptarse dinámicamente a cambios proporciona un monitoreo más robusto y adaptable. Además, la ANN pueden manejar eficientemente datos multidimensionales y complejos, procesando simultáneamente múltiples entradas, como temperatura, humedad y diversas emisiones de gases. La capacidad de aprendizaje automático y mejora continua permite una evolución constante en la precisión a medida que se acumulan más datos sobre emisiones vehiculares.

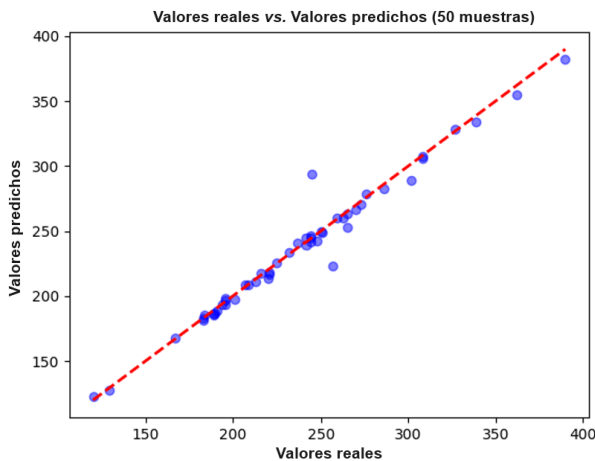


Figura 13. Prueba del modelo

4. Conclusiones

El presente artículo aborda de manera integral el monitoreo de emisiones de gases contaminantes en vehículos, desde la construcción del nodo sensor dedicado a la toma de datos hasta la creación de un modelo de red neuronal artificial (ANN) para predecir las emisiones de CO_2 . La implementación del nodo sensor, equipado con sensores DHT22, MQ9 y MQ135, demostró su eficacia al capturar datos clave como temperatura, humedad y concentraciones de gases durante las pruebas en un vehículo SUV Kia Sportage 2012. La validación de estos datos, realizada a través de una revisión técnica vehicular, respalda la precisión y confiabilidad de las mediciones.

Posterior, se aplicó un modelo de ANN utilizando datos de emisiones vehiculares de Canadá, centrándose en variables claves identificadas mediante correlación.

Los resultados del modelo, con un coeficiente de determinación (R^2) del 99,2 %, indican una capacidad efectiva para prever las emisiones de CO_2 . Estos hallazgos sugieren que la combinación de tecnologías de sensores avanzados y modelos de aprendizaje automático puede ofrecer una solución efectiva para el monitoreo y predicción de emisiones vehiculares, contribuyendo así a la gestión y mitigación de la contaminación ambiental.

Como trabajo futuro la arquitectura propuesta se implementará en los buses urbanos, donde la ANN podría contribuir significativamente al control de la calidad del aire y estado vehicular, permitiendo una gestión más efectiva de las políticas de circulación y planificación.

Referencias

- [1] J. Krause, C. Thiel, D. Tsokolis, Z. Samaras, C. Rota, A. Ward, P. Prenninger, T. Coosemans, S. Neugebauer, and W. Verhoeve, "EU road vehicle energy consumption and CO_2 emissions by 2050 – Expert-based scenarios," *Energy Policy*, vol. 138, p. 111224, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111224>
- [2] M. M. Ajmal, M. Khan, M. K. Shad, H. AlKatheeri, and F. Jabeen, "Empirical examination of societal, financial and technology-related challenges amid COVID-19 in service supply chains: evidence from emerging market," *The International Journal of Logistics Management*, vol. 34, no. 4, pp. 994–1019, Jan 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1108/IJLM-04-2021-0220>
- [3] J. Lynn and N. Peeva, "Communications in the IPCC's Sixth Assessment Report cycle," *Climatic Change*, vol. 169, no. 1, p. 18, Nov 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03233-7>
- [4] Z. Yang and A. Bandivadekar, *Light-duty vehicle greenhouse gas and fuel economy standards*. The International Council on clean Transportation, 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/4anzh8u>
- [5] R. Guensler, "Data needs for evolving motor vehicle emission modeling approaches," *The University of California, Transportation Center*, 1993. [Online]. Available: <https://bit.ly/3THUO5>
- [6] Y. Lu, *Traffic-Related PM2.5 Air Pollution and Schools in Proximity to Major Roadways in Shanghai, China*. University of Washington, Department of Urban Design and Planning, 2016. [Online]. Available: <https://bit.ly/43KjOgq>
- [7] N. Kozarev and N. Ilieva, "Plume rise in particular meteorological conditions," *Journal*

- of the University of Chemical Technology and Metallurgy, vol. 46, pp. 305–308, 01 2011. [Online]. Available: <https://bit.ly/3VLqMQ3>
- [8] N. Barmpareos, V. D. Assimakopoulos, M. N. Assimakopoulos, and E. Tsairidi, “Particulate matter levels and comfort conditions in the trains and platforms of the Athens underground metro,” *AIMS Environmental Science*, vol. 3, no. 2, pp. 199–219, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3934/environsci.2016.2.199>
- [9] R. Senthilkumar, P. Venkatakrishnan, and N. Balaji, “Intelligent based novel embedded system based IoT enabled air pollution monitoring system,” *Microprocessors and Microsystems*, vol. 77, p. 103172, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2020.103172>
- [10] L. Moses, Tamilselvan, Raju, and Karthikeyan, “IoT enabled Environmental Air Pollution Monitoring and Rerouting system using Machine learning algorithms,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 955, no. 1, p. 012005, nov 2020. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/955/1/012005>
- [11] V. Behal and R. Singh, “Personalised healthcare model for monitoring and prediction of airpollution: machine learning approach,” *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, vol. 33, no. 3, pp. 425–449, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/0952813X.2020.1744197>
- [12] C. Shetty, B. Sowmya, S. Seema, and K. Srinivasa, “Chapter eight - air pollution control model using machine learning and IoT techniques,” in *The Digital Twin Paradigm for Smarter Systems and Environments: The Industry Use Cases*, ser. Advances in Computers, P. Raj and P. Evangeline, Eds. Elsevier, 2020, vol. 117, no. 1, pp. 187–218. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/bs.adcom.2019.10.006>
- [13] “Guest Editorial: Special Section on Integration of Big Data and Artificial Intelligence for Internet of Things,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16, no. 4, pp. 2562–2565, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TII.2019.2958638>
- [14] R. Mumtaz, S. M. H. Zaidi, M. Z. Shakir, U. Shafi, M. M. Malik, A. Haque, S. Mumtaz, and S. A. R. Zaidi, “Internet of Things (IoT) Based Indoor Air Quality Sensing and Predictive Analytic—A COVID-19 Perspective,” *Electronics*, vol. 10, no. 2, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/electronics10020184>
- [15] M. Abdel-Basset, G. Manogaran, M. Mohamed, and E. Rushdy, “Internet of things in smart education environment: Supportive framework in the decision-making process,” *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, vol. 31, no. 10, p. e4515, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/cpe.4515>
- [16] M. Montaña Blacio, J. González-Escarabay, O. Jiménez-Sarango, L. Mingo-Morocho, and C. Carrión-Aguirre, “Design and deployment of an IoT-based monitoring system for hydroponic crops,” *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, no. 30, pp. 9–18, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17163/ings.n30.2023.01>
- [17] M. Montaña Blacio, V. García Santos, D. Jaramillo Chamba, W. Torres Guin, and L. Chuquimarca Jiménez, “Empowering Low-Power Wide-Area Networks: Unlocking the Potential of Sigfox in Local Transmission,” in *Advanced Research in Technologies, Information, Innovation and Sustainability*, T. Guarda, F. Portela, and J. M. Diaz-Nafria, Eds. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 417–429. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-031-48930-3_32
- [18] J. K. Segura Gómez, *Prototipo de un sistema IoT para medición de gases de efecto invernadero*. Universidad Santo Tomás. Colombia, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3J4OvDl>
- [19] Kaggle. (2020) CO₂ Emission by Vehicles. Kaggle. [Online]. Available: <https://bit.ly/3J7Navw>



EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE UN VEHÍCULO TIPO MOTOTAXI USANDO HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN: CASO MÉXICO

STRUCTURAL EVALUATION OF A THREE-WHEELER VEHICLE USING SIMULATION TOOLS: A CASE STUDY IN MEXICO

Luis Cuautle-Gutiérrez¹ , José de Jesús Cordero Guridi^{1,*} ,
 Jesús Eduardo Olivares Rojas¹ , Nashira Pena Preza²

Recibido: 14-05-2023, Recibido tras revisión: 28-03-2024, Aceptado: 23-04-2024, Publicado: 01-07-2024

Resumen

El mototaxi es un vehículo de tres ruedas y con techo que se usa como medio de transporte popular en México, generalmente para recorrer caminos cortos a cambio de dinero, de la misma forma que opera un taxi. Esta investigación presenta el análisis estructural de un vehículo tipo mototaxi empleado en México, para evaluar su desempeño y seguridad, teniendo en cuenta que es un medio de transporte utilizado por muchas personas. Se empleó una metodología de diseño y desarrollo de producto, utilizando simulaciones de deformación torsionales para validar la nueva geometría, minimizando las torsiones en lo posible, tratando de mejorar la seguridad del mototaxi, así como la posición correcta del vehículo. Mediante el diseño asistido por computadora se probaron las torsiones existentes en la carcasa, determinando las condiciones de operación por las que generalmente es sometido el sistema. Los resultados obtenidos en la estructura vehicular seleccionada son para la rigidez por flexión de 6508,15 N/mm, la rigidez torsional de 27,35 KNm/° y el rango de frecuencias naturales en 8-21 Hz, valores que muestran que la estructura presenta condiciones favorables mediante esfuerzos de resistencia por flexión y la frecuencia de operación de la estructura, pero carencias en los resultados torsionales, generando así una estructura insegura para los ocupantes del mototaxi. Es necesario que los desarrolladores de tecnología como los legisladores nacionales actúen en favor de mejorar sus condiciones estructurales.

Palabras clave: estructural, mototaxi, seguridad, ANSYS, CAE, simulación

Abstract

The mototaxi, a three-wheeled vehicle equipped with a roof, is a widely utilized mode of transportation in Mexico. Typically, it is employed for short-distance journeys in exchange for payment, similar to the operation of a conventional taxi. This study conducts a structural analysis of a mototaxi-type vehicle utilized in Mexico to assess its performance and safety. It underscores the significance of this mode of transportation, widely relied upon by numerous individuals. A product design and development methodology was employed, utilizing torsional deformation simulations to validate the new geometry. The objective was to minimize torsions as much as possible, thereby enhancing the motorcycle taxi's safety and ensuring the vehicle's correct positioning. Through computer-aided design, the prevailing torsions within the casing were assessed, establishing the operating conditions to which the system is commonly subjected. The findings from the chosen vehicular structure reveal a flexural rigidity of 6,508.15 N/mm, torsional rigidity of 27.35 KNm/°, and a range of natural frequencies between 8-21 Hz. These values indicate favorable resistance against bending forces and operational frequency. However, the torsional results exhibit deficiencies, suggesting an unsafe structure for all motorcycle taxi occupants. Consequently, technology developers and national legislators should prioritize enhancing the structural integrity of such vehicles.

Keywords: Structural, mototaxi, safety, ANSYS, CAE, simulation

^{1,*}Facultad de Ingeniería Industrial, Logística, Manufactura y Automotriz, Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, México. Autor para correspondencia ✉: josejesus.cordero@upaep.mx.

²Benemérita Universidad Autónoma de Puebla – México.

Forma sugerida de citación: Cuautle-Gutiérrez, L.; Cordero Guridi, J. J.; Olivares Rojas, J. E. y Pena Preza, N. "Evaluación estructural de un vehículo tipo mototaxi usando herramientas de simulación: Caso México," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 32, pp. 18-26, 2024. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n32.2024.02>.

1. Introducción

La baja oferta y la limitada cobertura del transporte público en países en desarrollo han provocado que en diversas ciudades del mundo se presente el fenómeno denominado mototaxismo, el uso de la motocicleta como transporte público.

Un mototaxi es un medio de transporte de tres ruedas y techo que permite a las personas satisfacer sus necesidades de movilidad a un costo reducido, de la misma manera que un taxi. Este presta servicios no suministrados por los otros medios de transporte. Se trata de viajes completos y de trayectos iniciales y terminales que se efectúan en zonas densas congestionadas o inaccesibles a otros vehículos motorizados por falta de vías. Estos viajes son simultáneamente largos y arduos para realizarlos a pie y demasiado cortos para constituir un mercado comercialmente atractivo para los otros tipos de transporte público.

El mototaxi nace en París en 1999, como un medio de traslado novedoso y efectivo para cubrir las necesidades de los pasajeros que se desplazaban entre los dos aeropuertos de la ciudad [1].

Desde hace unos veinte años en Ciudad de México y en otros estados de la República existe este tipo de transporte, siendo las más comunes: las motos con calandria y los motocarros de cabina incorporada [2].

El mototaxi responde a necesidades de transporte específicas, pero no satisfechas y representa más un complemento que un competidor de las otras formas de transporte público. Su mayor ventaja consiste en ser ligeros, rápidos y fáciles de estacionar favoreciendo al usuario a recorrer trayectos cortos en menor tiempo. El Instituto Nacional de Estadística y Geografía estima que en la Ciudad de México y su área metropolitana se toman más de 273 000 viajes en mototaxi cada día, lo que representa el 3,7 % de todos los viajes en transporte público [3].

En Juchitán de Zaragoza, Oaxaca, México se emplea regularmente como mototaxi el modelo King por su versatilidad en el chasis, instrumentación, motor, potencia y torque. Este modelo alcanza una velocidad máxima de 56 kilómetros con un peso en orden de marcha de 300 kilogramos [4].

Los mototaxis se encuentran en la categoría de vehículos menores automotores junto con bicimotos, motonetas, motocicletas, triciclos motorizados, cuatrimotos y similares [5]. En el sector del mototaxi se tienen diversos problemas como la congestión, infraestructura vial, normas reguladoras y de seguridad [6]. Alrededor del mundo, el uso del mototaxi ha mostrado impactos negativos sobre el medioambiente, la estructura social y la seguridad vial.

Las externalidades negativas sobre el medioambiente se refieren principalmente a la producción de contaminantes, debido a la falta de mantenimiento de los vehículos y a la mala calidad del combustible [7].

En el aspecto social, el mototaxi en el estado de México ofrece empleo informal como conductor de mototaxis tanto para hombres como para mujeres con un ingreso promedio de \$1236,00 semanales. Los conductores tienen una escolaridad de secundaria y bachillerato, siendo la unión libre el estado civil más frecuente [8]. Por su parte, en el estado de Puebla existe un aproximado de más de diez mil mototaxistas en más de sesenta municipios [9].

Respecto a los problemas de seguridad vial, los mototaxis son responsables de un sinnúmero de graves accidentes de tránsito.

A continuación, se muestran en la Tabla 1, algunas características de este tipo de vehículos, que hacen referencia al problema que existe sobre la seguridad de estos.

Tabla 1. Características de los mototaxis

Característica	Descripción
Oferta	Elevada (comunidad en general)
Capacidad	Seis ocupantes (6), más equipaje
Comodidad	Baja
Seguridad	Baja (accidentes de tráfico)
Espacio en cabina	Reducido
Accidentes de tráfico	Grave por carencia de equipo de seguridad (casco, cinturones de seguridad, bolsas de aire).
Ruido	Alto. Esto puede provocar daños al oído humano por altos decibelios.

Además, el chasis generalmente se caracteriza por ser el esqueleto del vehículo, principalmente porque en él se ensamblan los demás componentes que hacen posible su correcto funcionamiento. Es de suma importancia que este debe ser lo suficientemente fuerte para soportar golpes, torceduras, vibraciones y otras tensiones, presentes en la actividad operativa.

Otra parte fundamental es la legislación, debido a que todo vehículo que circule por las calles, debe estar regulado por ciertas instituciones y leyes. En muchas entidades federativas de México, el mototaxi no está regulado. En el estado de Puebla, los lineamientos para los mototaxis están reflejados en la ley del transporte del estado de Puebla en los artículos 12 y 37 [10].

Por ende, la presente investigación busca evaluar la estructura de este medio de transporte y de esa manera determinar la seguridad ofrecida por los prestadores de servicio a sus usuarios.

2. Materiales y métodos

Para la evaluación del desempeño y seguridad del vehículo tipo mototaxi se utilizó una metodología de diseño y desarrollo de producto, empleando un modelo digital de la estructura de un vehículo de tres ruedas. Para ello se siguieron las siguientes fases: *benchmarking*, caracterización técnica, desarrollo de modelo de análisis y evaluación estructural.

En la etapa de *benchmarking* se consideraron cuatro marcas líderes en México: TSV, ATUL, KingWay y Bajaj y sus principales modelos. Se analizaron ocho características de interés: la potencia máxima, el torque máximo, consumo, capacidad de carga, frenos, chasis y barra estabilizadora presentadas en la Tabla 2.

Tabla 2. Valoración de las marcas de mototaxis

Modelo	TSV	ATUL	KingWay	Bajaj
Suspensión	4	4	3	4
Carga	5	3	4	3
c/Combustible	2	3	4	2
Sistema de frenos	3	3	3	3
Transmisión	3	3	4	3
Dimensiones	3	4	3	3
Chasis	4	3	2	5
Enfriamiento	5	4	3	4
Mantenimiento	5	4	4	4

Con los datos obtenidos, se calificó cada vehículo con la finalidad de obtener el que mostrará las mejores cualidades. Para esta nueva etapa se consideraron nueve características definidas por los autores, las calificaciones consistieron en una escala de 5 puntos donde 1 es deficiente y 5 es óptimo, respectivamente; estas se presentan en la Tabla 2. El mayor puntaje lo obtuvo la marca TSV, con el modelo King Duramax.

Las calificaciones fueron asignadas por consenso de los autores, de acuerdo con los promedios obtenidos se eligió el King Duramax con un resultado de 3,71. Es importante mencionar que se obtuvieron resultados muy cercanos debido a que los cuatro modelos analizados se encuentran en una gama de características y prestaciones muy parecida, por lo tanto, tienen elementos similares.

En la caracterización técnica, el TVS Group, empresa hindú que ocupa el tercer lugar, es el mayor fabricante de vehículos de dos ruedas en la India, exporta en la actualidad a más de sesenta países. Es una empresa que se caracteriza por ofrecer vehículos de calidad que se anticipen a las necesidades del cliente. En México, Motocarros TVS, la rama dedicada a la comercialización de vehículos de tres ruedas, es parte de Kawasaki con el respaldo de Grupo Motomex.

La unidad seleccionada fue la King Duramax 2020 mostrada en la Figura 1.

De la cual se muestran algunas características técnicas en la Tabla 3.

En la etapa de desarrollo del modelo CAD de análisis se contó con software de CAD y CAE como CATIA V5 2020 y Ansys 2020.



Figura 1. King Duramax 2020 [11].

Tabla 3. Características técnicas del King Duramax 2020

Propiedad	Valor
Potencia máxima	10 Hp @ 4750 RPM
Torque máximo	18 Nm @ 2750 RPM
Desplazamiento	225 cc
Velocidad máxima	63 km/h
Tipo de frenos	Tambor hidráulico
Tipo estructura	Semimonocasco formado por elementos prensados longitudinales y transversales
Material estructura	Metal
Peso en vacío	399 kg
Altura sobre suelo (con carga)	169 mm
Dimensiones	Largo: 2647 mm Ancho: 1329 mm Alto: 1740 mm

A partir de los datos recopilados del vehículo tipo mototaxi del benchmarking, se propuso el modelado de una configuración similar conformado por una estructura de semimonocasco formado por elementos prensados longitudinales y transversales, también conocida como estructura tipo escalera o tipo chasis tal y como se muestra en la Figura 2.

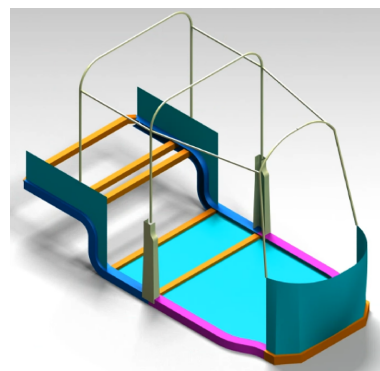


Figura 2. Estructura automotriz tipo escalera o chasis

Tomando en consideración la información obtenida del fabricante TVS, se desarrolló un modelo que contiene 30 componentes, siendo principalmente modelados aquellos que tienen relevancia y necesidad para el análisis de la estructura del vehículo, entre las cuales

se tienen los elementos del chasis y paneles inferiores, así como algunos paneles exteriores, como se muestra en la Figura 3.

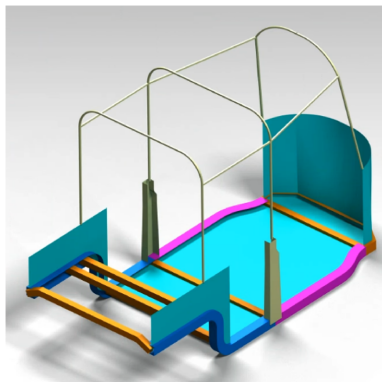


Figura 3. Modelo CAD de estructura

En la Figura 4 se muestran los componentes frontales de la estructura, removiendo el panel frontal, los cuales muestran componentes de chasis y paneles.

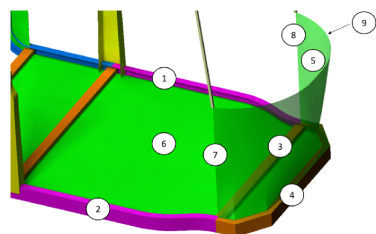


Figura 4. Elementos frontales del chasis

En la Figura 5 se aprecian los elementos intermedios en el vehículo, donde se destacan los “postes” y los componentes que soportan a los pasajeros.

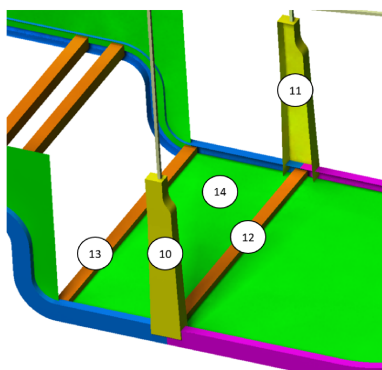


Figura 5. Elementos intermedios del chasis

En la Figura 6, sección trasera de la estructura, se muestran los componentes que soportan elementos mecánicos como sistema motor y suspensión trasera, así como los paneles en la parte posterior y la barra de impacto trasera.

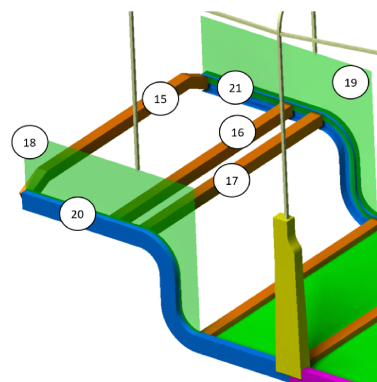


Figura 6. Elementos traseros del chasis

Además, se añadieron elementos adicionales con relevancia menor en la evaluación del vehículo, representados por una estructura del techo con las siguientes propiedades, como se observa en la Figura 7.

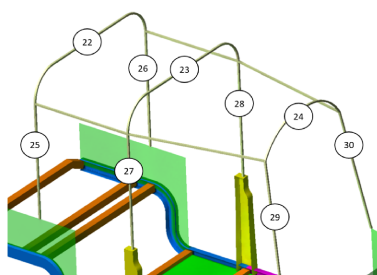


Figura 7. Estructura superior del techo

Finalmente, en la Figura 8 se muestra el modelo final destinado al análisis estructural. Este modelo contiene únicamente los elementos empleados en la evaluación CAE del vehículo.

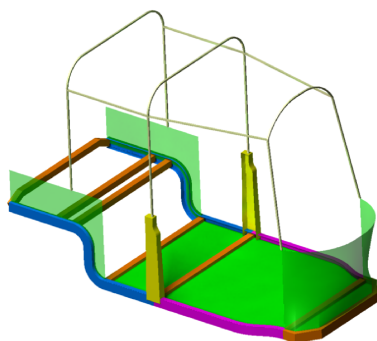


Figura 8. Vista global del modelo de mototaxi para evaluación estructural

En la Tabla 4 se anotan los diferentes componentes empleados y su descripción respecto del tipo de perfil empleado para la evaluación estructural.

Tabla 4. Especificación de componentes seleccionados en la estructura del mototaxi

Sección	Número	Especificación	Material
Elemento frontal	1, 2	Perfil tipo C 3 in × 1,498 in × 0,258 in	ASTM A36
Elemento frontal	3, 4, 7, 8	Perfil cuadrado 2 in × 2 in × 0,25 in	ASTM A36
Elemento frontal	5	Panel fibra de vidrio espesor 0,109 in	6063-T83
Elemento frontal	6	Lámina aluminio calibre 12	6063-T83
Elemento frontal	9	Perfil cuadrado de 0,5 in × 0,5 in × 1,10 in	ASTM A36
Elemento intermedio	10, 11, 14	Lámina aluminio calibre 12	6063-T83
Elemento intermedio	12, 13	Perfil cuadrado 2 in x 2 in x 0,25 in	ASTM A36
Elemento trasero	18, 19	Lámina aluminio calibre 12	6063-T83
Elemento trasero	15, 16, 17	Perfil cuadrado 2 in × 2 in × 0,25 in	ASTM A36
Elemento trasero	20, 21	Perfil tipo C 3 in × 1,498 in × 0,258 in	ASTM A36
Otros elementos	22-30	Perfil cuadrado de 0,5 in × 0,5 in × 0,110 in	ASTM A36

Para la evaluación del vehículo, se consideraron inicialmente diversos materiales en los elementos modelados para conseguir resultados adecuados, siendo los materiales el acero ASTM A36 y la aleación de aluminio 6063-T83, seleccionados debido a sus aplicaciones en estructura y paneles automotrices [12].

Una vez considerado esto, se propuso realizar tres estudios en el software ANSYS, con la finalidad de evaluar: rigidez torsional, rigidez por flexión y modos naturales de vibración.

En la Tabla 5 se muestran las variables globales consideradas.

Tabla 5. Especificación técnica de variables globales consideradas

Estudio	Tipo geometría	Tipo de estudio	Cantidad de elementos de malla
Torsión	Chasis 1D	Estático lineal	Elementos: 26616
	Paneles Midsurface 2D		
Flexión	Chasis 1D	Estático lineal	Elementos: 26616
	Paneles Midsurface 2D		
Modos naturales de vibración	Chasis 1D	Modal	Elementos: 26616
	Paneles Midsurface 2D		

En la Figura 9 se muestran las restricciones aplicadas (representados por estrellas identificadas con letra F), así como las cargas empleadas (vectores identificados con anotación B y C de dirección encerrados con círculos) para el análisis de la torsión en la estructura, donde se obtienen valores de deformación.

Los valores de carga fueron obtenidos, priorizando las cargas con mayor acercamiento a la realidad. Estos se detallan en la Tabla 6.

Tabla 6. Especificación de ubicación de cargas ejercidas en estructura primaria de mototaxi para su estudio

Tipo de carga	Valor	Ubicación
Axial	2354,4 N	Lateral
Axial	-2354,4 N	Lateral

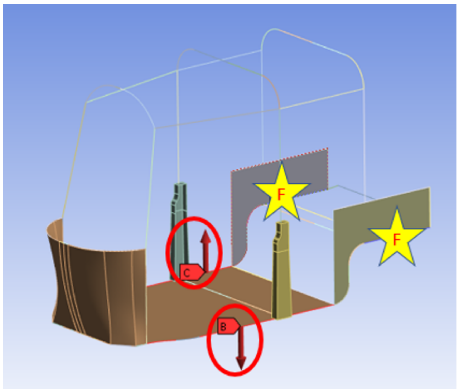


Figura 9. Vista global del modelo de mototaxi representando cargas ejercidas en el modelo para su estudio

Teniendo en cuenta que en ocasiones los operarios de los mototaxis sobrecargan la estructura, es fundamental garantizar que esta no genere fallas por momentos torsionales; por lo que se realizaron estudios con capacidades de carga máxima de seis personas teniendo una media de ochenta kilogramos cada una respectivamente, por lo que genera un total de 4708 N, divididas en dos. Se aplicaron estos nuevos valores obtenidos en las ubicaciones laterales de la estructura del mototaxi y en sentido opuesto para poder verificar y validar los nuevos resultados obtenidos.

En la Figura 10 se observan las restricciones aplicadas (representados por estrellas identificadas con letra F), así como las cargas empleadas (vectores de dirección con anotación B, C y D encerrados con círculos) para el análisis de la flexión en la estructura, donde se obtienen valores de deformación.

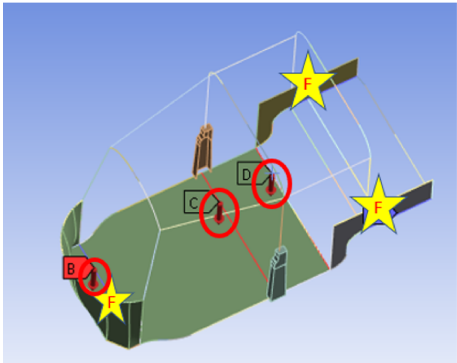


Figura 10. Restricciones en el análisis de la flexión

Para el análisis por flexión se tomaron en cuenta la capacidad máxima de carga que soporta la estructura primaria, siendo estas siete personas; teniendo una

media de ochenta kilogramos para cada una respectivamente, por lo que, al ser un total de 560 kilogramos, se divide este último valor entre tres vigas que son las mostradas en la figura, realizando una distribución de 5494 N entre las tres vigas representadas.

Para el estudio modal, se propuso analizar los seis modos naturales de vibración del modelo, y en la Figura 11 se ilustran las restricciones de posición empleadas en la estructura del vehículo, para efectuar dicho análisis. Por su parte, la Tabla 7 indica el tipo de sujeción empleado en el estudio.

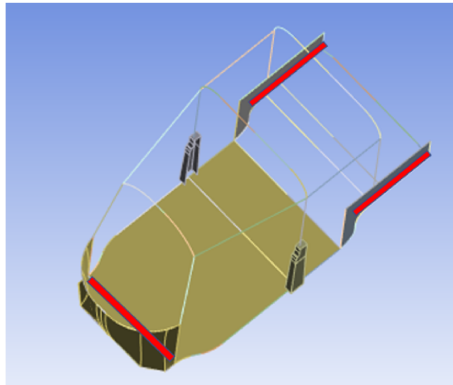


Figura 11. Restricciones de posición

Tabla 7. Especificación de ubicación de cargas ejercidas en estructura primaria de mototaxi para su estudio

Tipo de sujeción	Número de sujeciones	Ubicación
Sujeción fija	3	Vigas inferiores internas

3. Resultados y discusión

La deformación torsional presentada por las cargas descritas anteriormente se muestra en la Figura 12.

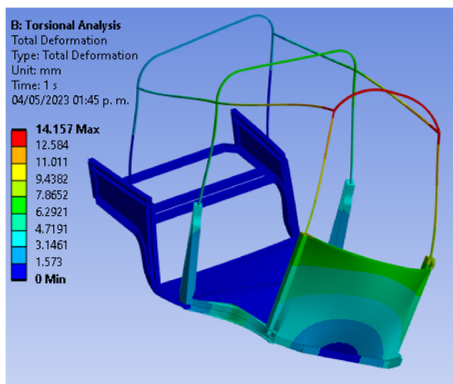


Figura 12. Vista global del modelo de mototaxi representando los resultados sobre las cargas torsionales

Como se observa en la Tabla 8 se obtuvo un valor de 27,35 KNm/°, esto basado en la carga torsional aplicada y un ángulo obtenido de torsión de la estructura de 0,27251°. Adicionalmente, la deformación máxima presentada es de 14,157 mm.

Tabla 8. Resultados de evaluación torsional

Resultados torsión	
Máximos	(Grados)
14,157 mm	0,27251°

En el caso de la rigidez por flexión, la Figura 13 presenta la deformación observada en la estructura del mototaxi.

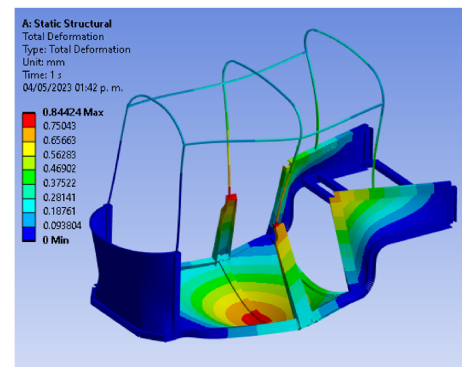


Figura 13. Vista global del modelo de mototaxi representando los resultados sobre las cargas por flexión

Siendo la deformación máxima presentada de 0,84424 mm, con esto se obtuvo un valor de rigidez por flexión de 6508,15 N/mm.

Para el análisis modal de la estructura del mototaxi, la Figura 14 presenta los diferentes modos de vibración de la estructura analizada. Como parte de dicha evaluación, se identificaron las revoluciones de operación típicas del motor del vehículo, para lo cual se encontró en 88 Hz la frecuencia de operación del mismo.

En la Tabla 9 se describen los valores numéricos encontrados en los modos de vibración de la estructura.

Tabla 9. Resultados de evaluación modal

Revoluciones de trabajo del motor de un mototaxi	Resultados modos de vibración	Valores numéricos en Hertz
5250 rpm → 88 Hz	1	8.01
	2	10.335
	3	15.211
	4	26.205
	5	20.592
	6	21.3

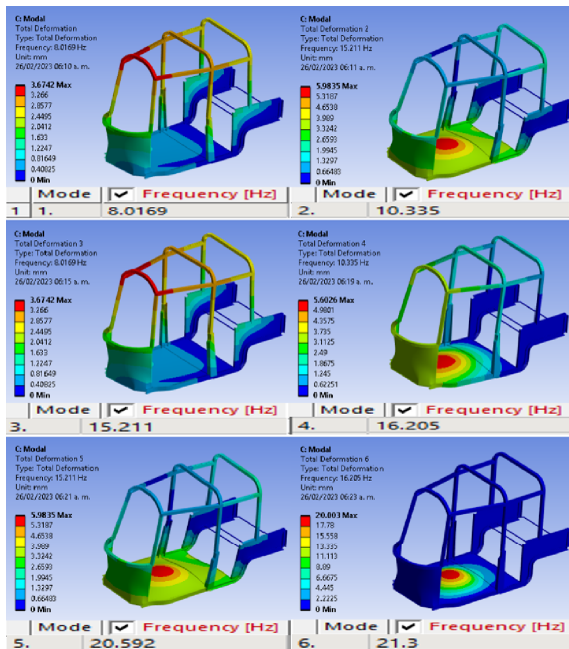


Figura 14. Vista global del modelo de mototaxi representando los resultados sobre las cargas ejercidas en el modelo para su estudio

Con el objetivo de identificar si los valores obtenidos de torsión y flexión son adecuados para la estructura analizada, se tomó como referencia la comparación realizada por Hirz. Esta considera nueve categorías diferentes, en las que se reportan ciertos rangos de esfuerzos torsionales para cada categoría [13].

En el estudio del análisis del mototaxi que se llevó a cabo, se tomaron en cuenta principalmente las categorías denominadas como “auto mini”, “auto compacto” y “convertible”, para hacer una comparación similar, haciendo énfasis en este último por la configuración que presenta el mototaxi al ser un vehículo con un diseño estructural mayoritario en la parte inferior, asemejándose más a la categoría de “convertible”.

Derivado del análisis en la Figura 15, se observa que la estructura presenta una mayor rigidez de torsión, en comparación con la categoría de “convertible”, la cual presenta valores en un rango de 10 a 17 KNm/°, mientras que el mototaxi presenta un valor de 27,35 KNm/°.

Respecto de la rigidez por flexión, de la misma forma se realiza una comparación con otro tipo de estructuras similares en diversos estudios, y se muestran seis estudios [14–19] diferentes con sus valores respectivos en la Figura 16.

Al comparar los esfuerzos por flexión se puede apreciar que la estructura del mototaxi se encuentra en un valor de 6508,15 N/mm. Mientras que en los estudios revisados se muestran valores similares, lo cual muestra comportamiento de la estructura semejante (valores de 5 a 13 KN/mm) a otros estudios en la evaluación de rigidez por flexión.

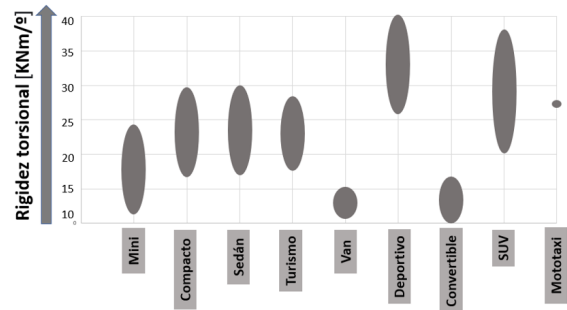


Figura 15. Comparativa resultados oposición a la torsión estructural

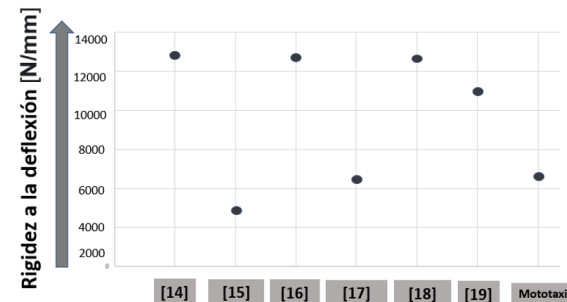


Figura 16. Comparativa resultados rigidez por flexión

4. Conclusiones

En los estudios presentados se analizó el desempeño de la estructura del vehículo bajo tres estudios principales: rigidez por flexión, rigidez torsional y evaluación modal. De estos tres criterios, en los valores calculados, se encontró al compararlos que la estructura tipo mototaxi presenta algunos problemas de integridad estructural, pues se obtuvieron valores con diferencia visible en comparación a estructuras similares en los estudios torsionales del vehículo. Esto se puede interpretar en la presencia de algunos problemas de comportamiento estructural durante su operación (relacionado con la carencia de una estructura integral incluyendo el techo) lo cual reduce la eficacia sobre el desempeño que podría aportar la estructura, obteniendo una menor capacidad para absorción y disipación de energía. Los estudios de flexión de la estructura mostraron valores cercanos a los analizados en otras estructuras. Mientras que, en la evaluación modal, las frecuencias naturales no igualaron la frecuencia de operación de los componentes operativos del vehículo, lo cual en ambos casos asegura un funcionamiento adecuado bajo dichos criterios.

De la misma forma, A. Rodríguez [20] analizó una estructura de un triciclo bajo ciertos parámetros y casos de carga especificados. A diferencia de estos estudios, los cuales se centraron en la evaluación de los criterios de falla y fatiga en la estructura, este estudio se

centró en los criterios de evaluación de comportamiento del vehículo bajo condiciones de trabajo estático. Un trabajo en el futuro sería la evaluación mediante los criterios de falla respectivos, así como la evaluación del comportamiento dinámico, considerando riesgos potenciales en caso de colisiones frontales, laterales o vuelcos en la misma.

Si bien un vehículo de esta clase fue principalmente desarrollado como medio de transporte para personas que buscan una opción de movilidad económica tanto para usuarios como para operadores, la estructura del mismo mantiene un riesgo para la integridad de las personas que estén a bordo de un mototaxi. Es deber de las legislaciones locales, nacionales y de los desarrolladores de tecnología de estos vehículos, mejorar las condiciones estructurales y dinámicas del mismo.

Referencias

- [1] B. A. Arvizu López, N. D. Lora Ledón, J. A. González, and J. E. Duarte Reinoso, "Mototaxis como medio de transporte público en el municipio de San Blas, Nayarit," *Universo de la Tecnología*, vol. 1, no. 43, pp. 25–31, 2023. [Online]. Available: <https://bit.ly/3UoAe9Q>
- [2] N. Ortuya. (2023) Mototaxi en México: ¿Una buena alternativa de transporte? Autofact. [Online]. Available: <https://bit.ly/3QoFold>
- [3] M. Sánchez. (2019) Están prohibidos, pero los mototaxis llevan a la gente a donde tiene que ir. Global Press Journal. [Online]. Available: <https://bit.ly/3JGoRFi>
- [4] M. J. Solís, C. A. López, and R. Gómez, "El mototaxi como medio de transporte público en Juchitán de Zaragoza, Oaxaca," *Centro Educativo Cruz Azul*, 2016. [Online]. Available: <https://bit.ly/3WghKuR>
- [5] DRTCSanMartin, *Manual del conductor, Capítulo 6: El Vehículo*. Dirección Regional de Transportes y Comunicaciones de San Martín. Perú, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/4aUO9vz>
- [6] Z. J. Chan, V. Hung, and F. Kallmyer, *Inclusión social y movilidad: el sector del mototaxi en Tarapoto (Perú)*, 2019. [Online]. Available: <https://bit.ly/44mbsvA>
- [7] L. Díaz Olvera, D. Plat, P. Pochet, and M. Sahabana, "Un transporte urbano no convencional en África Subsahariana: el mototaxi," *Revista VIAL*, pp. 52–54, 01 2011. [Online]. Available: <https://bit.ly/3QCLgr8>
- [8] J. L. Bernal López, "El autoempleo en el transporte informal como forma de exclusión social: el caso de los mototaxistas del municipio de Chimalhuacán," *Análisis económico*, vol. 36, no. 93, pp. 141–158, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.24275/uam/azc/dcsh/ae/2021v36n93/Bernal>
- [9] B. Barrios Hernández and P. F. Coutiño Osorio, "El servicio de mototaxis: una fuente alternativa de trabajo en Puebla," *DIKE*, no. 15, pp. 157–171, 2014. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.32399/fder.rdk.2594-0708.2014.15.168>
- [10] Congreso de Puebla, *Ley de movilidad y transporte del Estado de Puebla*. Honorable Congreso del Estado de Puebla, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/4a5ZxDn>
- [11] MSM, *Ficha técnica: Motor de encendido por chispa de 4 tiempos, refrigerado por líquido*. Moto Soluciones México, 2023. [Online]. Available: <https://bit.ly/3JQSAvI>
- [12] C. Okpala, T. Nwokeocha, L. Ofuoku, A. Akajiugo, and J. Adonu, "Design and analysis of chassis and spring of a load-bearing tricycle," *International Journal of Advanced Engineering Technology*, vol. 8, no. 3, pp. 10–15, 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/3WxEbMi>
- [13] M. Hirz. (2016) What are the typical stiffness values while designing car chassis?. ReserachGate. ReserachGate. [Online]. Available: <https://bit.ly/4bgY0Lu>
- [14] D. Fang and W. Kefei, "Simulation analysis and experimental verification on body-in-white static stiffness of a certain commercial vehicle," *Vibroengineering PROCEDIA*, vol. 29, pp. 141–147, nov 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.21595/vp.2019.21171>
- [15] H. J. Yan, X. Liu, G. Q. Zhao, N. Tian, and S. K. Zhang, "Analysis and Research of Stiffness Based on Body-in-White NVH," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1087, no. 4, p. 042078, sep 2018. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1087/4/042078>
- [16] Z. Wentao, W. Zhenhu, F. Xiangdong, Y. Xuyue, L. Luoxing, and W. Wanlin, "A calculation method of car body in white's static stiffness based on modal theory," *China Mechanical Engineering*, vol. 29, no. 5, pp. 511–518, 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/4a7wkYN>
- [17] C. Hartmann, M. Welm, S. Schreyer, C. Hartmann, and W. Volk, "A modular car body for sustainable, cost-effective, and versatile vehicle development," *Technologies*, vol. 9, no. 1, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/technologies9010013>

- [18] M. H. Shojaeefard, A. Khalkhali, M. Sarmadi, and N. Hamzehi, “Investigation on the optimal simplified model of BIW structure using FEM,” *Latin American Journal of Solids and Structures*, vol. 12, no. 10, pp. 1972–1990, Oct 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1590/1679-78251923>
- [19] M. M. Shivakumar and L. Nirmala, “Fatigue life estimation of chassis frame FESM bracket for commercial vehicle,” *International Journal of Science and Research (IJSR)*, vol. 3, no. 8, pp. 441–447, 2014. [Online]. Available: <https://bit.ly/4brALP9>
- [20] A. Rodríguez, B. Chiné, J. A. Ramírez, and Costa, “Finite element modeling of an aluminum tricycle frame,” 2016. [Online]. Available: <https://bit.ly/4aqmFwR>



LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS Y SU IMPACTO EN EL SISTEMA ELÉCTRICO DE DISTRIBUCIÓN: CASO DE ESTUDIO “ALIMENTADOR URBANO DE LA CIUDAD DE PORTOVIEJO”

ELECTRIC VEHICLES AND THEIR IMPACT ON THE ELECTRIC DISTRIBUTION SYSTEM: A CASE STUDY OF THE URBAN FEEDER IN PORTOVIEJO

Arturo Zavala-Tubay^{1,*} , Hugo Pico-Mera¹ , Gabriel Pico-Mera² 

Recibido: 16-06-2023, Recibido tras revisión: 05-04-2024, Aceptado: 30-04-2024, Publicado: 01-07-2024

Resumen

En la ciudad de Portoviejo, actualmente el uso de vehículos eléctricos (VE) es limitado en comparación con el empleo de los convencionales. Sin embargo, debido a la implementación de leyes, reglamentos y regulaciones que impulsan la movilidad eléctrica en el Ecuador, se espera que en los próximos años se produzca un ingreso considerable de esta carga (VE) en el sistema eléctrico de la ciudad. En este sentido, para determinar probables afectaciones a producirse en el sistema eléctrico en el futuro, se realiza la simulación en el software CYMDIST de un alimentador de distribución eléctrico de la Empresa Pública Corporación Nacional de Electricidad CNEL EP Unidad de Negocio Manabí (Portoviejo), considerando tres escenarios de análisis proyectados al año 2030 como son: 1. Caso base sin ingreso de VE, 2. Ingreso no controlado de VE y 3. Ingreso controlado de VE. El presente trabajo simula el ingreso de hasta 230 vehículos en la red, puesto que, el objetivo del estudio es tomar datos referenciales para conocer la posible afectación en el alimentador cuando los VE se conecten de forma masiva y se carguen prolongadamente. Al final del estudio se comprobará la importancia de la gestión de la demanda cuando se produzca el ingreso de vehículos eléctricos, el cual refleja resultados importantes en la curva de demanda, perfil de voltaje y tasa de distorsión armónica THD % de un alimentador de distribución a 13,8 kV.

Palabras clave: VE, vehículo eléctrico, armónicos, pérdidas técnicas, planificación eléctrica, CYMDIST, distribución, CNEL

Abstract

In Portoviejo, the current use of electric vehicles (EVs) is limited compared to conventional vehicles. However, due to the implementation of laws, regulations, and policies promoting electric mobility in Ecuador, a significant increase in the integration of EVs into the city's electrical system is anticipated in the coming years. To anticipate the impact on the electrical infrastructure, a simulation is conducted using CYMDIST software on an electrical distribution feeder operated by the Public Company Corporación Nacional de Electricidad (CNEL EP), Manabí Business Unit (Portoviejo). The simulation considers three scenarios projected for 2030: 1. Baseline scenario without EV integration, 2. Unrestrained EV integration, and 3. Managed EV integration. This research aims to simulate the integration of up to 230 EVs into the network to provide benchmark data for understanding the potential impacts on the feeder as EV adoption increases, with vehicles being charged over extended periods. The investigation will highlight the importance of demand management with EV integration, demonstrating significant effects on the demand curve, voltage profile, and total harmonic distortion rate (THD%) of a 13.8 kV distribution feeder.

Keywords: EV, Electric Vehicle, Harmonics, Technical Losses, Electrical Planning, CYMDIST, Distribution, CNEL

^{1,*}Departamento de Planificación, Corporación Nacional de Electricidad (CNEL EP UN MAN), Ecuador.

Autor para correspondencia ✉: arturo.zavala@cnel.gob.ec.

²Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas, Universidad Técnica de Manabí, Ecuador.

Forma sugerida de citación: Zavala-Tubay, A.; Pico-Mera, H.; Pico-Mera, G. “Los vehículos eléctricos y su impacto en el sistema eléctrico de distribución: Caso de estudio ‘Alimentador urbano de la ciudad de Portoviejo’,” *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 32, pp. 27-35, 2024. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n32.2024.03>.

1. Introducción

El compromiso mundial de reducir significativamente las emisiones de carbono a corto plazo, ha propiciado el desarrollo de tecnologías sustentables en términos ambientales, como son los vehículos eléctricos [1]. Por ello, en los últimos años, el uso de esta tecnología se ha desplegado en el mundo como respuesta a la necesidad imperiosa de disminuir las emisiones de gases contaminantes al ambiente [2].

Considerando que, el uso de vehículos eléctricos aporta a la conservación del medioambiente, se ha vuelto necesario analizar el impacto que podría causar la inclusión de la carga de esta nueva tecnología en las redes eléctricas de distribución, puesto que, según [3,4], al tratarse de cargas que se modelan y comportan como no lineales, podrían presentar un impacto negativo considerable en la calidad de la energía (voltaje, niveles de desequilibrio y armónicos), alterando dichos parámetros eléctricos en diferentes condiciones de carga.

Por otro lado, también se prevé, que, con el aumento de cargas de manera descontrolada, producto del ingreso de VE, se afecte directamente la infraestructura eléctrica de la empresa distribuidora por el potencial incremento de demanda [5].

A propósito de los VE, estos se caracterizan por el uso de un motor de tracción eléctrica para la propulsión del vehículo [6], de modo que, la energía para dar movimiento a dicho motor, proviene de baterías que comúnmente se cargan por medio de una fuente de alimentación externa [7].

Por lo regular, los VE utilizan baterías de ion-litio principalmente por las ventajas que presentan en comparación con otra tecnología, como son mayor eficiencia, bajo costo de mantenimiento, peso ligero, entre otros, que lo hace atractivo para usar en vehículos eléctricos [8].

Si bien, las baterías son consideradas la principal fuente de energía de los VE, este trabajo no se centrará en estudiarlas, sino más bien se enfocará en el impacto que provocarán dichos dispositivos desde las redes eléctricas.

Así pues, la introducción de vehículos eléctricos en el mercado generará variaciones significativas en la demanda de energía y potencia [9]. Esto incidirá de tal manera que, las redes eléctricas se enfrentarán a un desafío importante, en donde las empresas de distribución eléctrica, deberán darse modos de garantizar la continuidad del servicio a sus clientes, así como garantizar el crecimiento de la demanda de potencia y energía.

Algo similar a lo anterior también mencionan Anas-tasiadis et al. [10]; ellos manifiestan que, es necesario prever las soluciones adecuadas a los problemas que pueden aparecer en el sistema eléctrico, dado que, a medida que la popularidad de los vehículos de tracción eléctrica tiende a crecer, también existe como resultado

una mayor demanda en el sistema y por consiguiente un impacto significativo en la red.

El impacto en la red de distribución eléctrica, puede clasificarse en positivo y negativo, entre los efectos negativos, destaca la afectación del perfil de voltaje, saturación de los componentes del sistema eléctrico, desequilibrio de voltaje, inyección de armónicos y aumento de pérdidas técnicas de energía, ente otros; y, en cuanto a los efectos positivos, destacan las técnicas a utilizar para llevar a efecto una correcta administración de la energía, también conocidas como técnicas de gestión de demanda [11].

Para determinar el impacto producido por el ingreso de VE, se debe realizar un análisis de las variables que intervienen en el sistema, sean estas, demanda de la red, cargabilidad del sistema eléctrico, perfiles de carga de los diferentes tipos de clientes y características de los vehículos eléctricos [12].

La afectación a la red está enlazada con la forma de carga que se aplique al vehículo eléctrico, sobre esto, [13] menciona que, el tipo de carga puede clasificarse de tres maneras: carga de nivel 1 o carga lenta, carga de nivel 2 o semirrápida y carga de nivel 3 o rápida (electrolinera). El tipo de carga va de la mano con la velocidad de carga de la batería, y generalmente, el tipo 2 y 3 se utiliza en entornos públicos y privados, a diferencia del tipo 1 que está identificado como carga doméstica o de garaje.

En la Tabla 1 se expone la clasificación de los tipos de recarga de las baterías según las características del VE [14].

Tabla 1. Niveles de carga de baterías de VE

Nivel de carga	Tipo de carga	Uso típico	Corriente máxima esperada	Tiempo de carga
Nivel I	Lenta	Casa	12 A	6 a 24 horas
Nivel II	Semirrápida	Sector privado o público	32 A	2-6 horas
Nivel III	Rápida	Electrolineras	250 A CA 400 A CC	0,5 horas

El periodo de carga rápida se puede ejecutar en un tiempo aproximado de 30 minutos para alcanzar el 80 % de la capacidad nominal de la batería [15].

Si bien, el impacto de los VE en la red, está relacionado directamente con el tipo de carga que se realice (lenta, semirrápida, rápida), el actual análisis considerará únicamente carga lenta, ya que, es el tipo de carga que se prevé se utilice en los hogares de los consumidores o clientes de las empresas de distribución eléctrica.

Teniendo en cuenta los problemas que generan las cargas no lineales de los vehículos eléctricos, se crea la necesidad de efectuar un estudio que permita estimar las afectaciones a producirse en la red. Por tanto,

el presente trabajo de investigación, analizará el impacto producido por la carga de vehículos eléctricos en la curva de demanda de un alimentador, así como, las afectaciones en el perfil de voltaje, armónicos y pérdidas técnicas que se presenten en la práctica.

El estudio a presentar en este documento, se efectuará mediante una simulación en el software CYMDIST, partiendo de un alimentador real del sistema eléctrico de distribución de la empresa distribuidora Corporación Nacional de Electricidad CNEL EP Unidad de Negocio Manabí proyectado al año 2030, así pues, se hará uso de los módulos adscritos al programa, entre los que se puede citar la distribución de carga, el flujo de carga, armónicos y la dinámica a largo plazo.

Para efectos de simulación de la red, se utilizarán datos de lecturas tomadas del sistema eléctrico a analizar, para lo cual, se ha considerado un alimentador urbano del cantón Portoviejo de la provincia de Manabí. El diseño de la carga del vehículo eléctrico para su simulación en el software CYMDIST, se modelará como fuente de corriente multifrecuencial desequilibrada y los datos a considerar para su modelación, serán de lecturas realizadas durante la carga de las baterías de vehículos eléctricos con tipo de carga I (lenta), con intervalos de medición de 10 minutos.

El estudio actual considera los escenarios simulados contemplando el ingreso de 160 y 230 vehículos en la red eléctrica, las cuales son referenciales y ajustables según las estimaciones de ingreso de VE proyectadas en la revista Panorama Eléctrico [16].

Teniendo en cuenta que, los VE traen consigo problemas de calidad de energía en la red de distribución, particularmente desequilibrio de voltaje, afectación al perfil de voltaje, saturación de la infraestructura eléctrica y frecuencia fuera de la nominal [17], este artículo también considera presentar resultados reales de datos medidos en el proceso de carga de un vehículo eléctrico en bajo voltaje.

En el caso de Ecuador, el ente encargado de regular y controlar los sectores estratégicos de electricidad, hidrocarburos y minas, es la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables (ARCERNNR). Esta entidad emite los lineamientos a cumplir por la Empresa de Distribución de Energía Eléctrica a través de las regulaciones correspondientes; es así, que, mediante resolución N.º ARCERNNR 017/2020 aprueba la regulación N.º ARCERNNR 002/20, denominada “Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica” [18], que en su capítulo 2 trata sobre la calidad del producto.

En la regulación citada, se presentan los rangos admisibles para las variables eléctricas que generalmente son afectadas por el ingreso en las redes de los vehículos eléctricos, tal como se describe a continuación.

1.1. Calidad del producto

1.1.1. Nivel de voltaje

En la Tabla 2 se exponen los rangos de voltaje exigidos por el ente regulador ARCERNNR a las empresas de distribución del Ecuador según regulación [18].

Tabla 2. Rangos admisibles de niveles de voltaje

Nivel de voltaje	Rango admisible
Alto voltaje (Grupo 1 y Grupo 2)	$\pm 5,0 \%$
Medio voltaje	$\pm 6,0 \%$
Bajo voltaje	$\pm 8,0 \%$

Para esta investigación se tomará en consideración los valores correspondientes a medio voltaje y se analizará el cumplimiento de la normativa según lo descrito en la Tabla 2.

1.1.2. Distorsión armónica de voltaje

El factor de distorsión armónica individual de voltaje (%) y el factor de distorsión armónica total de voltaje (THD %), consideran los rangos descritos en la regulación ARCERNNR 002-20, tal cual lo mostrado en la Tabla 3.

Para el estudio, se tomarán de referencia los valores correspondientes a medio y bajo voltaje.

Tabla 3. Límites máximos de armónicos de voltaje (% del voltaje nominal)

Nivel de voltaje	Factor de distorsión armónica individual (%)	THD (%)
Bajo voltaje	5	8
Medio voltaje	3	5
Alto voltaje (Grupo 1)	1,5	2,5
Alto voltaje (Grupo 2)	1	1,5

2. Materiales y métodos

El presente trabajo de investigación tiene como finalidad generar una línea base que sirva para los estudios de demanda que en el futuro realice la Empresa Pública Estratégica Corporación Nacional de Electricidad CNEL EP Unidad de Negocio Manabí, en lo que a electromovilidad se refiere. Con ello, la distribuidora contará con un insumo adicional para planificar el

sistema eléctrico a largo plazo, considerando las posibles afectaciones a presentarse con el ingreso de los vehículos eléctricos en diferentes escenarios de carga.

Para cumplir con el objetivo de analizar el impacto en la red eléctrica, se ha tomado como referencia un caso de estudio donde se incorpora de manera aleatoria una cantidad determinada de VE en el sistema, simulando su ingreso por medio del software CYMDIST, el mismo que es una herramienta informática de ingeniería avanzada, diseñada para realizar estudios de planificación eléctrica, operación y optimización [19].

Los materiales que se utilizaron para la simulación son los siguientes:

- Red eléctrica georreferenciada, considerando cargas por tipo de usuario.
- Medición o lectura principal del alimentador existente a 13,8 kV.
- Medición o lectura realizada a un vehículo eléctrico por CNEL EP.

2.1. Metodología

La metodología utilizada es concordante al diagrama mostrado en la Figura 1.

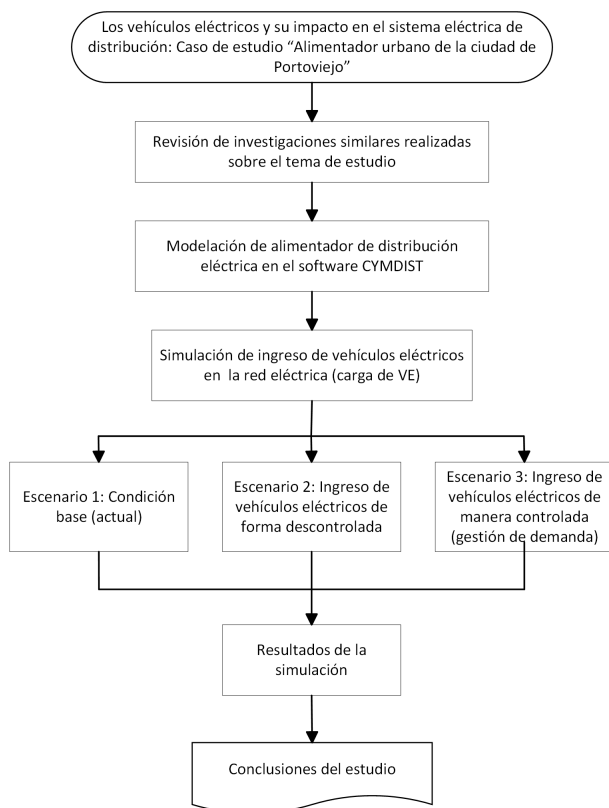


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología aplicada en el estudio

2.1.1. Determinación de escenarios

Para conocer el impacto en la red eléctrica por el ingreso de la carga de vehículos eléctricos, se han definido tres escenarios de simulación proyectados al año 2030.

Los escenarios consistirán en comparar el impacto de los vehículos eléctricos, en lo que corresponde a demanda, caída de voltaje, armónicos y pérdidas técnicas.

A) Escenario 1: Escenario base, alimentador proyectado al año 2030.

Se analiza la situación de operación del alimentador en el que se efectuará el estudio. Para la proyección al 2030 se considera un crecimiento vegetativo del alimentador de 3,5 % por año.

En este escenario no se incluye la carga de VE.

B) Escenario 2: Ingreso de la carga de VE sin restricciones (año 2030).

En este punto se analiza el escenario proyectado, simulando que los VE serán sometidos a un proceso de carga cuando su propietario regresa a casa después de la jornada laboral. En consecuencia, los vehículos comenzarán a cargarse aproximadamente después de las 18:00.

C) Escenario 3: Ingreso de carga de VE de forma controlada (año 2030).

Con el fin de evitar que el pico de carga de los VE eléctricos coincida con el periodo de demanda máxima del sistema, este escenario analiza la carga de VE al año 2030 a partir desde las 22:00, de igual manera, también considera poner en funcionamiento estrategias para que los vehículos se carguen en diferentes horarios que no coincidan con la demanda máxima del sistema.

El tema de gestión de la demanda también tiene que ver con las políticas públicas que se ejecuten para gestionar la carga de los VE. Se pueden citar, por ejemplo, una infraestructura de carga en estacionamientos públicos o privados en los lugares de trabajo, así, de esta manera, los vehículos se cargan a lo largo del día, evitando su coincidencia con periodo picos de demanda [20].

Con esta estrategia, se pretende representar una carga controlada para clientes residenciales y comerciales, en la que los vehículos eléctricos se conecten a la red de distribución progresivamente al terminar la jornada laboral, y que la recarga sea más prolongada durante la noche y parte de la mañana.

2.1.2. Información del alimentador a estudiar.

El alimentador elegido para el estudio, pertenece al sistema eléctrico de distribución de la ciudad de Portoviejo, provincia de Manabí.

Conforme a la proyección realizada al año 2030, el alimentador presenta los datos mostrados en la Tabla 4.

Tabla 4. Características del alimentador

Subestación	Clientes	Voltaje (kV)	Conductor troncal	Recorrido de troncal (km)	Potencia activa (MW)	Potencia reactiva (MVAR)
Portoviejo 2	2612	13.8	ACSR 3/0	2.1	4.77	1.1

Conforme a lo descrito en la Tabla 4, se resume que la red está compuesta de 2,10 km de conductor ACSR 3/0 en el recorrido de la troncal, su voltaje base es 13,8 kV, la carga de potencia activa proyectada es de 4,77 MW, la carga de potencia reactiva es de 1,10 MVAR y los clientes totales ascienden a 2612, de los cuales 954 corresponden a residenciales.

3. Resultados y discusión

En este apartado se muestran los resultados de los escenarios planteados en el literal 2.1.1, los cuales fueron simulados utilizando el software CYMDIST.

- Escenario 1: Escenario base, alimentador proyectado al año 2030
- Escenario 2: Ingreso de carga de VE sin restricciones (año 2030)
- Escenario 3: Ingreso de carga de VE de forma controlada (año 2030)

3.1. Demanda

En la Figura 2 se presentan los resultados de los tres escenarios analizados al año 2030, en donde, se compara la incidencia de los vehículos eléctricos en la demanda del sistema eléctrico simulado.

Según la Figura 2, se observa que, en el escenario 2 (carga de VE no controlada) se produce un pico máximo de demanda aproximado de 6,1 MW, no siendo así en el escenario 3 (ingreso controlado de VE con gestión de demanda) donde el pico máximo llega a aproximadamente a 4,5 MW en el mismo periodo de demanda.

Este resultado refleja la incidencia positiva de la aplicación de mecanismos de gestión de demanda en el alimentador, al producirse una disminución de los picos en horarios de demanda máxima, aumentando con ello la eficiencia de la red y la capacidad de transporte disponible en el alimentador.

Este resultado tiene concordancia con lo indicado por autor [3], el cual establece que, con una estrategia

de carga no controlada, se presenta el peor caso para el control de la demanda y los desequilibrios en la red de distribución.

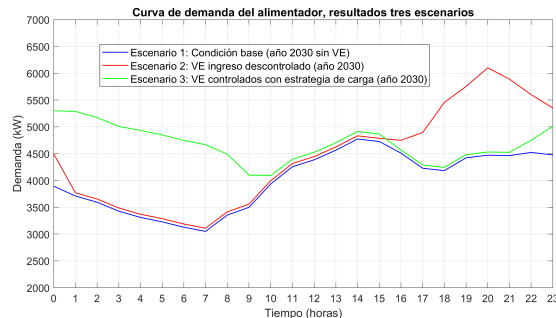


Figura 2. Curva de demanda, resultados obtenidos en los tres escenarios analizados (consolidado)

3.2. Caída de voltaje

3.2.1. Perfil de voltaje

En la Figura 3 se exponen los resultados obtenidos en el perfil de voltaje del alimentador simulado al año 2030, considerando su comportamiento en los tres escenarios planteados.

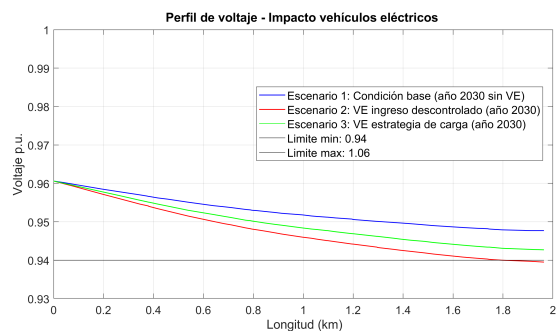


Figura 3. Perfil de voltaje, resultados obtenidos en los tres escenarios analizados (consolidado)

Los resultados detallados (Figura 3) demuestran el efecto positivo que representa para el sistema la aplicación de técnicas de gestión de demanda en el proceso de carga de vehículos eléctricos. El nivel de voltaje a lo largo del recorrido del alimentador simulado en el escenario 3 (carga de VE con estrategias de carga), es relativamente superior al perfil de voltaje que se presenta en la simulación del escenario 2 (carga de VE con ingreso descontrolado).

Hay que destacar, que, tal como se observa en la Figura 3, la aplicación de estrategias de carga ayuda significativamente a cumplir la regulación ARCERNR 002-20 en relación con el rango admisible de voltaje en el alimentador, establecido en $\pm 6\%$.

Este resultado tiene concordancia con lo indicado por Lascano et al. [21], quienes establecen que, al

momento de realizar la integración de cada VE, se presenta una disminución de voltaje progresiva hasta llegar a valores fuera de la normativa referida.

3.2.2. Voltaje en el nodo más lejano del alimentador

En la Figura 4 se visualiza el comportamiento del voltaje en el nodo más lejano del alimentador para cada uno de los tres escenarios planteados en el estudio. En este sentido, concordante a lo manifestado en el literal 3.2.1, en la figura referida se observa que el voltaje en el punto más lejano del alimentador, tendrá un nivel más alto siempre y cuando se aplique un sistema de gestión de demanda para la carga de VE en el alimentador.

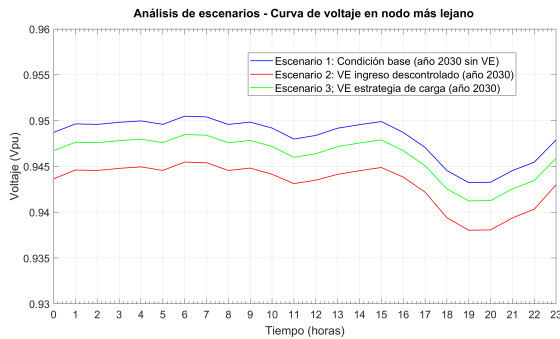


Figura 4. Perfiles de voltaje en nodo más lejano, resultados en tres escenarios

De lo observado en la Figura 4 es evidente que, con el ingreso de VE el voltaje en el punto más lejano se va a ver afectado si no se implantan estrategias para mitigar la afectación. Este resultado guarda coincidencia a lo manifestado por los autores [21].

3.3. Tasa de distorsión armónica (THD %)

En la Tabla 5 se muestra el resultado proyectado al año 2030 del factor de distorsión armónica total de voltaje (THD %), por consecuencia del ingreso de 230 vehículos eléctricos en el alimentador simulado.

Tabla 5. Distorsión armónica total de voltaje en media tensión (THD %)

NODO	kV L-N	180,00 Hz IHD (%)	300,00 Hz IHD (%)	420,00 Hz IHD (%)	THD (%)
Salida principal de alimentador (fase A)	7.58	0.019	0.008	0.007	0.023
Salida principal de alimentador (fase B)	7.67	0.023	0.011	0.009	0.027
Salida principal de alimentador (fase C)	7.71	0.013	0.007	0.005	0.016

Según la Tabla 5, considerando ingreso de la carga de los VE simulados en el estudio, la distorsión armónica total de voltaje (THD %) no supera el límite

de 5 % establecido en la regulación ARCERNR 002-20 en medio voltaje.

Es importante manifestar, que, para efectos de simulación se ingresaron paulatinamente las cargas del VE en el software CYMDIST, donde, al haber conectado hasta 230 VE, no se visualizaron índices elevados en la tasa de distorsión armónica en medio voltaje, por tanto, se considera que el THD % en dicho nivel de voltaje no será afectado significativamente cuando se carguen VE de carga lenta (Tipo I) con el número de VE simulados.

Por el contrario, en baja tensión, según lecturas leídas mediante un analizador de calidad de energía utilizado durante el proceso de carga de un vehículo eléctrico, se observó que la distorsión armónica de voltaje total THD (%) en bajo voltaje, se encuentra dentro de los rangos establecidos en la regulación ARCERNR 002-20. Sin embargo, se ha visto que existe un aporte importante de la tercera y quinta armónica de corriente, lo que se traduce que la distorsión total de armónicos de corriente contiene valores a tener en consideración cuando se conecten varios VE en el mismo circuito.

A continuación, en las figuras 5, 6, 7 se muestran la curva de distorsión armónica de voltaje total (THD %) en bajo voltaje y la curva de la tercera y quinta armónica respectivamente en el mismo nivel de voltaje (datos reales medidos en bajo voltaje).

De lo observado en la Figura 5, se puede manifestar que, la tasa de distorsión armónica presentada durante el proceso de carga de un vehículo eléctrico en bajo voltaje, se encuentra dentro de los rangos establecidos en la regulación de calidad vigente.

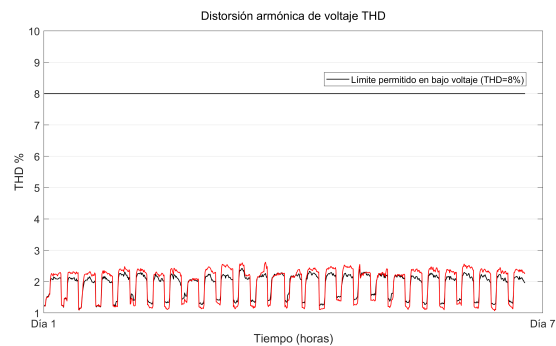


Figura 5. Curva de distorsión armónica de voltaje THD % (dato real de lecturas de carga de un VE en bajo voltaje)

En la Figura 6 se muestran las corrientes de tercera armónica de la fase 1 (IhL1) y fase 2 (IhL2) que relacionándolas con la Figura 5, estarían dentro de los valores permitidos por la regulación vigente para el efecto. Los armónicos mostrados en la figura en referencia, se presentaron solo cuando se realizó la carga del VE.

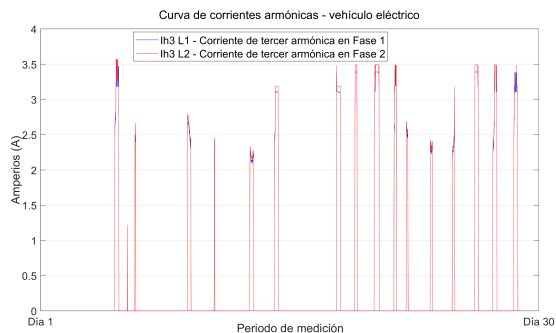


Figura 6. Curva de tercera armónica de corriente (medido en VE, bajo voltaje)

En la Figura 7 se muestran las corrientes de quinta armónica de la fase 1 (Ih5L1) y fase 2 (Ih5L2) que, relacionándolas con la Figura 5, estarían dentro de los valores permitidos por la regulación vigente para el efecto.

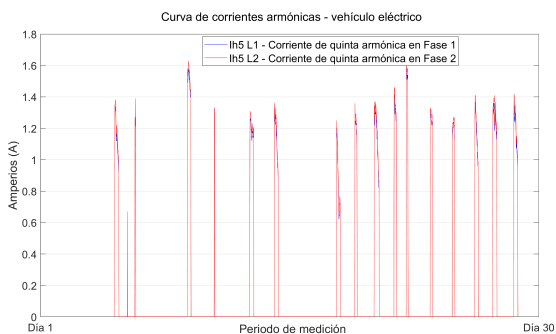


Figura 7. Curva de quinta armónica de corriente (medida en VE, bajo voltaje)

Es importante considerar, que, a pesar de que en el caso expuesto existen aportes importantes de armónicos en baja tensión (tercera y quinta armónica de corrientes) cuando se cargue un VE. Las mismas no superan los límites establecidos en la regulación ARCERNNR 002-20, sin embargo, es probable que estos valores aumenten con el número de cargadores conectados, para lo cual, la empresa eléctrica de distribución deberá tomar las medidas preventivas que el caso amerite.

El caso presentado en este literal, se encuentra relacionado con [3], donde los autores mencionan que el aumento de carga de VE puede provocar problemas de distorsión armónica causados por el aumento de la inyección de la tercera armónica.

3.4. Pérdidas técnicas

En la Tabla 6 se muestra el aporte de las pérdidas técnicas en potencia y energía proyectadas al año 2030, con su respectiva identificación de acuerdo con el escenario analizado.

La proyección final en el 2030 considera el ingreso de 230 vehículos eléctricos.

Tabla 6. Pérdidas técnicas proyectadas al año 2030

Pérdidas técnicas	Año 2030 (caso base sin carga de VE)	Año 2030 (VE carga no controlada)	Año 2030 (VE carga controlada)
Potencia (kW)	151.51	265.21	200.87
Energía (MWh/año)	790.68	1333.95	1026.49

Según la Tabla 6, la penetración de los vehículos eléctricos en la red provocará un aumento considerable de pérdidas técnicas de potencia y energía en el sistema. En este sentido, comparando el caso base (escenario 1, año 2030 sin VE) en relación con el caso donde se produce la carga de VE de manera descontrolada (escenario 2), se observa que las pérdidas técnicas aumentan en 113 kW. En cambio, en el caso donde los VE se cargan mediante estrategias de gestión de demanda (escenario 3), el aumento de las pérdidas técnicas será de 49,36 kW en relación con el primer escenario.

Estos resultados demuestran el impacto positivo de aplicar métodos de gestión de demanda para reducir las pérdidas producidas por el funcionamiento propio del sistema.

4. Conclusiones

Mediante el desarrollo de este estudio se ha generado una línea base que servirá para los estudios de demanda que más adelante realice la Empresa Pública Estratégica Corporación Nacional de Electricidad CNEL EP Unidad de Negocio Manabí, en lo que a electromovilidad se refiere.

Del análisis realizado se ha comprobado los efectos en la curva de demanda de un alimentador debido a la carga de vehículos eléctricos de manera controlada y no controlada. En este sentido, en el hipotético caso de que la carga de los VE para uso residencial se concentre toda en una hora determinada del día (carga no controlada), la misma puede representar incrementos de hasta 1 MW por cada 160 vehículos aproximadamente. En cambio, cuando se realice la carga de vehículos de manera controlada, el incremento de la demanda puede estimarse en alrededor de 0,1 MW por la misma cantidad de VE conectados a la red.

Partiendo de los casos estudiados, se evidencia que el caso controlado es el más idóneo para implementar en la carga de vehículos eléctricos en un alimentador de distribución, que, por la característica propia de la carga presenta caídas de voltaje, no es tan crítico como el escenario de carga descontrolada que evidencia una desmejora considerable en el perfil, pudiendo este último llegar a presentar valores desfavorables incluso por debajo de los niveles permitidos por la regulación de calidad citada en este documento.

La inclusión de la carga de VE tiene como consecuencia el ingreso de una carga adicional en el sistema. Esta carga referida es recomendable controlarla a través de mecanismos de gestión de demanda eléctrica, y así, evitar picos altos de demanda que pueden ocasionar inestabilidad en la red al provocar sobrecarga de los componentes, disminuyendo la vida útil de los mismos.

La aplicación de mecanismos de gestión de demanda eléctrica para controlar el ingreso de la carga de vehículos eléctricos (demanda controlada), generó como resultado que la curva de demanda del alimentador presente un aplanamiento (disminución de picos por demanda controlada), aumentando con ello la eficiencia de la red y por ende la capacidad de transporte disponible en el alimentador. Para el caso estudiado, tendríamos una disminución a favor de 1,6 MW comparando el escenario 2 con el escenario 3 en el mismo periodo de demanda.

Otro efecto positivo que representa para el sistema es la mejora de los niveles de voltaje a lo largo del recorrido del alimentador (perfil de voltaje). Con ello se comprueba que, el nivel de voltaje en el punto más lejano del alimentador, tendrá un nivel más alto siempre y cuando la carga de los VE se realice de manera controlada.

Con el ingreso promedio de 230 vehículos eléctricos con carga tipo I, la tasa de distorsión armónica no pone en riesgo el cumplimiento de THD (%) en medio voltaje en el alimentador estudiado. Presenta para el caso en análisis un promedio aproximado de 0,02 % de tasa de distorsión armónica en la salida del alimentador. Hay que considerar que la tasa de distorsión armónica (THD) puede aumentar con el número de cargadores conectados.

Según datos medidos de un vehículo eléctrico, se observó que en bajo voltaje existe un aporte importante de la tercera y quinta armónica de corriente, lo que se traduce que la distorsión total de armónicos de corriente contiene valores importantes a tener en consideración por la empresa distribuidora.

El ingreso paulatino de los VE en el sistema eléctrico de distribución, provocará un aumento considerable de pérdidas técnicas de potencia en el sistema. Para el caso del alimentador estudiado, el aumento puede alcanzar un incremento aproximado de 113 kW cuando la carga del VE se realice de manera no controlada, en cambio, al aplicar métodos de gestión de demanda o carga de VE de manera controlada, las pérdidas técnicas son inferiores, llegando a situarse en 49,36 kW de incremento.

Referencias

- [1] H. Pico, I. Pazmiño, and B. Ponce, “Análisis de los factores que intervienen en el envejecimiento prematuro de las baterías de ion-litio mediante modelo teórico validado en laboratorio,” *Revista Técnica Energía*, vol. 17, no. 2, pp. 83–91, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v17.n2.2021.432>.
- [2] CEPAL, *Propuesta de marco regulatorio para acelerar la inversión en electromovilidad mediante la reconversión de vehículos que usan combustibles fósiles*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3QBMaNI>
- [3] P. Rodríguez-Pajarón, A. Hernández, and J. V. Milanović, “Probabilistic assessment of the impact of electric vehicles and nonlinear loads on power quality in residential networks,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 129, p. 106807, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.106807>
- [4] A. A. Ismail, N. T. Mbungu, A. Elnady, R. C. Bansal, A. Kadir Hamid, and M. AlShabi, “Impact of electric vehicles on smart grid and future predictions: a survey,” *International Journal of Modelling and Simulation*, vol. 43, no. 6, pp. 1041–1057, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/02286203.2022.2148180>
- [5] A. Jenn and J. Highleyman, “Distribution grid impacts of electric vehicles: A California case study,” *iScience*, vol. 25, no. 1, p. 103686, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.103686>
- [6] A. Ibrahim and F. Jiang, “The electric vehicle energy management: An overview of the energy system and related modeling and simulation,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 144, p. 111049, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111049>
- [7] Y. Sáez, E. Collado, and M. Serrano, “Modelado de estaciones de recarga lenta para vehículos eléctricos mediante software: revisión del estado del arte,” *Revista de Iniciación Científica*, vol. 7, no. 2, pp. 9–19, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.33412/rev-ric.v7.2.3334>
- [8] S. Goel, R. Sharma, and A. K. Rathore, “A review on barrier and challenges of electric vehicle in India and vehicle to grid optimisation,” *Transportation Engineering*, vol. 4, p. 100057, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.treng.2021.100057>
- [9] D. T. Sandoval and E. G. Torres, “Resposta de demanda de energia por introducción de vehículos eléctricos: estado del arte,” *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 16,

- no. 1, pp. 5–11, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.33412/idt.v16.1.2433>
- [10] A. G. Anastasiadis, G. P. Kondylis, A. Polyzakis, and G. Vokas, “Effects of increased electric vehicles into a distribution network,” *Energy Procedia*, vol. 157, pp. 586–593, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.223>
- [11] H. Das, M. Rahman, S. Li, and C. Tan, “Electric vehicles standards, charging infrastructure, and impact on grid integration: A technological review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 120, p. 109618, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109618>
- [12] A. K. Karmaker, S. Roy, and M. R. Ahmed, “Analysis of the impact of electric vehicle charging station on power quality issues,” in *2019 International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering (ECCE)*, 2019, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ECACE.2019.8679164>
- [13] S. Habib, M. M. Khan, F. Abbas, L. Sang, M. U. Shahid, and H. Tang, “A comprehensive study of implemented international standards, technical challenges, impacts and prospects for electric vehicles,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 13 866–13 890, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2812303>
- [14] S. Sharma, A. K. Panwar, and M. Tripathi, “Storage technologies for electric vehicles,” *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, vol. 7, no. 3, pp. 340–361, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.04.004>
- [15] L. González, E. Siavichay, and J. Espinoza, “Impact of EV fast charging stations on the power distribution network of a Latin American intermediate city,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 107, pp. 309–318, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.017>
- [16] ARCERNNR, *Panorama Eléctrico*. Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2022. [Online]. Available: <https://acortar.link/jikL6I>
- [17] A. Mohammad, R. Zamora, and T. T. Lie, “Integration of electric vehicles in the distribution network: A review of PV based electric vehicle modelling,” *Energies*, vol. 13, no. 17, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en13174541>
- [18] AECERNNR, *Regulación Nro. ARCERNNR - 002/20, Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica*. Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/44vx74C>
- [19] EATON. (2024) Análisis de sistemas de distribución CYMDIST. EATON Power Business World Wide. [Online]. Available: <https://bit.ly/3Uu3L1T>
- [20] A. A. Navarro Espinosa, M. A. Díaz Verriera, and J. M. Yáñez Castro, “Vehículos eléctricos y el impacto en el sistema de potencia. Análisis de la operación y emisiones,” *Revista de energía de Latinoamérica y el Caribe ENERLAC*, vol. 5, no. 2, pp. 14–39, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/44zJXiW>
- [21] J. Lascano, L. Chiza, R. Saraguro, C. Quinatoa, and J. Tapia, “Estimación de la demanda de una estación de carga para vehículos eléctricos mediante la aplicación de métodos probabilísticos,” *Revista Técnica Energía*, vol. 20, no. 1, pp. 52–64, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v20.n1.2023.569>



INTERCAMBIO TÉRMICO RADIANTE EN MEZCLAS DE H_2O Y CO_2

RADIATIVE HEAT TRANSFER IN H_2O AND CO_2 MIXTURES

Yanan Camaraza-Medina^{1,*}

Recibido: 27-11-2023, Recibido tras revisión: 07-05-2024, Aceptado: 13-05-2024, Publicado: 01-07-2024

Resumen

En este trabajo se presenta una solución aproximada para evaluar el intercambio de térmico por radiación a través de un medio participante gaseoso compuesto por H_2O y CO_2 , la cual es válida para valores del producto de la presión total y la longitud característica del haz de radiación (PL) desde 0,06 hasta 20 $atm \cdot m$ y temperaturas (T) desde 300 K a 2100 K. Para la aproximación de las SA disponibles es utilizado el método de ponderación de raíces de Spence. Para cada juego de valores PL, T es calculado el valor de emisividad y absorptividad espectral exacta ε_λ y a_λ para la mezcla de gases mediante la solución analítica (SA) y el valor de la emisividad y absorptividad de la mezcla ε_m y a_m , usando el método gráfico de Hottel (MGH) y la solución aproximada propuesta. El peor ajuste de correlación se corresponde al MGH, con errores medios de $\pm 15\%$ y $\pm 20\%$ para el 54,2 % y 75,3 % de los datos evaluados, respectivamente, mientras que el método propuesto proporciona el mejor ajuste, con errores medios de $\pm 10\%$ y $\pm 15\%$ para el 79,4 % y 98,6 % de los datos evaluados. En todos los casos, el acuerdo del modelo propuesto con los datos experimentales disponibles es lo suficientemente bueno como para ser considerado satisfactorio para el diseño práctico.

Palabras clave: medios participantes, emisividad, absorptividad, factor de visión, radiación térmica.

Abstract

This study presents an approximate solution for assessing radiation heat exchange within a gaseous participating medium consisting of H_2O and CO_2 . This solution is applicable for values of the product of the total pressure and the mean beam length (PL), ranging from 0.06 to 20 $atm \cdot m$, and temperatures (T) ranging from 300 K to 2100 K. To approximate the exact solutions, the Spence root weighting method is employed. The exact spectral emissivity and absorptivity ε_λ and a_λ of the gas mixture for each set of PL and T values are calculated using the analytical solution (AS). Additionally, the values of the emissivity and absorptivity of the mixture ε_m and a_m are determined using the Hottel graphical method (HGM) and the proposed approximate solution. The HGM shows a weaker correlation, with mean errors of $\pm 15\%$ and $\pm 20\%$ for 54.2% and 75.3% of the evaluated data, respectively. In contrast, the proposed method yields the best fit, with mean errors of $\pm 10\%$ and $\pm 15\%$ for 79.4% and 98.6% of the evaluated data, respectively. In all cases, the agreement between the proposed model and the available experimental data is deemed sufficiently robust to warrant consideration for practical design applications.

Keywords: Participating media, emissivity, absorptivity, view factor, thermal radiation

^{1,*}Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Guanajuato, México.
 Autor para correspondencia ✉: ycamaraza1980@yahoo.com.

Forma sugerida de citación: Camaraza-Medina, Y. "Intercambio térmico radiante en mezclas de H_2O y CO_2 ," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 32, pp. 36-47, 2024. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n32.2024.04>.

1. Introducción

En el intercambio térmico por radiación entre superficies, en muchas ocasiones para simplificar el análisis es admitido que ambas superficies están separadas por un medio no participante, o sea, que no emite, dispersa o absorbe la radiación. El aire atmosférico a temperaturas y presiones comunes se aproxima mucho a un medio no participante. Los gases que están compuestos por moléculas monoatómicas, como el helio y el argón, o de moléculas biatómicas simétricas, como el O_2 y el N_2 muestran un comportamiento cercano a un medio no participante, excepto a temperaturas extremadamente elevadas en las cuales ocurre la ionización. Por esta razón, en los cálculos relativos a la radiación ejecutados en la práctica, el aire atmosférico es considerado como un medio no participante [1–3].

Los gases con moléculas asimétricas, como SO_2 , CO , H_2O , CO_2 , y los hidrocarburos C_mH_n , a temperaturas moderadas pueden absorber energía en los procesos de transferencia de calor por radiación, mientras que a temperaturas elevadas, como las que se encuentran en las cámaras de combustión, pueden emitir y absorber simultáneamente. Por lo tanto, en cualquier medio que contenga ese tipo de gases en concentraciones suficientes, debe ser tomada en cuenta la influencia del medio participante en los cálculos relativos a la radiación. Los gases de la combustión en un horno o cámara contienen cantidades suficientes de H_2O y CO_2 , por tanto, la evaluación térmica del mismo debe incluir el efecto participante de los gases [4,5].

La presencia de un medio participante complejiza el análisis del intercambio térmico debido a la radiación. El medio participante absorbe y emite radiación en todo su volumen, de esta forma, la radiación gaseosa es un fenómeno volumétrico y, por tanto, depende del tamaño y de la forma del cuerpo, incluso si la temperatura fuese uniforme en todo el medio. Los sólidos emiten y absorben radiación sobre todo el espectro; sin embargo, los gases emiten y absorben energía en varias bandas angostas de longitudes de onda. Esto indica que, la hipótesis de considerar un cuerpo gris no siempre resulta ser apropiada para un gas, incluso cuando las superficies circundantes sean grises. Las características individuales de absorción y emisión de los gases que componen una mezcla, también dependen de la presión, temperatura y composición de esa mezcla. Por tanto, la presencia de otros gases participantes afecta las características de radiación de un gas en particular, debido al solapamiento de las bandas de emisión de cada gas componente de la mezcla [6–8].

En un gas, la distancia entre las moléculas y la movilidad es mayor que en los sólidos, lo cual propicia que una parte importante de la radiación emitida por las partes profundas llegue al contorno de delimitación de la masa. Las capas gruesas de un gas absorben más energía y transmiten menos que una capa delgada.

Esto ocasiona que, además de detallar las propiedades que fijan el estado del gas (temperatura y presión), también es requerido especificar una longitud característica L de la masa del gas antes de determinar sus propiedades radiativas, siendo dado el poder emisivo y el absorbente como una función de la longitud L que debe recorrer la radiación en la masa. Por tanto, en los gases el poder emisivo ε es una función del producto de la presión parcial del gas P_x y de la longitud característica del haz de radiación L [9–11].

La propagación de la radiación a través de un medio participante se puede complejizar debido al efecto simultáneo de aerosoles, como el polvo, las partículas de hollín (carbón no quemado), las gotitas de líquido y las partículas de hielo, las cuales dispersan la radiación. La dispersión se refiere al cambio de dirección de la radiación debido a la reflexión, refracción y difracción. La dispersión causada por las propias moléculas de gas se conoce como dispersión de Rayleigh y tiene un efecto despreciable sobre la transferencia de calor. Un estudio de avanzada sobre el intercambio térmico por radiación en medios dispersantes es abordado por varios investigadores [12–14].

La evaluación del intercambio térmico por radiación a través de medios participantes ha sido objeto de estudios durante décadas. Uno de los métodos más difundidos y recomendados en la literatura especializada es el método gráfico de Hottel (MGH), el cual proporciona una desviación media de $\pm 25\%$. El MGH se basa en la lectura e interpretación de nomogramas experimentales, lo cual introduce errores adicionales, debido a la lectura visual de gráficos, por tal motivo en muchos casos la desviación real puede computar valores superiores a $\pm 35\%$, lo cual es una limitante importante en su uso [15,16].

Desde el punto de vista matemático, el tratamiento analítico del problema resulta sumamente complejo, pues se requiere primeramente definir la solución analítica del factor de visión, para posteriormente realizar una integración volumétrica (puede simplificarse utilizando las ventajas del cálculo vectorial). Es lógico que el tratamiento matemático requerido involucre el manejo de un grupo elevado de funciones primitivas, las cuales en muchas ocasiones requieren del uso de métodos numéricos para la solución de funciones especiales, que son obtenidas en contornos con características cilíndricas o esféricas (funciones de Bessel, Spence y Godunov). Por esta razón, en la actualidad no se dispone de una SA para este tipo de problemas, los cuales son por lo general abordados por métodos aproximados en su mayoría derivados del método de Montecarlo y del uso de técnicas numéricas y el método de elementos finitos [17–19].

Aunque los medios participantes pueden ser también líquidos o sólidos semitransparentes, como el vidrio, agua y los plásticos, este trabajo se limita a los gases que emiten y absorben radiación. En particu-

lar se considerará la emisión y absorción de radiación solo por el H_2O y CO_2 , dado que son los gases participantes que se encuentran con mayor frecuencia en la práctica, pues los productos de la combustión en los hornos y las cámaras de combustión en los que se queman hidrocarburos contienen los tres gases en concentraciones elevadas [20–22].

Por tanto, el objetivo principal de este trabajo es obtener una solución aproximada para evaluar el intercambio térmico por radiación a través de un medio participante gaseoso compuesto por H_2O y CO_2 , que no muestre una elevada complejidad matemática y que garantice, además, un margen de error con respecto a la SA que se considere adecuado para el uso en ingeniería ($\pm 15\%$). En este trabajo también serán obtenidas las SA para determinar el valor de L en diversas combinaciones geométricas de superficies de uso extendido en ingeniería, así como la emisividad y absorptividad de la mezcla gaseosa participante.

Para establecer comparaciones fueron calculadas las soluciones analíticas de 355 combinaciones de temperatura termodinámica en el rango $300\text{ K} \leq T \leq 2100\text{ K}$ y del producto de la presión total de la mezcla de gases y la longitud característica del haz de radiación (PL) en el rango $0,06\text{ atm} \cdot m \leq PL \leq 20\text{ atm} \cdot m$. Para cada juego de valores PL, T es calculado el valor de emisividad y absorptividad espectral exacta ε_λ y α_λ para la mezcla de gases mediante la SA y el valor de la emisividad y absorptividad de la mezcla ε_m y α_m , usando el MGH y la solución aproximada propuesta.

Dado el carácter práctico de la contribución y los valores razonables de los ajustes obtenidos, la propuesta es una herramienta adecuada para su aplicación a la ingeniería térmica y prácticas afines que requieren cálculos de radiación térmica a través de medios participantes.

2. Materiales y métodos

2.1. Propiedades relativas a la radiación en un medio participante

Considérese un medio participante de espesor determinado. Sobre el medio incide un haz de radiación espectral de intensidad $I_{\lambda(0)}$, el cual es atenuado conforme se propaga debido a la absorción. La disminución en la intensidad de la radiación a medida que pasa a través de una capa de espesor dx es proporcional a la propia intensidad y al espesor dx . Esto se conoce como ley de Beer y se expresa como [23]:

Donde: k_λ – coeficiente de absorción espectral del medio.

Separando variables en la ecuación (1) e integrando entre los límites $x = 0$ hasta $x = L$ se obtiene [13]:

$$dI_{\lambda(x)} = -k_\lambda I_{\lambda(x)} dx \quad (1)$$

En la deducción de la ecuación (2) se ha supuesto que la absorptividad del medio es independiente de x , considerando que la decrece en forma exponencial. La transmisividad espectral de un medio se puede definir como la razón entre la intensidad de la radiación que sale del medio y la que entra en este; es decir:

$$\frac{I_{\lambda(L)}}{I_{\lambda(0)}} = e^{-k_\lambda L} \quad (2)$$

La transmisividad espectral τ_λ de un medio representa la fracción de la radiación transmitida por ese medio a cierta longitud de onda. La radiación que pasa a través de un medio no dispersante (y, por ende, no reflector) es absorbida o transmitida. Por lo tanto, se cumple que [12]:

$$\tau_\lambda = \frac{I_{\lambda(L)}}{I_{\lambda(0)}} = e^{-k_\lambda L} \quad (3)$$

$$\alpha_\lambda + \tau_\lambda = 1 \quad (4)$$

Combinando las ecuaciones (3) y (4) es obtenida la absorptividad espectral de un medio de espesor L la cual viene dada por la ecuación (5):

$$\alpha_\lambda = 1 - e^{-k_\lambda L} \quad (5)$$

Siguiendo el principio de la ley de Kirchhoff, la emisividad espectral es dada por la ecuación (6):

$$\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda = 1 - e^{-k_\lambda L} \quad (6)$$

Por tanto, la absorptividad, transmisividad y emisividad espectrales de un medio son valores adimensionales, cuyos valores son iguales o menores que la unidad. Los coeficientes ε_λ , α_λ y τ_λ varían con la longitud de onda, la temperatura, la presión y la composición de la mezcla [12].

2.2. Longitud media del haz de radiación

La emisividad y absorptividad de un gas va a ser dependiente de la longitud característica y de la forma y el tamaño de la masa gaseosa que interviene. Durante sus experimentos en la década de 1930, Hottel y sus colaboradores consideraron que la emisión de radiación va desde una masa hemisférica de gas hacia un pequeño elemento de superficie ubicado en el centro de la base del hemisferio. Por tanto, resulta conveniente extender los datos de la emisividad de los gases estudiados por Hottel hacia masas de gases con otras configuraciones geométricas, y esto se lleva a cabo mediante la introducción del concepto de longitud característica o media del haz L , la cual representa al radio de un hemisferio equivalente [24–26].

La SA, que permite obtener la emisividad espectral de la mezcla gaseosa participante, es una función del producto de la longitud L , la presión parcial del componente participante y el factor de visión entre

las superficies emisora y receptora (véase la Figura 1), siendo descrito mediante la ecuación (7) [27]:

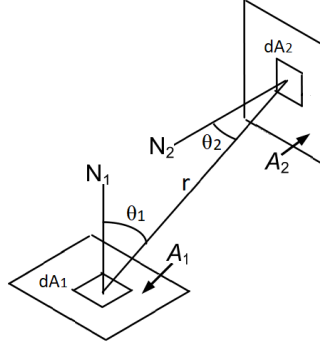


Figura 1. Geometría básica del factor de visión

$$\varepsilon_\lambda = \frac{V_{gas}}{\pi A} \int_0^\infty P_P dP \int_0^\infty (1 - e^{-k_\lambda L}) d\lambda \quad (7)$$

$$\int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{r^2} dA_1 dA_2$$

Donde: A_1 y A_2 son las superficies emisoras y receptoras. θ_1, θ_2 : ángulos entre el vector normal a las áreas dA_1 y dA_2 y la línea que conecta el centro de las superficies A_1 y A_2 . V_{gas} : área total de las superficies calefactoras y el volumen del recinto. r es la distancia entre el centro de las superficies A_1 y A_2 .

La ecuación (7) es muy compleja para ser usada en cálculos prácticos de ingeniería, por tal motivo en múltiples ocasiones se acude a simplificaciones o aproximaciones [28].

Resolver la ecuación (7) es una tarea compleja, fundamentalmente por la elevada cantidad de funciones primitivas e integrales inmediatas a ser manipuladas en el proceso de integración. Por esta razón, en la literatura especializada para determinar los valores de L son conocidas SA para casos puntuales [29], mientras que para otras configuraciones comunes solo se disponen de valores aproximados obtenidos de forma experimental [30].

2.3. Emisividad y absorptividad de gases participantes y mezclas de ellos

Las propiedades radiativas (PR) en un sólido opaco no dependen de la forma o configuración del mismo, sin embargo, la forma geométrica de un gas sí afecta sus PR. La absorptividad espectral del CO_2 se compone de cuatro bandas de absorción, posicionadas sobre las longitudes de onda de 1,9 μm , 2,7 μm , 4,3 μm , 15 μm [31].

Los mínimos y máximos de esta distribución, así como sus discontinuidades, muestran que las bandas de absorción de un gas se diferencian apreciablemente a las de un cuerpo gris. El ancho y la forma de las

bandas de absorción varían con la presión y la temperatura; además, el espesor de la capa de gas también ejerce una importante influencia. Por lo tanto, para la estimación de las PR de un gas, es requerido considerar estos tres parámetros [32].

La absorción y emisión en gases no se realiza de forma continua sobre todo el espectro. Las PR son más significativas en varias bandas con diferentes longitudes de onda y tienden a cero en otras bandas contiguas. En una mezcla gaseosa se complejiza aún más la predicción de las PR, debido al traslape de las bandas espectrales de los diferentes gases que componen la mezcla, por tanto, esta es la causa fundamental que en la actualidad no se dispongan de soluciones analíticas para la estimación de las PR [33].

En la ingeniería térmica, para estimar las PR en una mezcla gaseosa se ha generalizado un método aproximado dado por Hottel. El mismo consiste en evaluar de forma individual cada componente gaseoso que integra la mezcla y posteriormente corrigiendo este valor considerando la influencia de la presión parcial, la temperatura y el solapamiento de las bandas espectrales de los elementos componentes de la mezcla [29].

Este principio permite predecir la emisividad o absorptividad de una mezcla de gases con una desviación máxima de $\pm 25\%$. Sin embargo, el método de Hottel tiene el gran inconveniente que se fundamenta en la lectura e interpretación de resultados gráficos, lo cual introduce errores adicionales, por lo que los valores de PR estimados pueden computar una desviación media de $\pm 35\%$ e incluso superior [34].

La presión parcial P_x de cada componente en una mezcla de gases viene dado por la siguiente relación [34]:

$$P_x = P \cdot (\%_x) \quad (8)$$

Donde: P es la presión total de la mezcla de gases. $\%_c$ es la fracción porcentual de cada gas en la composición total. Se aclara que $1 \text{ atm} = 10^5 \text{ N/m}^2$.

En lo adelante será utilizado el subíndice w y c para referirse al H_2O y CO_2 , respectivamente. Las presiones parciales reducidas para el H_2O y CO_2 vienen dadas por:

$$P_{WL} = \frac{P_W \cdot L}{0,3048} \quad (9)$$

$$P_{CL} = \frac{P_C \cdot L}{0,3048} \quad (10)$$

Donde: P_W y P_C son las presiones parciales del H_2O y CO_2 , respectivamente; L , la longitud característica del haz de radiación.

Para una presión unitaria de 1 atm, las emisividades básicas del H_2O y CO_2 vienen dadas por las ecuaciones (11) y (12).

$$e_{W1} = \sqrt{P_{WL}} \left\{ \sqrt[4]{T}(0,078 - 0,003\sqrt[4]{T}) - 0,41 \right\} + \sqrt[4]{P_{WL}} \left\{ \sqrt[4]{T} \cdot (0,032 - 0,018\sqrt[4]{T}) + 0,88 \right\} + \sqrt[4]{T}(0,007\sqrt[4]{T} - 0,03) - 0,24 \quad (11)$$

$$e_{C1} = \left\{ \sqrt{P_{CL}} \left\{ \sqrt[4]{T} (0,024\sqrt[4]{T} - 0,264) + 0,5 \right\} + \sqrt[4]{P_{CL}} \left\{ \sqrt[4]{T} (0,484 - 0,042\sqrt[4]{T}) - 0,0774 \right\} + \sqrt[4]{T} (0,158 - 0,019\sqrt[4]{T}) - 0,051 \right\}^4 \quad (12)$$

En las ecuaciones (11) y (12) la temperatura del gas con las ecuaciones (11) y (12) deben ser corregidas. Los T es dada en K. Si se cumple que $P \neq 1$ atm, entonces factores de corrección son obtenidos por las siguientes las emisividades básicas del H_2O y CO_2 computadas relaciones:

$$C_W = \left\{ \sqrt[4]{P_{WL}} \cdot (0,137\sqrt[4]{P_{WL}} - 0,047\sqrt{P_{WL}} - 0,003) - 0,597 \right\} \cdot \left(\frac{P_W + P}{2} \right)^2 + \left\{ \sqrt[4]{P_{WL}} \cdot (0,685\sqrt{P_{WL}} - 2,033\sqrt[4]{P_{WL}} + 0,945) + 1,963 \right\} \cdot \left(\frac{P_W + P}{2} \right) + \sqrt[4]{P_{WL}}(0,982\sqrt[4]{P_{WL}} - 0,33\sqrt{P_{WL}} - 0,472) + 0,168 \quad (13)$$

$$C_c = \left\{ \sqrt[4]{P_{CL}}(0,332 - 0,0442\sqrt[4]{P_{CL}}) - 0,61 \right\} \cdot \sqrt{P} + \left\{ \sqrt[4]{P_{CL}}(0,44\sqrt[4]{P_{CL}} - 1,993) + 2,862 \right\} \cdot \sqrt[4]{P} + \sqrt[4]{P_{CL}}(1,594 - 0,362\sqrt[4]{P_{CL}}) - 1,171 \quad (14)$$

Por tanto, cuando $P \neq 1$ atm, las emisividades del H_2O y CO_2 vienen dadas por: con las presiones parciales, la suma de presiones parciales y la desviación de presiones parciales, las cuales quedan definidas por las relaciones siguientes:

$$e_W = e_{W1} \cdot C_W \quad (15)$$

$$P_1 = P_{WL} + P_{CL} \quad (17)$$

$$e_C = e_{C1} \cdot C_C \quad (16)$$

$$P_2 = P_W / (P_W + P_C) \quad (18)$$

Las emisividades obtenidas con el uso de las ecuaciones (15) y (16) corresponden a las fracciones individuales gaseosas de H_2O y CO_2 , respectivamente.

Para determinar la emisividad total es requerido determinar un coeficiente de corrección que considere el efecto del traslape de las bandas de emisión. Este factor de corrección es dependiente de la temperatura y de las presiones parciales del H_2O y CO_2 . Para definir el factor de corrección se establecen dos combinaciones

El factor de corrección es obtenido mediante la integración directa de la ecuación (17). El procedimiento matemático es en extremo complejo, razón por la cual acá solamente serán dados los factores de corrección para tres valores prefijados de temperaturas, $T = 400$ K, $T = 800$ K y $T \geq 1200$ K, los cuales vienen dados por:

$$C_{r(T=400K)} = \left\{ \sqrt[4]{P_1} \cdot (1,841\sqrt[4]{P_1} - 0,807\sqrt{P_1} - 2,282) + 1,059 \right\} \cdot (P_2)^4 + \left\{ \sqrt[4]{P_1} \cdot (3,067\sqrt{P_1} - 9,259\sqrt[4]{P_1} + 11,07) - 4,585 \right\} \cdot (P_2)^3 + \left\{ \sqrt[4]{P_1} \cdot (11,79\sqrt[4]{P_1} - 3,491\sqrt{P_1} - 14,15) + 5,678 \right\} \cdot (P_2)^2 + \left\{ \sqrt[4]{P_1} \cdot (1,332\sqrt{P_1} - 4,685\sqrt[4]{P_1} + 5,667) - 2,249 \right\} \cdot P_2 \quad (19)$$

$$\begin{aligned}
C_{r(T=800K)} = & \left\{ \sqrt[4]{P_1} \cdot \left(3.277\sqrt{P_1} - 10.46\sqrt[4]{P_1} + 9.524 \right) - 2.387 \right\} \cdot (P_2)^4 \\
& + \left\{ \sqrt[4]{P_1} \cdot \left(22\sqrt[4]{P_1} - 6.7\sqrt{P_1} - 21.12 \right) + 5.889 \right\} \cdot (P_2)^3 \\
& + \left\{ \sqrt[4]{P_1} \cdot \left(4.237\sqrt{P_1} - 14.2\sqrt[4]{P_1} + 14.02 \right) - 4.133 \right\} \cdot (P_2)^2 \\
& + \left\{ \sqrt[4]{P_1} \cdot \left(2.91\sqrt[4]{P_1} - 0.869\sqrt{P_1} - 2.782 \right) + 0.801 \right\} \cdot P_2
\end{aligned} \tag{20}$$

$$\begin{aligned}
C_{r(T \geq 1200K)} = & \left\{ \sqrt[4]{P_1} \cdot \left(9.731\sqrt{P_1} - 32.35\sqrt[4]{P_1} + 33.49 \right) - 10.83 \right\} \cdot (P_2)^4 \\
& + \left\{ \sqrt[4]{P_1} \cdot \left(63.03\sqrt[4]{P_1} - 18.69\sqrt{P_1} - 66.09 \right) + 21.64 \right\} \cdot (P_2)^3 \\
& + \left\{ \sqrt[4]{P_1} \cdot \left(10.49\sqrt{P_1} - 35.51\sqrt[4]{P_1} + 36.98 \right) - 12.04 \right\} \cdot (P_2)^2 \\
& + \left\{ \sqrt[4]{P_1} \cdot \left(4.939\sqrt[4]{P_1} - 1.533\sqrt{P_1} - 4.589 \right) + 1.335 \right\} \cdot P_2
\end{aligned} \tag{21}$$

Para valores de temperaturas situados en los intervalos $400\text{ K} < T < 800\text{ K}$ y $800\text{ K} < T < 1200\text{ K}$, el factor de corrección $C_{r(T)}$ será determinado mediante

la interpolación lineal de Newton, usando las siguientes relaciones:

$$400\text{ K} < T < 800\text{ K} \quad C_{r(T)} = C_{r(T=400\text{ K})} + \frac{C_{r(T=800\text{ K})} - C_{r(T=400\text{ K})}}{400} \cdot (T - 400) \tag{22}$$

$$800\text{ K} < T < 1200\text{ K} \quad C_{r(T)} = C_{r(T=800\text{ K})} + \frac{C_{r(T \geq 1200\text{ K})} - C_{r(T=800\text{ K})}}{400} \cdot (T - 800) \tag{23}$$

Conocido el factor de corrección $C_{r(T)}$ de la mezcla, entonces la emisividad efectiva de la mezcla e_m viene dada por la siguiente ecuación:

$$e_m = e_W + e_C - C_{r(T)} \tag{24}$$

Para determinar la absorptividad de los gases es requerido modificar las presiones parciales reducidas, dado que la temperatura de referencia en este caso corresponde a la fuente (emisor o pared), por tanto, las ecuaciones (9) y (10) son transformadas de la siguiente manera:

$$P_{WLL} = \frac{P_W \cdot L \cdot T}{0.3048 \cdot T_s} \tag{25}$$

$$P_{CLL} = \frac{P_C \cdot L \cdot T}{0.3048 \cdot T_s} \tag{26}$$

Donde: T_s corresponde a las temperaturas de las superficies emisoras.

Para una presión unitaria de 1 atm, las absorptividades básicas del H_2O y CO_2 vienen dadas por:

$$\begin{aligned}
a_{W1} = & \sqrt{P_{WLL}} \left\{ \sqrt[4]{T_s} \left(0.078 - 0.003\sqrt[4]{T_s} \right) - 0.41 \right\} \\
& + \sqrt[4]{P_{WLL}} \left\{ \sqrt[4]{T_s} \cdot \left(0.032 - 0.018\sqrt[4]{T_s} \right) + 0.88 \right\} \\
& + \sqrt[4]{T_s} \left(0.007\sqrt[4]{T_s} - 0.03 \right) - 0.24
\end{aligned} \tag{27}$$

$$\begin{aligned}
a_{C1} = & \left\{ \sqrt{P_{CLL}} \left\{ \sqrt[4]{T_s} \left(0.024\sqrt[4]{T_s} - 0.264 \right) + 0.5 \right\} \right. \\
& + \sqrt[4]{P_{CLL}} \left\{ \sqrt[4]{T_s} \cdot \left(0.484 - 0.042\sqrt[4]{T_s} \right) - 0.774 \right\} \\
& \left. + \sqrt[4]{T_s} \left(0.158 - 0.019\sqrt[4]{T_s} \right) - 0.051 \right\}^4
\end{aligned} \tag{28}$$

En las ecuaciones (27) y (28) la temperatura de la superficie emisora T_s es dada en K.

Si se cumple que $P \neq 1$ atm, entonces los valores de absorptividades básicas para el H_2O y CO_2 deben ser modificados, u utilizando para este propósito los factores de corrección calculados con las ecuaciones (13) y (14), y un factor termodinámico que tiene en cuenta la no uniformidad de la distribución de las temperaturas en la superficie emisora y en el seno del gas. Matemáticamente esto queda de la forma siguiente:

$$C_{Wa} = C_W \cdot \left(\frac{T}{T_s} \right)^{0.45} \tag{29}$$

$$C_{Ca} = C_C \cdot \left(\frac{T}{T_s} \right)^{0.65} \tag{30}$$

Por tanto, cuando $P \neq 1$ atm, las absorptividades del H_2O y CO_2 vienen dadas por:

$$a_W = a_{W1} \cdot C_{Wa} \tag{31}$$

$$a_C = a_{C1} \cdot C_{Ca} \tag{32}$$

Las absorptividades calculadas mediante las ecuaciones (31) y (32) corresponden a las fracciones individuales gaseosas de H_2O y CO_2 , respectivamente.

Para calcular la absorptividad total es requerido determinar un coeficiente de corrección que considere el efecto del traslape de las bandas de absorción. Este factor de corrección depende de la suma de las presiones parciales reducidas del H_2O y CO_2 , la cual es obtenida mediante la siguiente relación:

$$P_3 = P_{WLL} + P_{CLL} \quad (33)$$

El factor de corrección es obtenido mediante la integración directa de la ecuación (7). Dado el elevado grado de complejidad de este proceso de integración, acá solamente serán proporcionados los factores de corrección para tres valores prefijados de temperaturas, $T = 400K$, $T = 800K$ y $T \geq 1200K$, los cuales vienen dados por:

$$\begin{aligned} C_{ra(T=400K)} = & \left\{ \sqrt[4]{P_3} \cdot \left(1.841 \sqrt[4]{P_3} - 0.807 \sqrt{P_3} - 2.282 \right) + 1.059 \right\} \cdot (P_2)^4 \\ & + \left\{ \sqrt[4]{P_3} \left(3.067 \sqrt{P_3} - 9.259 \sqrt[4]{P_3} + 11.07 \right) - 4.585 \right\} \cdot (P_2)^3 \\ & + \left\{ \sqrt[4]{P_3} \left(11.79 \sqrt[4]{P_3} - 3.491 \sqrt{P_3} - 14.15 \right) + 5.678 \right\} \cdot (P_2)^2 \\ & + \left\{ \sqrt[4]{P_3} \cdot \left(1.332 \sqrt{P_3} - 4.685 \sqrt[4]{P_3} + 5.667 \right) - 2.249 \right\} \cdot P_2 \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} C_{ra(T=800K)} = & \left\{ \sqrt[4]{P_3} \cdot \left(3.277 \sqrt{P_3} - 10.46 \sqrt[4]{P_3} + 9.524 \right) - 2.387 \right\} \cdot (P_2)^4 \\ & + \left\{ \sqrt[4]{P_3} \cdot \left(22 \sqrt[4]{P_3} - 6.7 \sqrt{P_3} - 21.12 \right) + 5.889 \right\} \cdot (P_2)^3 \\ & + \left\{ \sqrt[4]{P_3} \left(4.237 \sqrt{P_3} - 14.2 \sqrt[4]{P_3} + 14.02 \right) - 4.133 \right\} \cdot (P_2)^2 \\ & + \left\{ \sqrt[4]{P_3} \cdot \left(2.91 \sqrt[4]{P_3} - 0.869 \sqrt{P_3} - 2.782 \right) + 0.801 \right\} \cdot P_2 \end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} C_{ra(T \geq 1200K)} = & \left\{ \sqrt[4]{P_3} \cdot \left(9.731 \sqrt{P_3} - 32.35 \sqrt[4]{P_3} + 33.49 \right) - 10.83 \right\} \cdot (P_2)^4 \\ & + \left\{ \sqrt[4]{P_3} \cdot \left(63.03 \sqrt[4]{P_3} - 18.69 \sqrt{P_3} - 66.09 \right) + 21.64 \right\} \cdot (P_2)^3 \\ & + \left\{ \sqrt[4]{P_3} \cdot \left(10.49 \sqrt{P_3} - 35.51 \sqrt[4]{P_3} + 36.98 \right) - 12.04 \right\} \cdot (P_2)^2 \\ & + \left\{ \sqrt[4]{P_3} \cdot \left(4.939 \sqrt[4]{P_1} - 1.533 \sqrt{P_3} - 4.589 \right) + 1.335 \right\} \cdot P_2 \end{aligned} \quad (36)$$

En las ecuaciones (34) a la (36), la desviación de presiones parciales P_2 es calculada usando la ecuación (18). Para valores de temperaturas situados en los intervalos $400 K < T < 800 K$ y $800 K < T < 1200 K$,

el factor de corrección $C_{ra(T)}$ será determinado mediante la interpolación lineal de Newton, usando las siguientes relaciones:

$$400 K < T < 800 K \quad C_{ra}(T) = C_{ra}(T = 400 K) + \frac{C_{ra}(T = 800 K) - C_{ra}(T = 400 K)}{400} \cdot (T - 400) \quad (37)$$

$$800 K < T < 1200 K \quad C_{ra}(T) = C_{ra}(T = 800 K) + \frac{C_{ra}(T \geq 1200 K) - C_{ra}(T = 800 K)}{400} \cdot (T - 800) \quad (38)$$

Conocido el factor de corrección $C_{ra(T)}$ de la mezcla, entonces la absorptividad efectiva de la mezcla a_m

viene dada por la siguiente ecuación:

$$a_m = a_W + a_C - C_{ra(T)} \quad (39)$$

3. Resultados y discusión

3.1. Validación del modelo propuesto

Para la validación del modelo propuesto son usados valores aleatorios de temperaturas en el rango $300K \leq T \leq 2100K$, y seis valores prefijados del producto PL (0.06, 0.6, 3, 5, 10, 20) atm/m, con 55, 55, 45, 55, 45 y 80 datos para cada intervalo PL, respectivamente. Para cada combinación (PL, T) es calculado el valor de emisividad espectral exacta ε_λ mediante la SA, y el valor de la emisividad de la mezcla e_m , usando el MGH y la ecuación (24).

En la Figura 2 es correlacionado el cociente ε_λ/e_m y la temperatura T, ajustados en bandas de error de $\pm 15\%$ y $\pm 20\%$, siendo utilizados los valores de e_m obtenidos mediante el MGH, mientras que en la Figura 3 es correlacionado el cociente ε_λ/e_m y la temperatura T, ajustados en bandas de error de $\pm 10\%$ y $\pm 15\%$, usando los valores de e_m calculados mediante la ecuación (24).

El porcentaje de desviación (error) es computado con respecto a la SA y es obtenido mediante la siguiente relación [35]:

$$D\% = E\% = 100 \cdot \left(\frac{\varepsilon_\lambda - e_m}{\varepsilon_\lambda} \right) \quad (40)$$

La Figura 2 muestra que el MGH proporciona el peor ajuste con respecto a la SA, con errores medios de $\pm 15\%$ y $\pm 20\%$ para el 54,2 % y 75,3 % de los puntos (PL, T) evaluados. Para el MGH el mejor ajuste es obtenido para PL=3,0, con errores medios de $\pm 15\%$ y $\pm 20\%$ para el 63,2 % y 84,2 % de los datos evaluados, mientras que el peor ajuste es obtenido para PL=10, con errores medios de $\pm 15\%$ y $\pm 20\%$ para el 42,7 % y 57,1 % de los datos evaluados.

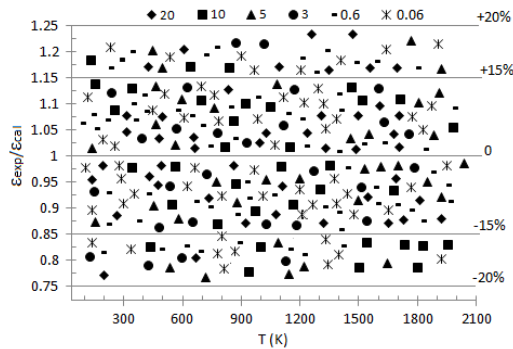


Figura 2. Correlación entre la temperatura T y el cociente ε_λ/e_m usando el MGH

La Figura 3 muestra que la ecuación (24) proporciona el mejor ajuste con respecto a la SA, con errores medios de $\pm 10\%$ y $\pm 15\%$ para el 79,4 % y 94,9 % de los puntos (PL, T) evaluados. Para la ecuación (24) el mejor ajuste es obtenido para PL=20, con errores

medios de $\pm 10\%$ y $\pm 15\%$ para el 83,2 % y 98,6 % de los datos evaluados, mientras que el peor ajuste es obtenido para PL=0,6, con errores medios de $\pm 10\%$ y $\pm 15\%$ para el 75,1 % y 91,9 % de los datos evaluados.

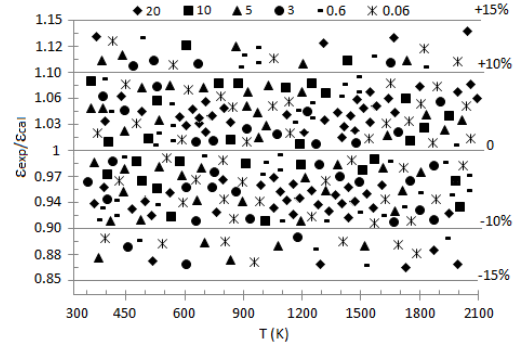


Figura 3. Correlación entre la temperatura T y el cociente ε_λ/e_m usando la ecuación (24).

3.2. Aplicación a un caso de estudio

Un horno presurizado, con dimensiones (largo $\times$ ancho $\times$ alto) igual a (3 m $\times$ 4 m $\times$ 5 m) contiene gases de combustión a $T = 1200$ K y una presión $P = 2$ atm, mientras que la temperatura de la superficie de las paredes del horno $T_s = 1100$ K. Mediante análisis volumétrico se determina que la composición de los gases de combustión es 87 % de $N_{2,8}$ % de $H_{2,8}$ y 5 % de CO_2 . Es requerido calcular el calor transferido entre los gases de combustión y las paredes del horno, (ladrillo con la superficie gris, satinada).

Utilizando las relaciones dadas en [29] se determina que $L = 3,04$ m ≈ 3 m. Mediante la ecuación (8) son obtenidas las presiones parciales del H_2O y CO_2 , computando $P_W = 0,16$ y $P_C = 0,1$, respectivamente. Las presiones parciales reducidas son calculadas mediante las ecuaciones (9) y (10), obteniéndose $P_{WL} = 1,575$ atm $\cdot$ m y $P_{CL} = 0,984$ atm $\cdot$ m. Las emisividades básicas para el H_2O y CO_2 son obtenidas usando ecuaciones (11) y (12) respectivamente, siendo $e_{W1} = 0,255$ y $e_{C1} = 0,135$.

Como $P \neq 1$ atm, entonces los valores de emisividades básicas del H_2O y CO_2 , deben ser corregidas mediante las ecuaciones (13) y (14), respectivamente, obteniendo $C_W = 1,379$ y $C_C = 1,166$. Las emisividades reales del H_2O y CO_2 son determinadas a través de las ecuaciones (15) y (16), obteniéndose que $e_W = 0,3524$ y $e_C = 0,157$. Se calculan la suma P_1 y desviación P_2 de presiones parciales, usando las relaciones (17) y (18), respectivamente, obteniendo $P_1 = 2,559$ atm $\cdot$ m y $P_2 = 0,615$ atm $\cdot$ m.

La temperatura de la mezcla de gases es 1200 K, por tanto, el coeficiente de corrección $C_{r(T=1200K)}$ se estima utilizando la ecuación (21), $C_{r(T=1200K)} = 0,052$ atm $\cdot$ m. La emisividad efectiva de la mezcla

e_m viene dada por la ecuación (24), donde $e_m = 0,458$. Usando la ecuación (7), tras un engorroso proceso de integración es obtenido el valor exacto de $\varepsilon_\lambda = 0,463$, mientras que el MGH proporciona un valor de $e_m = 0,43$. Mediante la ecuación (40), es determinado el error con respecto a la SA, siendo $D_\% = 1,08\%$ y $D_\% = 7.13\%$, para la ecuación (24) y el MGH, respectivamente.

Las presiones reducidas modificadas son obtenidas mediante las ecuaciones (25) y (26), obteniéndose $P_{WLL} = 1,718 \text{ atm} \cdot m$ y $P_{CLL} = 1,073 \text{ atm} \cdot m$. Las absorptividades básicas para el H_2O y CO_2 son calculadas mediante las ecuaciones (27) y (28) respectivamente, siendo $a_{W1} = 0,275$ y $a_{C1} = 0,144$.

Como $P \neq 1 \text{ atm}$, entonces las absorptividades básicas del H_2O y CO_2 , deben ser corregidas mediante las ecuaciones (29) y (30), respectivamente, obteniendo $C_{Wa} = 1,434$ y $C_{Ca} = 1,234$. Las absorptividades de las fracciones de H_2O y CO_2 son determinadas usando las ecuaciones (31) y (32), obteniéndose que $a_W = 0,394$ y $a_C = 0,178$. Se calcula la suma de presiones parciales P_3 usando la ecuación (33), obteniéndose que $P_3 = 2,791 \text{ atm} \cdot m$.

La temperatura de la mezcla de gases es 1200 K , por tanto, el coeficiente de corrección $C_{ra(T=1200K)}$ se estima utilizando la ecuación (36), $C_{ra(T=1200K)} = 0,053 \text{ atm} \cdot m$. La absorptividad efectiva de la mezcla a_m viene dada por la ecuación (39), donde $a_m = 0,519$. Usando las ecuaciones (6) y (7), tras un tedioso manejo de integrales inmediatas, es obtenido el valor exacto de $a = 0,525$, mientras que el MGH proporciona un valor de $a_m = 0,449$. Utilizando la ecuación (40), es determinado el error computado con respecto a la SA, siendo $D_\% = 1,14\%$ y $D_\% = 14,48\%$, para la ecuación (24) y el MGH, respectivamente.

Las paredes del horno son de ladrillo, con una superficie gris (satinada) a una temperatura media $T_s = 1100 \text{ K}$. Con estas características la emisividad normal de la superficie es $e_s = 0,75$.

El flujo de calor intercambiado entre los gases y la pared del horno viene dado por:

$$Q_n = \frac{\varepsilon_s + 1}{2} A_s \sigma (\varepsilon_m T^4 - a_m (T_s)^4) \quad (41)$$

Los valores del flujo de calor intercambiado (en kW) son obtenidos mediante el uso de la SA, el MGH y la ecuación (24), siendo determinado, además, el error computado con respecto a la SA. En la Tabla 1 son resumidos los valores de flujo de calor (en kW) obtenidos y el error cometido $E_\%$ en cada caso con respecto a la SA.

Tabla 1. Valores Q_n y $E_\%$ obtenidos, caso de estudio

Métodos	$Q_n(\text{kW})$	$E_\%(\%)$
SA	56.822	-
MHG	697.354	-22,4
Método propuesto	565.108	0.82

4. Conclusiones

A partir de la comparación de SA, es obtenido un método aproximado para estimar el intercambio térmico por radiación a través de medios participantes. Los modelos propuestos fueron verificados por comparación con las SA disponibles.

Para el MGH y el método propuesto, los modelos obtenidos correlacionan con la totalidad de los datos experimentales con una desviación media de $\pm 20\%$ y $\pm 10\%$, respectivamente.

Para el MGH el peor ajuste con respecto a la SA es obtenido para $PL = 10$, con un error medio de $\pm 20\%$ para $57,1\%$ de los datos evaluados, mientras que el mejor ajuste es obtenido para $PL = 3,0$, con un error medio de $\pm 15\%$ para el $63,2\%$ de los datos evaluados. Para el método propuesto el peor ajuste con respecto a la SA es obtenido para $PL = 0,6$, con un error medio de $\pm 15\%$ para $91,9\%$ de los datos examinados, mientras que el mejor ajuste es obtenido para $PL = 20$, con un error medio de $\pm 10\%$ para el $83,2\%$ de los datos evaluados.

En todos los casos, el acuerdo del modelo propuesto con los datos experimentales disponibles es lo suficientemente bueno como para ser considerado satisfactorio para diseño práctico.

Agradecimientos

El autor muestra su agradecimiento por las recomendaciones recibidas del profesor Dr. John R. Howell, Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Texas en Austin.

Referencias

- [1] M. H. Bordbar, G. Węcel, and T. Hyppänen, "A line by line based weighted sum of gray gases model for inhomogeneous CO_2-H_2O mixture in oxy-fired combustion," *Combustion and Flame*, vol. 161, no. 9, pp. 2435–2445, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2014.03.013>
- [2] M. F. Modest and R. J. Riazzi, "Assembly of full-spectrum k-distributions from a narrow-band database; effects of mixing

- gases, gases and nongray absorbing particles, and mixtures with nongray scatterers in nongray enclosures,” *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 90, no. 2, pp. 169–189, 2005. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2004.03.007>
- [3] M. Cui, X. Gao, and H. Chen, “Inverse radiation analysis in an absorbing, emitting and non-gray participating medium,” *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 50, no. 6, pp. 898–905, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2011.01.018>
- [4] T. J. Moore and M. R. Jones, “Analysis of the conduction–radiation problem in absorbing, emitting, non-gray planar media using an exact method,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 73, pp. 804–809, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.02.029>
- [5] L. J. Dorigon, G. Duciak, R. Brittes, F. Cassol, M. Galarça, and F. H. França, “WSGG correlations based on HITEMP2010 for computation of thermal radiation in non-isothermal, non-homogeneous H_2O/CO_2 mixtures,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 64, pp. 863–873, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.05.010>
- [6] F. Cassol, R. Brittes, F. H. França, and O. A. Ezekoye, “Application of the weighted-sum-of-gray-gases model for media composed of arbitrary concentrations of H_2O , CO_2 and soot,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 79, pp. 796–806, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.08.032>
- [7] F. R. Centeno, R. Brittes, F. H. França, and O. A. Ezekoye, “Evaluation of gas radiation heat transfer in a 2D axisymmetric geometry using the line-by-line integration and WSGG models,” *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 156, pp. 1–11, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2015.01.015>
- [8] Y. Camaraza-Medina, “Polynomial cross-roots application for the exchange of radiant energy between two triangular geometries,” *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, no. 30, pp. 29–41, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17163/ings.n30.2023.03>
- [9] M. Alberti, R. Weber, and M. Mancini, “Re-creating Hottel’s emissivity charts for water vapor and extending them to 40 bar pressure using HITEMP-2010 data base,” *Combustion and Flame*, vol. 169, pp. 141–153, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2016.04.013>
- [10] —, “Gray gas emissivities for $H_2O-CO_2-CO-N_2$ mixtures,” *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 219, pp. 274–291, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2018.08.008>
- [11] S. Khivsara, M. U. M. Reddy, K. Reddy, and P. Dutta, “Measurement of radiation heat transfer in supercritical carbon dioxide medium,” *Measurement*, vol. 139, pp. 40–48, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.03.012>
- [12] M. F. Modest and S. Mazumder, “Chapter 4 - view factors,” in *Radiative Heat Transfer (Fourth Edition)*, fourth edition ed., M. F. Modest and S. Mazumder, Eds. Academic Press, 2022, pp. 127–159. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818143-0.00012-2>
- [13] Y. Camaraza-Medina, A. Hernández-Guerrero, and J. L. Luviano-Ortiz, “Experimental study on influence of the temperature and composition in the steels thermo physical properties for heat transfer applications,” *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 147, no. 21, pp. 11 805–11 821, Nov 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11410-8>
- [14] J. Howell, M. Meng"u, K. Daun, and R. Siegel, *Thermal Radiation Heat Transfer*. CRC Press, 2021. [Online]. Available: <https://lc.cx/2KIpyY>
- [15] J. Farmer and S. Roy, “A quasi-Monte Carlo solver for thermal radiation in participating media,” *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 242, p. 106753, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2019.106753>
- [16] T. Li, X. Lin, Y. Yuan, D. Liu, Y. Shuai, and H. Tan, “Effects of flame temperature and radiation properties on infrared light field imaging,” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 36, p. 102215, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102215>
- [17] S. Li, Y. Sun, J. Ma, and R. Zhou, “Angular-spatial discontinuous galerkin method for radiative heat transfer with a participating medium in complex three-dimensional geometries,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 145, p. 106836, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.106836>

- [18] J. Ávalos Patiño, S. Dargaville, S. Neethling, and M. Piggott, "Impact of inhomogeneous unsteady participating media in a coupled convection–radiation system using finite element based methods," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 176, p. 121452, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121452>
- [19] Y. Camaraza-Medina, A. Hernández-Guerrero, and J. L. Luviano-Ortiz, "Analytical view factor solution for radiant heat transfer between two arbitrary rectangular surfaces," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 147, no. 24, pp. 14999–15016, Dec 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11646-4>
- [20] B.-H. Gao, H. Qi, J.-W. Shi, J.-Q. Zhang, Y.-T. Ren, and M.-J. He, "An equation-solving method based on radiation distribution factor for radiative transfer in participating media with diffuse boundaries," *Results in Physics*, vol. 36, p. 105418, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2022.105418>
- [21] S. Sun, "Simultaneous reconstruction of thermal boundary condition and physical properties of participating medium," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 163, p. 106853, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.106853>
- [22] B.-H. Gao, H. Qi, A.-T. Sun, J.-W. Shi, and Y.-T. Ren, "Effective solution of three-dimensional inverse radiation problem in participating medium based on RDFIEM," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 156, p. 106462, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2020.106462>
- [23] E. Gümücşsu and H. I. Tarman, "Numerical simulation of duct flow in the presence of participating media radiation with total energy based entropic lattice Boltzmann method," *International Journal of Thermofluids*, vol. 20, p. 100516, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100516>
- [24] Y. Camaraza-Medina, A. M. Rubio-Gonzales, O. M. Cruz-Fonticciella, and O. F. Garcia-Morales, "Analysis of pressure influence over heat transfer coefficient on air cooled condenser," *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, vol. 50, no. 3, pp. 213–226, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3166/JESA.50.213-226>
- [25] P. Sadeghi and A. Safavinejad, "Radiative entropy generation in a gray absorbing, emitting, and scattering planar medium at radiative equilibrium," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 201, pp. 17–29, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2017.06.023>
- [26] Y. Wang, A. Sergent, D. Saury, D. Lemonnier, and P. Joubert, "Numerical study of an unsteady confined thermal plume under the influence of gas radiation," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 156, p. 106474, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2020.106474>
- [27] Y. Camaraza-Medina, Y. Retirado-Mediaceja, A. Hernández-Guerrero, and J. Luis Luviano-Ortiz, "Energy efficiency indicators of the steam boiler in a power plant of Cuba," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 23, p. 100880, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.100880>
- [28] Y. Camaraza-Medina, A. Hernández-Guerrero, and J. L. Luviano-Ortiz, "Contour integration for the view factor calculation between two rectangular surfaces," *Heat Transfer*, vol. 53, no. 1, pp. 225–243, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/htj.22950>
- [29] Y. Camaraza-Medina, A. Hernandez-Guerrero, and J. L. Luviano-Ortiz, "Radiant energy exchange through participating media composed of arbitrary concentrations of H₂O, CO₂, and CO," *Heat Transfer*, vol. 53, no. 4, pp. 2073–2094, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/htj.23026>
- [30] X. Liu, S. Kelm, M. Kampili, G. V. Kumar, and H.-J. Allelein, "Monte Carlo method with SNBCK nongray gas model for thermal radiation in containment flows," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 390, p. 111689, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2022.111689>
- [31] Y. Camaraza-Medina, A. Hernández-Guerrero, and J. Luis Luviano-Ortiz, "Contour integration for the exchange of radiant energy between diffuse rectangular geometries," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 47, p. 102289, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.102289>
- [32] A. Mukherjee, V. Chandrakar, and J. R. Senapati, "New correlations for infrared suppression devices having louvered diabatic tubes with surface radiation," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 44, p. 102011, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.102011>
- [33] V. Chandrakar, A. Mukherjee, and J. R. Senapati, "Free convection heat transfer with

- surface radiation from infrared suppression system and estimation of cooling time,” *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 33, p. 101369, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101369>
- [34] F. Asllanaj, S. Contassot-Vivier, G. C. Fraga, F. H. França, and R. J. da Fonseca, “New gas radiation model of high accuracy based on the principle of weighted sum of gray gases,” *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 315, p. 108887, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2023.108887>
- [35] Y. Camaraza-Medina, A. A. Sánchez Escalona, O. Miguel Cruz-Fonticiella, and O. F. García-Morales, “Method for heat transfer calculation on fluid flow in single-phase inside rough pipes,” *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 14, p. 100436, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.100436>



OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO VARTM, PARA EL PROTOTIPADO DE UN GUARDACHOQUE, UTILIZANDO MATERIALES COMPUESTOS HÍBRIDOS

OPTIMIZATION OF THE VARTM PROCESS FOR PROTOTYPING A BUMPER USING HYBRID COMPOSITE MATERIALS

Diego Javier Jiménez-Pereira^{1,*} , Christian Augusto Picoita-Camacho² 

Recibido: 30-09-2023, Recibido tras revisión: 30-04-2024, Aceptado: 20-05-2024, Publicado: 01-07-2024

Resumen

Con el fin de brindar una alternativa para la manufactura de autopartes utilizando materiales compuestos, se aplicó el proceso VARTM en el prototipado del guardachoque del vehículo Chevrolet Aveo. Esta técnica surge como una alternativa para la fabricación de materiales compuestos, ya que permite realizar una producción rápida y de alta calidad de compuestos avanzados. En el presente estudio, se utilizó un material compuesto híbrido reforzado con fibra de vidrio, cabuya, resina epóxica IN2, una malla de infusión, peel ply y una bolsa de vacío. Para la optimización del proceso VARTM en el prototipado del guardachoque, se llevaron a cabo varias simulaciones de flujo de resina con distintas ubicaciones de los puntos de entrada de resina y de vacío. El software Autodesk Moldflow Insight permitió modificar y agregar puntos de entrada de resina con el fin de observar la evolución del flujo y de esta forma llegar a determinar el tiempo de llenado para cada diseño planteado. Se aplicaron seis diseños diferentes para el llenado del molde del guardachoque. El diseño propuesto de flujo lineal reduce un 81,56 % el tiempo total de llenado del molde del guardachoque en comparación con los otros 5 diseños analizados. El resultado de la simulación numérica fue validado mediante la experimentación del proceso, donde se obtuvo una gran concordancia del tiempo de llenado del molde entre ambos métodos.

Palabras clave: fibra de cabuya, fibra de vidrio, guardachoque, optimización, resina, simulación, VARTM

Abstract

To provide an alternative for manufacturing auto parts using composite materials, the Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM) process was utilized to prototype the bumper for the Chevrolet Aveo vehicle. This technique emerges as an alternative for composite material manufacturing, allowing for rapid and high-quality production of advanced composites. In this study, a hybrid composite material reinforced with fiberglass, cabuya fiber, IN2 epoxy resin, an infusion mesh, peel ply, and a vacuum bag was employed. To optimize the VARTM process in bumper prototyping, several simulations of resin flow were conducted with different locations of resin injection and vacuum entry points. Autodesk Moldflow Insight software facilitated the modification and addition of resin injection points to observe the flow evolution, thus determining the filling time for each proposed design. Six different designs were applied for the bumper mold filling. The proposed linear flow design reduced the total filling time of the bumper mold by 81.56% compared to the other five designs analyzed. The result of the numerical simulation was validated through the experimental process, where a high degree of concordance in the mold filling time was achieved between both methods.

Keywords: bumper, cabuya fiber, fiberglass, optimization, resin, simulation, VARTM

^{1,*}Carrera de Tecnología Superior en Mecánica Automotriz, Instituto Superior Tecnológico Loja, Ecuador.

Autor para correspondencia ✉: djjimenez@tecnologicoloja.edu.ec.

²Carrera de Tecnología Superior en Electricidad, Instituto Superior Tecnológico Loja, Ecuador.

Forma sugerida de citación: Jiménez-Pereira, D.J. and Picoita-Camacho, C.A. "Optimización del proceso VARTM, para el prototipado de un guardachoque, utilizando materiales compuestos híbridos," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 32, pp. 48-57, 2024. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n32.2024.05>.

1. Introducción

El proceso de manufactura que se utiliza comúnmente para la fabricación de guardachoques es la inyección de plástico. En este proceso, el plástico fundido se inyecta a presión dentro de un molde para crear la forma deseada del guardachoque. Si bien es cierto, este proceso requiere herramientas costosas y una fuerte inversión, la tecnología se ve favorecida debido a que permite una alta reproducibilidad de piezas con una excelente calidad [1].

Como alternativa para la fabricación de autopartes, los materiales compuestos reforzados con fibras (FCRP) han sido ampliamente utilizados en la industria automotriz, especialmente para la fabricación de elementos de la carrocería. El uso de estos materiales ha permitido un ahorro de peso en el vehículo de hasta un 25 %, lo que se traduce en un 5 % de ahorro de combustible [2]. Una de las técnicas que se emplea para fabricar componentes hechos de FCRP es el moldeo por transferencia de resina asistida por vacío VARTM, en el cual se utiliza como contramolde un material flexible llamado bolsa de vacío [3].

En este proceso, el material utilizado como refuerzo (fibras) se coloca dentro de un molde para luego cubrirlo con una bolsa. Al emplear el vacío, existe una disminución en la presión dentro de la bolsa, lo que resulta en una reducción del aire, facilitando el flujo de la resina a través de tuberías dispuestas en el molde para luego impregnar las fibras. Además, se suele utilizar una malla de distribución de resina para aumentar la velocidad del flujo de resina, así como también una malla de desmoldeo que no se impregna de resina llamada peel ply. Este proceso permite el uso de herramientas de bajo costo, para producir piezas compuestas de alta calidad, lo que la convierte en la técnica de fabricación preferida en diferentes industrias [4]. En la Figura 1 se indica una representación del proceso mencionado.

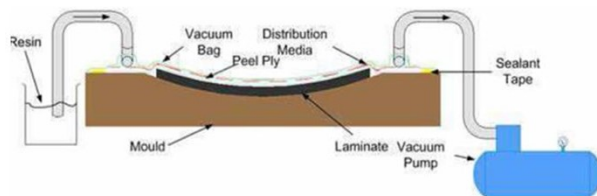


Figura 1. Proceso de infusión por resina [5]

Este proceso ha sido ampliamente utilizado para la fabricación de distintos componentes. Khan et al. [2] fabricaron una carrocería para un automóvil, con el fin de participar en la Maratón ecológica de Shell en Malasia, utilizando el proceso VARTM. Las fibras que se emplearon como refuerzo fueron tejido de vidrio 92110 y tela de carbono sin rizo 260G. Asimismo, la resina epóxica LY 5052/Aradur 5052 se usó como matriz.

En el proceso de manufactura, se utilizó una capa de filamentos de nailon, dispuestos aleatoriamente para distribuir y acelerar la infusión de resina. Además, se emplearon tubos espirales de vinilo como conductos de vacío y suministro. Finalmente, un dispositivo Accutrak VPE-1000 sirvió para la detección de fugas. La infusión se llevó a cabo desde la parte más interna y central del molde hasta su contorno, obteniendo una carrocería con un peso total de 14,5 kg, incluyendo la estructura metálica.

Los investigadores [6] utilizaron el moldeo por transferencia de resina RTM para la fabricación de un cubreneumático. Durante su producción, se empleó una resina de poliéster como base, así como fibra de vidrio como material de refuerzo con un 14 % en volumen (equivalente a dos capas del tipo mats de fibra de vidrio). Las pruebas mecánicas, realizadas a muestras del producto final mediante el proceso RTM, arrojaron un aumento significativo del 185 % en el módulo elástico y del 97 % en el esfuerzo máximo a tracción. Sin embargo, la obtención del producto final requirió tres intentos fallidos en el llenado del molde. Se identificaron problemas como la insuficiente entrada de resina en ciertas áreas del refuerzo debido a inconvenientes en el diseño del molde, así como elevadas viscosidades en la mezcla de resina con aditivos.

En 2016, Pachón y Orozco [7] analizaron la posibilidad de utilizar cera desmoldante como *peel ply* en el proceso VARTM para obtener la tapa de un filtro de aire de un vehículo a carburador. El producto final se obtuvo luego de seis intentos fallidos, llegando a determinar que la cera desmoldante no se puede utilizar como medio de desmoldeo.

Como se evidencia en los proyectos anteriores, el proceso VARTM conlleva realizar varios ensayos de prueba y error en la etapa de fabricación, lo que demandaría un excesivo uso de recursos y tiempo. Además, al aplicar la técnica VARTM, se debe garantizar que la resina logre impregnar todo el material utilizado como refuerzo en el molde [8]. De la misma forma, las fugas de aire durante el proceso de infusión pueden provocar que los componentes fabricados tengan áreas ricas en vacío, disminuyendo así sus propiedades mecánicas [9]. Por otro lado, en piezas de gran tamaño la infusión de resina se vuelve lenta, haciéndolo al proceso poco rentable para producción a gran escala. En [10] se manifiesta que, para realizar un correcto proceso de infusión de resina, se debe tomar en cuenta la ubicación de los puntos de entrada de resina y salida de aire en el molde.

Para evitar esta problemática, la simulación numérica del avance del frente del flujo de resina se vuelve una herramienta fundamental en la optimización del proceso. Según Simacek y Advani [11], los paquetes de simulación basados en modelos del proceso de moldeo por transferencia de resina RTM son la única opción viable para la simulación práctica del proceso

VARTM y, por ende, de su optimización. A continuación, se detallan estudios para simular y optimizar el proceso VARTM realizado por algunos investigadores.

Du et al. [4], determinaron la posición óptima de los puntos de entrada de resina y extracción de aire, con la ayuda del software RTM-Worx, el mismo que sirve para simular el proceso del flujo de resina. Utilizando los criterios de diseño para la ubicación de los puertos de entrada y extracción de resina del proceso VARTM; identificaron que los puertos de entrada deben estar ubicados en la parte central como en las curvaturas, mientras que los puertos de extracción deben estar en las esquinas del guardachoque, para obtener un tiempo de llenado corto.

En 2014, Poorzeinolabedin et al. [10] utilizaron el software PAM-RTM para realizar varias simulaciones y encontrar la posición más adecuada de puertos de entradas y ventilaciones en la fabricación de una parte exterior de la carrocería del vehículo Samand Sarir. Se propusieron ocho casos de estudio con diferentes ubicaciones de los puntos de entrada y extracción para observar el patrón de flujo de la resina y tiempo de llenado. Colocando los puntos de entrada de resina en la parte derecha y las de extracción en la parte izquierda, se obtuvo un tiempo de llenado en simulación de 1203 s, mientras que en la experimentación fue de 1350 s.

En 2013, Li et al. [12] realizaron la simulación del proceso RTM en la fabricación de una pala de turbina eólica mediante el software Moldflow. Se desarrollaron varias simulaciones, entre ellas: tiempo de llenado, temperatura, deformación por pandeo, evolución de la presión, entre otros, comparando procesos con y sin refrigeración. Luego del análisis realizado, se determinó que la formación de burbujas de aire se desarrolla en las raíces y en el borde de la pala. Seguidamente, determinaron que el tiempo de llenado con el proceso de enfriamiento es más largo que sin proceso de enfriamiento.

Por otro lado, Laurenzi et al. [13] presentaron el análisis del proceso numérico y la investigación experimental para la fabricación de una viga reforzada con fibra de carbono de una turbina aeronáutica mediante moldeo por transferencia de resina. En la investigación, en primer lugar, caracterizaron de forma experimental el valor de la permeabilidad. Posteriormente, realizaron simulaciones del proceso utilizando un volumen de control modificado mediante el método de elementos finitos (FEM-CV) con el objetivo de explorar los patrones del frente de flujo de resina y determinar el esquema de inyección que asegura una adecuada impregnación de la preforma y un tiempo de llenado que sea compatible con el tiempo de gelificación del endurecedor.

En el Ecuador, los parachoques son importados de países como China, Brasil y Colombia debido a la ausencia de empresas locales dedicadas a su fabrica-

ción. Esta falta de inversión e innovación en procesos de manufactura ha convertido al país en un importador de esta pieza automotriz. La producción nacional se limita a la fabricación de guardachoques traseros de camionetas y autobuses utilizando fibra de vidrio y resinas [14].

Han existido proyectos académicos de innovación donde se utiliza fibras naturales para la fabricación de autopartes. Una de estas fibras es la de cabuya, la misma que se distribuye de forma natural en toda la Sierra ecuatoriana. Además, esta fibra posee buena resistencia mecánica (305,15 MPa), alta durabilidad, peso ligero y otras características que la hacen interesante para su uso en materiales compuestos [15]. Algunos ejemplos de estos proyectos se presentan [14], donde usó un material compuesto híbrido (fibra de vidrio + fibra de cabuya + fibra de vidrio) para fabricar un guardachoque de un bus, donde la deposición de resina se la hace de forma manual con brochas y rodillos, obteniendo buenas propiedades mecánicas del mismo. De la misma forma, Pachacama [16] utilizó 70 % de resina y 30 % de fibra de cabuya para la fabricación de un capó de la camioneta Mazda BT50 mediante Hand-Lay Up y moldeo por compresión. Este prototipo obtuvo una resistencia a la tracción de 85,92 MPa y un esfuerzo máximo a la flexión de 13,72 MPa.

En el presente estudio se da a conocer una alternativa en procesos de manufactura para elaborar los guardachoques delanteros empleando técnicas innovadoras. Se fabrica un prototipo de guardachoque delantero del vehículo Chevrolet Aveo, empleando FCRP de resina epóxica como matriz, reforzada con fibra de vidrio tipo Mat y fibra cabuya, mediante el proceso VARTM.

La simulación del proceso se lo realizó mediante el software Autodesk Moldflow Insight, con el fin de identificar la ubicación óptima de los puntos de entrada y salida de resina, dentro del molde para fabricar el prototipo. Para la producción final, se lleva a cabo el ensamblaje de los materiales y equipos sobre el molde del prototipo, según la información obtenida de las simulaciones con el propósito de optimizar el proceso VARTM. La siguiente sección proporciona una descripción detallada de la metodología utilizada en la creación del prototipo del guardachoque.

2. Materiales y métodos

2.1. Materiales

Las propiedades de resina IN2 con el endurecedor AT30 SLOW, utilizadas en la fabricación del prototipo del guardachoque, se indican en las tablas 1 y 2, respectivamente. Estos componentes son elaborados por la empresa Easy Composites Ltd.

Tabla 1. Propiedades de la resina epóxica IN2

Característica	Unidad	Resina	Endurecedor	Combinados
Apariencia	-	Líquido claro	Líquido claro	Líquido claro
Viscosidad (25°)	mPa.s	500-800	10-20	200-450
Densidad	g/cm ³	1,08-1,18	1,07-1,13	1,12-1,18

Tabla 2. Propiedades de curado del endurecedor

Nombre comercial	Tiempo conserva a 25 °C	Tiempo gelificación a 25 °C	Tiempo desmoldeo	Tiempo curado a 25 °C
AT 30 SLOW	80-100 min	8-11 horas	18-24 horas	24 horas

Se utilizó fibra de cabuya tejida de hilo fino, de espesor 0,9 mm, adquirida de un productor local de la provincia de Loja. En el caso de la fibra de vidrio, se utilizó el tipo Choped Strand Mat distribuida por Pinturas América. Para la fabricación del prototipo, se dispuso de la combinación Vidrio + Cabuya + Vidrio para formar el material compuesto híbrido. Además, se utiliza una malla de infusión y el *peel ply* como medios de optimización para la fabricación del prototipo. En la Figura 2 se muestran las fibras utilizadas en el proyecto.

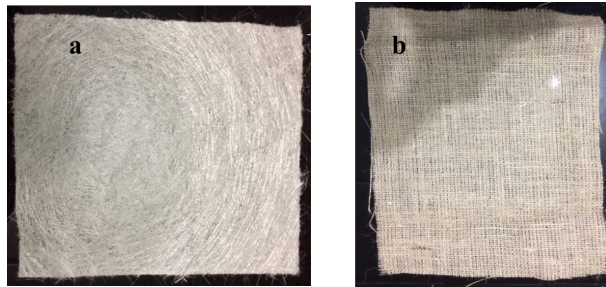


Figura 2. Tipos de fibras utilizadas: a) Fibra de vidrio Choped Strand Mat y b) Fibra de cabuya tejida

2.2. Simulación numérica

En primer lugar, se realizó la simulación numérica del proceso VARTM en el software Autodesk Moldflow Insight. Se propusieron seis opciones para los puntos de ingreso de resina y puntos de vacío, tal como lo efectuó [4]. Para cada opción se realizó la simulación del tiempo de llenado del molde con el fin de identificar la que menor tiempo emplea.

Para la simulación del llenado del molde del prototipo se necesita el dato de permeabilidad del refuerzo. Al tratarse de un material híbrido (vidrio + cabuya + vidrio) y utilizando la malla de infusión con *peel ply*, su permeabilidad se determina tal como lo hizo [17]. Se realizaron varias pruebas de infusión de resina sobre el material híbrido, y se registró el movimiento radial

del frente de flujo de resina realizando la grabación del proceso. En la figura 3 se indica el esquema utilizado.

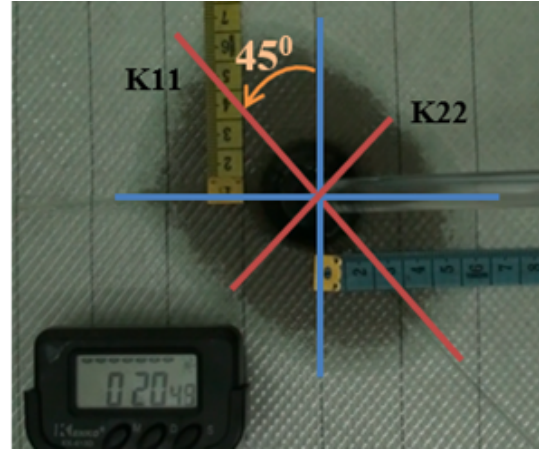


Figura 3. Esquema utilizado para determinar la permeabilidad

Luego, se extraen los datos del avance del frente flujo para los tiempos de 20 s, 40 s, 80 s, 160 s, 320 s, 640 s, 840 s en las pruebas realizadas y se determinó el promedio. Finalmente, se aplicó la ecuación (1) para determinar la permeabilidad K en las dos direcciones K_{11} y K_{22} . Esta ecuación describe la ley de Darcy aplicada a flujos de tipo radial. Los datos de porosidad de las fibras se obtuvieron de la revisión bibliográfica realizada, mientras que la fracción volumétrica se trabajó con el 40 % de fibra de vidrio, 20 % de cabuya y 40 % de resina epóxica.

$$K_{ij} = \frac{u\varepsilon}{4t\Delta P} \left\{ r_f^2 \left[2 \cdot \ln \left(\frac{r_f}{r_0} \right) - 1 \right] + (r_0^2) \right\} \quad (1)$$

Donde:

- r_f = Radio del frente de flujo en dirección 11 o 22
- r_0 = Radio de entrada de resina
- μ = Viscosidad
- ε = Porosidad
- t = Tiempo
- ΔP = Presión de inyección

La Tabla 3 indica las propiedades del material híbrido utilizado en la simulación.

Tabla 3. Datos de permeabilidad del material híbrido utilizado en la simulación

Material	Fracción volumétrica	Porosidad	Permeabilidad (m2)		
			K11	K22	K33
Chopped Glass, Cabuya	40.2	0.4	3.7327×10^{10}	2.602×10^{10}	3.7327×10^{10}

En las figuras 4, 5, 6, 7 y 8 se indican los distintos diseños establecidos para la ubicación de los puntos de entrada de resina y de vacío en el llenado del molde del guardachoque del vehículo Chevrolet Aveo mediante VARTM.

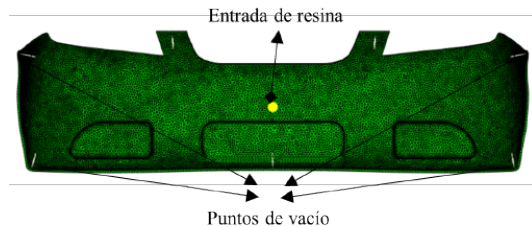


Figura 4. Diseño 1 (1 punto de entrada de resina, 7 puntos de vacío)

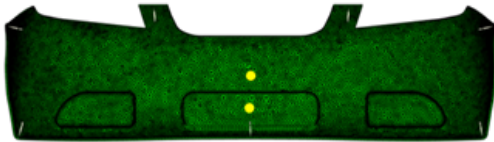


Figura 5. Diseño 2 (2 puntos de entrada de resina, 7 puntos de vacío)

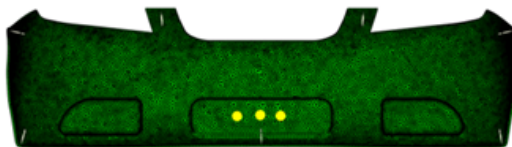


Figura 6. Diseño 3 (3 puntos de entrada de resina, 7 puntos de vacío)

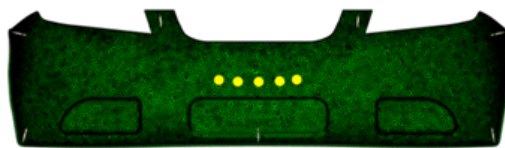


Figura 7. Diseño 4 (5 puntos de entrada de resina, 7 puntos de vacío)

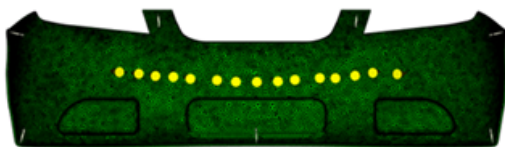


Figura 8. Diseño 5 (varios puntos de entrada de resina, 7 puntos de vacío)

La Figura 9 muestra el diseño 6, considerando la eficiencia en el uso de recursos y la optimización del

tiempo de infusión para la aplicación del proceso. En este enfoque se proponen varios puntos de entrada de resina posicionados en el borde superior del guardachoque, y un punto de vacío situado en la parte inferior central del molde. El objetivo del diseño propuesto es lograr un flujo lineal desde el borde superior hasta el inferior del molde. De acuerdo con [18], al emplear la técnica de inyección lineal, se logra un tiempo de llenado más breve en comparación con la técnica de inyección radial convergente utilizada en la caracterización de permeabilidad.

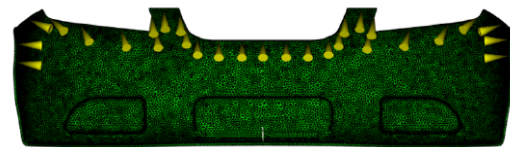


Figura 9. Diseño 6 (flujo lineal)

Finalmente, para cada uno de los diseños propuestos se realiza la simulación del proceso VARTM con el fin de determinar el diseño que menor tiempo emplea en el llenado del molde. La validación del diseño escogido se realiza mediante la experimentación del proceso para la fabricación del prototipo del guardachoque.

2.3. Fabricación del prototipo del guardachoque

En primer lugar, se construye el molde a partir del guardachoque original, moldeando su parte externa y tapando los agujeros de los faros y rejillas como se indica en la Figura 10. Para esto, se utiliza fibra de vidrio y resina poliéster con el método *Hand Lay Up*.



Figura 10. Fabricación del guardachoque

Luego se prepara el molde colocando sobre él, un agente químico compatible con la resina epoxi IN2, para realizar el desmoldeo de la autoparte. Se coloca la cinta sellante alrededor del molde como se indica en la Figura 11. Esta permite sellar la bolsa de vacío con el molde para lograr la compactación de las fibras cuando se aplique la depresión. Seguidamente, las fibras de vidrio y cabuya se ubican sobre el molde como se muestra en la Figura 12. Debido a la complejidad del molde, se recomienda recortar capas pequeñas de

fibras y colocarlas en los extremos para que ocupen toda su superficie.



Figura 11. Colocación de la cinta sellante sobre el molde



Figura 12. Disposición de las fibras de vidrio y cabuya sobre el molde

Inmediatamente se sitúa el *peel ply* con la malla de distribución sobre las fibras para acelerar el flujo de resina. En la Figura 13 se observa la disposición de estos medios de optimización.



Figura 13. *Peel ply* y malla de distribución sobre las fibras utilizadas como refuerzo

A continuación, se disponen los puntos de entrada de resina y vacío, considerando la información derivada de la simulación del proceso VARTM para el llenado del molde del guardachoque, eligiendo la configuración del diseño 6. Con el objetivo de obtener varios puntos de entrada de resina y optimizar los recursos, se instala una manguera en espiral. Esta manguera se posiciona siguiendo el contorno del molde, conforme se indica en la simulación del diseño 6, mientras que el punto de vacío se sitúa en la parte central inferior. En la Figura 14, se proporciona un detalle preciso sobre la ubicación de la manguera en espiral y el punto de vacío.



Figura 14. Ubicación de la manguera espiral y el punto de vacío utilizados para VARTM

Luego de haber ubicado la manguera espiral y el punto de vacío, se pone la bolsa de vacío sobre el molde ejerciendo presión sobre la cinta sellante. Esto se realiza con la finalidad de garantizar un sellado completo y evitar fugas de vacío. En la Figura 15 se muestra la posición de la bolsa de vacío sobre el molde.



Figura 15. Bolsa de vacío utilizada para el proceso VARTM

Seguidamente, se aplica el vacío y la resina comienza a circular por la manguera espiral para luego impregnar las fibras dispuestas en el molde. Las condiciones en que el proceso VARTM fue realizado para la fabricación del prototipo se indican en la Tabla 4. Estos datos se obtuvieron a partir de la guía de fabricación de materiales compuestos de la empresa Easy Composites. Finalmente, se deja curar la pieza al término de la infusión durante 24 horas y se realiza el desmoldeo para obtener el prototipo del guardachoque.

Tabla 4. Condiciones utilizadas en el proceso VARTM

Presión de inyección (Pa)	Temperatura (°C)	Viscosidad de resina (Pa.s)
88 000	20-25	0.65

3. Resultados y discusión

Se realizó la simulación del proceso y se observa el avance del flujo de resina en distintos porcentajes de llenado del molde (25 %, 50 %, 75 % y 100 %). En la Figura 16 se detalla el avance del flujo de resina, donde se determina que, para llenar el 25 % del molde se necesitan 73 s, para el 50 % se emplean 216 s, el 75 % se llena en 432 s y finalmente para el 100 % se deben emplear 865 s.

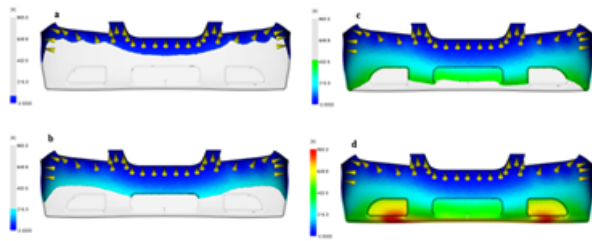


Figura 16. Simulación del avance del frente de flujo y tiempo de llenado para el diseño 6 del diseño del proceso VARTM. a) 25 %, b) 50 %, c) 75 %, d) 100 %

Los tiempos de llenado correspondientes a cada uno de los diseños propuestos anteriormente están especificados en la Tabla 5. Estos tiempos fueron directamente derivados de las simulaciones del proceso y funcionan como guía para la selección de la posición óptima de los puntos de entrada de resina y de extracción de vacío en la producción del prototipo de guardachoque.

Tabla 5. Tiempo de llenado para cada diseño de simulación del llenado del molde del guardachoque

Diseño	Tiempo de llenado (s)
1	4691.7
2	3025.4
3	2877
4	2237.7
5	870.7
6	865

Para la validación de la simulación realizada, en la Figura 17 se realiza una comparación entre la fabricación del prototipo mediante el proceso VARTM, y la simulación del diseño 6 propuesto, ya que es el que menor tiempo emplea. Se observa que, el avance del frente de flujo de resina en la experimentación concuerda de manera consistente con la representación simulada del proceso.

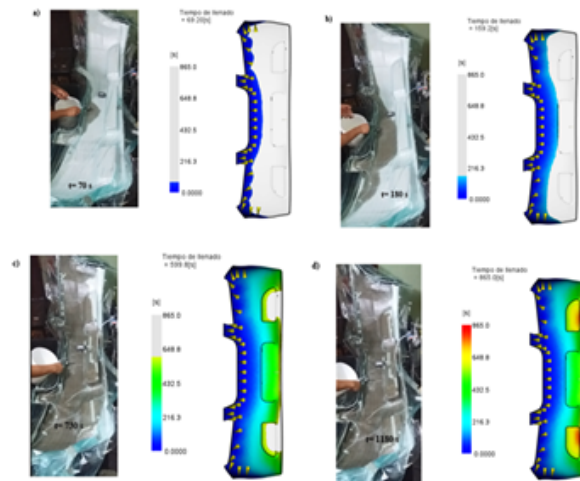


Figura 17. Comparación entre la simulación y experimentación del proceso VARTM para el llenado del molde del guardachoque del vehículo Chevrolet Aveo

Luego del curado de la pieza durante 24 horas, se realiza el desmoldeo del prototipo. El agente químico colocado inicialmente, ayuda al desmoldeo de la pieza. En las figuras 18 y 19 se observa la pieza final obtenida mediante la aplicación del proceso VARTM para la fabricación del prototipo.



Figura 18. Vista frontal del prototipo de guardachoque obtenido mediante VARTM



Figura 19. Vista lateral del prototipo de guardachoque obtenido mediante VARTM

3.1. Discusión

Los resultados obtenidos de las simulaciones de los seis diseños propuestos indican que, para mejorar la eficiencia del proceso de llenado, es necesario contar con múltiples puntos de entrada de resina. En este

análisis, se observa que en el diseño 1, donde solo hay un punto de entrada de resina ubicado en la parte central del molde del guardachoque, el tiempo de infusión es de 4691,7 s. A medida que se aumenta el número de puntos de entrada de resina, como en el diseño 6, distribuidos a lo largo del eje central del guardachoque, el tiempo de infusión se reduce a 870 s, lo que representa una disminución del 81,4 % en comparación con la primera opción.

En el estudio [4], donde se realiza la simulación de flujo y optimización del proceso VARTM para la fabricación de un guardachoque, se obtiene una reducción del 79,8 % en el tiempo de infusión, al aumentar los puntos de entrada de resina a lo largo del eje central del guardachoque.

Con el objetivo de mejorar la eficiencia en el proceso de llenado del molde del guardachoque, se propone la configuración del diseño 6, buscando la optimización de recursos y tiempo. En esta alternativa, se incorpora un solo punto de vacío en la parte inferior central del molde, mientras que los puntos de entrada de resina se sitúan en el borde superior del molde del guardachoque. Con esta disposición, la resina recorre una distancia menor, desde la parte superior hasta la inferior del molde del guardachoque. El tiempo necesario para lograr un llenado completo del molde es de 865 segundos, y la forma del frente de flujo de resina es unidireccional y uniforme.

Por otro lado, en el estudio de optimización presentado por [4], se dispusieron distintos frentes de flujo de resina, los mismos que al encontrarse, ocasionan la formación de burbujas y puntos secos. Para evitar esto, se dispone de más puntos de vacío, en los lugares donde se dan las intersecciones de los flujos de resina.

En este análisis, al utilizar un solo punto de vacío, se logra una optimización eficaz del tiempo de llenado del molde durante la implementación del proceso. La elección de tener múltiples puntos de vacío, como en los diseños 1-2-3-4-5, requeriría el uso de varias bombas de vacío para cumplir con los requisitos. En última instancia, el diseño 6 posibilita una notable reducción del 81,56 % en el tiempo de infusión en comparación con el diseño 1. Cabe recalcar que, a pesar de que la simulación indica un tiempo de llenado del molde del guardachoque de 865 segundos, en la práctica experimental, este tiempo fue de 1180 segundos, resultando un margen de error del 36,41 %. La figura 15 evidencia que, al comienzo de la infusión, la configuración del frente de flujo de resina en la experimentación difiere de la simulación, principalmente debido al uso de la manguera en espiral.

En la simulación, la resina se inyecta simultáneamente a través de varios puntos de entrada, mientras que, en la experimentación, la inyección en los bordes se realiza conforme la resina fluye por el canal interno de la manguera en espiral. Esto genera una mayor velocidad en el flujo de resina en el punto central durante

la experimentación, alterando la forma del frente de flujo de resina.

Una vez que la infusión ha comenzado, el frente de flujo de resina se estabiliza y los datos de la simulación numérica coinciden con los resultados experimentales. Cuando el frente de flujo de resina central llega al punto de vacío ubicado en el molde, se elimina una cantidad específica de resina que no logra impregnar las fibras dispuestas en los bordes externos del molde. Esta es la razón principal por la cual en la experimentación se requiere más tiempo de infusión que el calculado en la simulación numérica. Este análisis concuerda con el estudio realizado por Polowick [19], donde compara la simulación realizada en el software LIMS con la experimentación del proceso VARTM para la fabricación de una escotilla de avión. El tiempo determinado en la simulación fue de 3385 s y en la experimentación fue de 5940 s.

En el proyecto presentado por Díaz [20], para realizar una base de un triciclo mediante VARTM, se establecieron algunas variaciones entre la simulación del proceso y la experimentación, debido a irregularidades que ocasiona la deformación de la bolsa de vacío. Frente a todas las adversidades mencionadas anteriormente, los autores citados subrayan y reconocen la relevancia de las simulaciones numéricas en los procesos de optimización.

Durante el desmoldeo de la pieza, se notó un incremento del 15 % en la presión dentro de la bolsa de vacío, lo que ocasionó que el proceso de curado no se llevara a cabo bajo la presión adecuada. Este aumento de presión se atribuye a pequeñas fugas detectadas después del proceso de infusión, impactando en la calidad superficial del guardachoque y generando zonas con exceso de resina. La aparición de fugas después de la infusión debe considerarse en proyectos futuros con el propósito de garantizar la producción de piezas de excelente calidad.

Cabe indicar que, luego de la fabricación del prototipo, se realizaron ensayos de tracción y flexión de acuerdo con la norma ASTM D3039-08 para tracción y ASTM D7264M-07 para la flexión a distintas probetas del material compuesto híbrido reforzado con fibras. Los resultados que se obtuvieron indican que el material tiene un esfuerzo promedio máximo a la tracción de 86,74 MPa y un esfuerzo promedio máximo a la flexión de 128,73 MPa. Al comparar estos resultados con los proyectos realizados por Paredes [14] y Pachacama [16] se determina que los esfuerzos a la tracción y flexión son mayores. Esto se debe principalmente a la técnica utilizada para la fabricación del prototipo de guardachoque, que es la infusión de resina asistida por vacío. Este proceso permite distribuir uniforme la resina y compactarla a la misma presión de vacío, obteniendo de esta forma un producto de mejor calidad. Mientras que en los proyectos realizados por Paredes [14] y Pachacama [16] colocan la resina en el

molde de forma manual y la compactación del molde no es uniforme.

4. Conclusiones

Se llevó a cabo la producción del prototipo del guardachoque del vehículo Chevrolet Aveo mediante el proceso VARTM utilizando materiales híbridos. La optimización del proceso se realizó mediante el software Autodesk Moldflow y se confirmó con la experimentación práctica del proceso. La incorporación de mallas de distribución y *peel ply* en los procesos de moldeo con compuestos líquidos se destaca como los principales métodos para la optimización, ya que logran reducir los tiempos de infusión hasta en un 64.4 %.

Se realizaron simulaciones de los seis diseños propuestos para la ubicación de los puntos de entrada de resina y vacío utilizando Autodesk Moldflow. La elección de la propuesta de optimización se basó en los resultados del tiempo de llenado. Esta propuesta específica incluía múltiples puntos de entrada de resina en el borde superior del molde y un solo punto de vacío. La simulación permitió observar la progresión del frente de flujo, actuando como una guía para evitar áreas sin impregnación de resina en las fibras utilizadas. Esta propuesta considera la optimización de recursos al utilizar herramientas prácticas y accesibles para la experimentación del proceso. La herramienta de simulación resulta valiosa para evitar múltiples pruebas de ensayo y error para obtener una pieza de alta calidad.

El proceso VARTM se utiliza en diversas aplicaciones automotrices y presenta varios aspectos críticos. Entre ellos, se destaca la necesidad de evitar fugas de aire durante la infusión de resina para prevenir defectos en la pieza, así como garantizar que la resina impregne completamente las fibras utilizadas como refuerzo. Los recursos materiales y económicos empleados para la aplicación de VARTM en la fabricación de guardachochos son más accesibles en comparación con otras tecnologías dedicadas a la producción de autopartes.

Referencias

- [1] P. Mitschang and K. Hildebrandt, “8 - polymer and composite moulding technologies for automotive applications,” in *Advanced Materials in Automotive Engineering*, J. Rowe, Ed. Woodhead Publishing, 2012, pp. 210–229. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1533/9780857095466.210>
- [2] L. A. Khan, A. H. Mahmood, B. Hassan, T. Sharif, S. Khushnod, and Z. M. Khan, “Cost-effective manufacturing process for the development of automotive from energy efficient composite materials and sandwich structures,” *Polymer Composites*, vol. 35, no. 1, pp. 97–104, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/pc.22638>
- [3] J. Summerscales, *Resin Infusion Under Flexible Tooling (RIFT)*. John Wiley & Sons, Ltd, 2012, pp. 1–11. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/9781118097298.weoc216>
- [4] R. K. Du, F. F. Wang, X. H. Chen, Y. F. Zhang, G. Z. Zhao, and Y. Q. Liu, “Flow simulation and optimization of the car bumper beam by VARTM process,” in *Materials Processing and Manufacturing III*, ser. Advanced Materials Research, vol. 753. Trans Tech Publications Ltd, 10 2013, pp. 236–240. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.753-755.236>
- [5] S. Sunaryo, G. L. Putra, and S. M. Lestari, “Thickness and fiber content optimization in VARTM method for high speed craft,” in *Advances in Materials, Processing and Manufacturing*, ser. Advanced Materials Research, vol. 789. Trans Tech Publications Ltd, 11 2013, pp. 412–416. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.789.412>
- [6] J. G. Anchatuña León and V. H. Loachamín Navarrete, *Construcción de un prototipo de cubreneumático mediante moldeo por transferencia de resina de compuestos*. Tesis Maestría, 2015. [Online]. Available: <https://acortar.link/TfrUvy>
- [7] D. G. Chávez Pachón and E. R. Ledesma Orozco, “Fabricación en fibra de carbón de un accesorio automotriz utilizando el método de transferencia de resina,” *Jóvenes en la ciencia*, vol. 2, no. 1, pp. 1838–1842, 2017. [Online]. Available: <https://acortar.link/kKHR3L>
- [8] J. Porto, M. Letzow, E. dos Santos, S. Amico, J. Avila Souza, and L. Isoldi, “Computational modeling of RTM and LRTM processes applied to complex geometries,” *Revista de Engenharia Térmica*, vol. 11, pp. 93–99, 10 2018. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.5380/reterm.v11i1-2.62007>
- [9] C. Wang, G. Yue, G. Bai, L. Pan, and B. Zhang, “Compaction behavior and permeability property tests of preforms in vacuum-assisted resin transfer molding using a combined device,” *Measurement*, vol. 90, pp. 357–364, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.04.058>
- [10] M. Poorzeinolabedin, L. Parnas, and S. H. Dashatan, “Resin infusion under flexible tooling process and structural design optimization of the complex composite part,” *Materials & Design*, vol. 64, pp. 450–455, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.08.008>

- [11] P. Simacek and S. G. Advani, "Resin flow modeling in compliant porous media: an efficient approach for liquid composite molding," *International Journal of Material Forming*, vol. 11, no. 4, pp. 503–515, Jul 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s12289-017-1360-9>
- [12] C. Li, M. Xu, and Y. Tie, "Simulation analysis of wind turbine blade during resin transfer molding process," *Materials Physics and Mechanics*, vol. 18, pp. 127–134, 01 2013. [Online]. Available: <https://acortar.link/Kqm2K2>
- [13] S. Laurenzi, A. Grilli, M. Pinna, F. De Nicola, G. Cattaneo, and M. Marchetti, "Process simulation for a large composite aeronautic beam by resin transfer molding," *Composites Part B: Engineering*, vol. 57, pp. 47–55, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.09.039>
- [14] M. A. Córdova Suárez and J. G. Paredes Salinas, *Estudio de polímeros híbridos estratificados de matriz poliéster reforzada con fibra de vidrio y cabuya como material alternativo y su incidencia en las propiedades mecánicas en guardachoques para buses*. Tesis de Maestría, Universidad Técnica de Ambato, 2012. [Online]. Available: <https://acortar.link/BkoiLh>
- [15] J. M. Tixe Subina and J. D. Vistín Bastidas, *Aplicación de materiales compuestos para la formación de guardabarros y tapas laterales de una moto de 125 cc, 4 tiempos*. Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, 2015. [Online]. Available: <https://acortar.link/op1pAM>
- [16] V. Pachacama, *Diseño, caracterización y aplicación de un material compuesto con base de resina epoxi y refuerzo de fibras orgánicas para la aplicación en un prototipo de capot de la camioneta Mazda BT50*. Tesis de Grado, Universidad de las Fuerzas Armadas, 2015. [Online]. Available: <https://acortar.link/bbOfKF>
- [17] D. B. Peralta-Zurita, D. Jiménez-Pereira, J. V. Molina-Osejos, and G. A. Moreno-Jiménez, "Permeability characterization of a composite reinforced material with fiberglass and cabuya by VARTM process. case hybrid material," in *Recent Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, M. Botto Tobar, H. Cruz, and A. Díaz Cadena, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 16–30. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-030-72212-8_2
- [18] E. Ruiz and F. Trochu, "19 - flow modeling in composite reinforcements," in *Composite Reinforcements for Optimum Performance*, ser. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, P. Boisse, Ed. Woodhead Publishing, 2011, pp. 588–615. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1533/9780857093714.4.588>
- [19] C. L. R. Polowick, *Optimizing vacuum assisted resin transfer moulding (VARTM) processing parameters to improve part quality*. PhD Thesis Carleton University, 2013. [Online]. Available: <https://acortar.link/WgvVAV>
- [20] E. Díaz Escriche, *Simulación y control de los procesos de transferencia de resina en moldes flexibles mediante modelos de permeabilidad equivalente*. PhD Tesis, Universidad Politécnica de Valencia, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/17321>



DIAGNÓSTICO DE CÁNCER ORAL MEDIANTE ALGORITMOS DE APRENDIZAJE PROFUNDO

DIAGNOSIS OF ORAL CANCER USING DEEP LEARNING ALGORITHMS

Mayra Alejandra Dávila Olivos^{1,*} , Henry Miguel Herrera del Águila¹ ,
Félix Melchor Santos López¹

Recibido: 15-05-2023, Recibido tras revisión: 20-05-2024, Aceptado: 28-05-2024, Publicado: 01-07-2024

Resumen

El propósito de este estudio fue diagnosticar automáticamente el cáncer oral en imágenes de labios, mucosa y cavidad oral utilizando aprendizaje profundo. Se propuso un modelo de red neuronal convolucional (CNN) profunda con aumento de datos para el diagnóstico de enfermedades bucodentales. Se desarrolló una CNN profunda de MobileNet para detectar y clasificar la enfermedad de cáncer oral en la zona de los labios, mucosa y cavidad oral. El conjunto de datos de 131 imágenes de labios, mucosa y cavidad oral estaba compuesto por 87 casos positivos y 44 casos negativos. Además, el número de imágenes se multiplicó mediante cambios de corte, enfoque, rotación, brillo y volteo. Se evaluó el rendimiento de diagnóstico de la CNN propuesta a través del cálculo de la exactitud, la precisión, la recuperación, la puntuación F1 y el AUC (área bajo la curva) para la enfermedad de cáncer oral. El rendimiento general del diagnóstico de la enfermedad de cáncer oral alcanzó el 90,9 % de exactitud y 0,91 AUC usando la CNN con el conjunto de datos. El método CNN desarrollado para diagnosticar automáticamente el cáncer oral en imágenes de labios, mucosa y cavidad oral usando aumento de datos mostró una alta exactitud, precisión, recuperación, puntaje F1 y AUC a pesar del número limitado de imágenes de labios, mucosa y cavidad oral utilizadas.

Palabras clave: diagnóstico automático, aumento de datos, cáncer oral, enfermedad bucodental, red neuronal convolucional, salud dental

Abstract

The aim of this study was to use deep learning for the automatic diagnosis of oral cancer, employing images of the lips, mucosa, and oral cavity. A deep convolutional neural network (CNN) model, augmented with data, was proposed to enhance oral cancer diagnosis. We developed a Mobile Net deep CNN designed to detect and classify oral cancer in the lip, mucosa, and oral cavity areas. The dataset comprised 131 images, including 87 positive and 44 negative cases. Additionally, we expanded the dataset by varying cropping, focus, rotation, brightness, and flipping. The diagnostic performance of the proposed CNN was evaluated by calculating accuracy, precision, recall, F1 score, and area under the curve (AUC) for oral cancer. The CNN achieved an overall diagnostic accuracy of 90.9% and an AUC of 0.91 with the dataset for oral cancer. Despite the limited number of images of lips, mucosa, and oral cavity, the CNN method developed for the automatic diagnosis of oral cancer demonstrated high accuracy, precision, recall, F1 score, and AUC when augmented with data.

Keywords: Automatic diagnosis, convolutional neural network, data augmentation, dental health, oral cancer, oral disease

^{1,*}Faculty of Systems Engineering and Informatics, National University of San Marcos, Perú.
 Autor para correspondencia ✉: 12200133@unmsm.edu.pe.

Forma sugerida de citación: Dávila Olivos, M. A.; Herrera del Águila, H. M. ; Santos López, F. M. "Diagnóstico de cáncer oral mediante algoritmos de aprendizaje profundo," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 32, pp. 58-68, 2024. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n32.2024.06>.

1. Introducción

Las enfermedades orales representan un desafío significativo para la salud pública global, afectando particularmente a las poblaciones menos privilegiadas debido a su alta prevalencia. Los costos de tratamiento suelen ser prohibitivamente altos y siguen siendo inaccesibles en muchos países de ingresos bajos y medianos. Según la Organización Mundial de la Salud, la gestión de las enfermedades orales se clasifica como la cuarta condición de salud más costosa en las naciones altamente urbanizadas. Dada su profunda repercusión en la salud general, la salud oral es un determinante esencial del bienestar humano y un componente crítico de la atención sanitaria. Además, la presencia de enfermedades orales aumenta el riesgo de padecer condiciones crónicas como diabetes, problemas respiratorios y enfermedades cardiovasculares y cerebrovasculares [1].

El aprendizaje automático (AA), una subcategoría de la inteligencia artificial (IA), emplea técnicas estadísticas, probabilísticas y de optimización que permiten a las máquinas aprender a partir de datos históricos, adquirir información y realizar predicciones sobre nuevos datos basándose en la información aprendida [2,3]. Dentro de la toma de decisiones clínicas dentales, los métodos basados en el aprendizaje profundo (AP), otra subcategoría de la IA, agilizan los procesos y abordan desafíos complejos. Entre estos métodos, una red neuronal convolucional profunda (RNC), un algoritmo bien definido en AP ha demostrado ser altamente efectiva para la segmentación de órganos y la clasificación y detección de órganos y enfermedades en imágenes médicas [4–6].

El aprendizaje automático (AA) ha demostrado una notable precisión y exactitud, superando el juicio humano en la predicción de resultados médicos [2]. Las técnicas de aprendizaje profundo (AP) ofrecen ventajas sobre los métodos basados en características en el análisis de imágenes médicas, superando consistentemente a los profesionales de la salud en la identificación de enfermedades [7].

En el campo del diagnóstico del cáncer oral, el aprendizaje profundo (AP) ha producido resultados prometedores en el análisis automatizado de patología, la obtención de imágenes de la cavidad oral, la imagenología mediante endomicroscopía láser confocal y la imagenología por fluorescencia. Estos avances facilitan la predicción del riesgo de cáncer y los resultados diagnósticos de los pacientes, permitiendo la identificación de patrones sutiles dentro de grandes conjuntos de datos ruidosos. El objetivo final es desarrollar herramientas para mejorar la salud dental pública [2], [7,8].

Este artículo tiene como objetivo implementar un modelo para el diagnóstico del cáncer oral utilizando algoritmos de aprendizaje profundo (AP) de alto rendimiento. El modelo propuesto tiene el poten-

cial de ser un recurso valioso en el proceso de toma de decisiones para el diagnóstico de esta enfermedad.

1.1. Revisión de la literatura

La revisión sistemática de la literatura se llevó a cabo utilizando la metodología PRISMA. Este enfoque facilitó una comprensión integral del trasfondo de la investigación, respaldó este trabajo y demostró la competencia en enfoques de aprendizaje automático (AA) y aprendizaje profundo (AP), asegurando así la relevancia del estudio [9].

El estudio presentado en [2] desarrolla y valida cuatro modelos de aprendizaje automático (AA) para predecir la ocurrencia de metástasis en los ganglios linfáticos en el carcinoma de células escamosas de la lengua oral (OTSCC) en etapa temprana, tanto antes como después de la cirugía. Los modelos de bosque aleatorio y máquina de vectores de soporte muestran un rendimiento predictivo superior en comparación con los métodos tradicionales basados en la profundidad de invasión, la proporción de neutrófilos a linfocitos o la gemación tumoral.

En una investigación separada [4], los científicos automatizan el diagnóstico de quistes y tumores odontogénicos en ambas mandíbulas utilizando radiografías panorámicas. Mejoran una CNN profunda modificada derivada de YOLOv3 para detectar y clasificar estas condiciones. El rendimiento general de la clasificación de enfermedades mejora al utilizar una CNN con un conjunto de datos aumentado en comparación con un conjunto de datos no aumentado.

1.2. Mobile Net

MobileNet utiliza convoluciones separables en profundidad, una técnica que reduce significativamente el número de parámetros en comparación con las redes que utilizan convoluciones regulares con la misma profundidad. Esta reducción de parámetros permite la creación de redes neuronales profundas y ligeras. Desarrollado por Google como una clase de CNN de código abierto, MobileNet es una excelente base para el entrenamiento de clasificadores. Los clasificadores generados con MobileNet no solo son compactos y rápidos, sino que también ayudan a minimizar el tamaño del modelo y los requisitos computacionales. Esto se logra reemplazando los filtros de convolución estándar por convoluciones profundas y puntuales [10].

1.3. Métricas de rendimiento

1. **Curvas de características operativas del receptor (ROC).** Las curvas ROC son representaciones gráficas ampliamente utilizadas para evaluar y comparar el rendimiento de los clasificadores. Estos gráficos bidimensionales ilustran

el compromiso entre la sensibilidad y la especificidad en las predicciones de un clasificador. Demuestran visualmente el rendimiento del clasificador a través de varios umbrales de discriminación, facilitando la clasificación y selección de clasificadores según los requisitos específicos del usuario. Estos requisitos frecuentemente incluyen consideraciones de costos diferenciales de error y demandas de precisión [11].

2. **Área bajo la curva (AUC).** AUC es un valor escalar único que proporciona una medida integral del rendimiento global de un clasificador binario. El valor de AUC varía de 0.5 a 1.0, donde el valor mínimo indica el rendimiento de un clasificador aleatorio, y el valor máximo corresponde al de un clasificador perfecto. En la Figura 1, se presentan las curvas ROC para dos clasificadores de puntuación, A y B. En este ejemplo, el clasificador A tiene un valor de AUC mayor que el clasificador B [12].

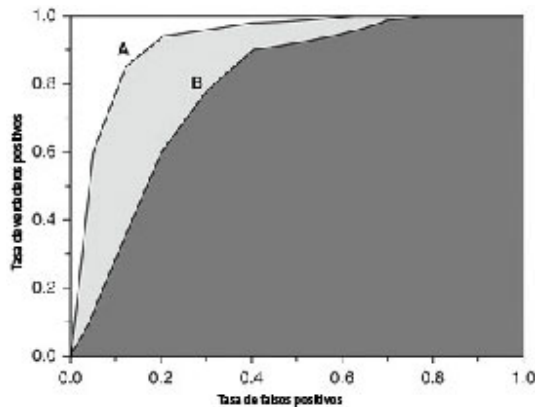


Figura 1. Área bajo la curva [11]

3. **Matriz de confusión.** Una matriz de confusión es una representación tabular que muestra la clase verdadera y la clase predicha de cada caso en el conjunto de pruebas. Esta matriz es esencial para evaluar el rendimiento de un modelo en un problema de clasificación. Al presentar una descomposición clara de verdaderos positivos, verdaderos negativos, falsos positivos y falsos negativos, permite una comprensión detallada del rendimiento del modelo a través de diferentes clases. La Figura 2 proporciona una representación visual de la matriz de confusión, diseñada específicamente para un problema de clasificación binaria [13].

		Valores actuales	
		Positivo	Negativo
Valores predichos	Positivo	VP (Verdadero Positivo)	FP (Falso Positivo)
	Negativo	FN (Falso negativo)	VN (Verdadero negativo)

Figura 2. Matriz de confusión binaria [12]

4. **Exactitud.** Un método de prueba se considera preciso cuando mide con exactitud lo que se pretende medir. En otras palabras, puede determinar de manera efectiva la cantidad o concentración exacta de una sustancia dentro de una muestra [14].

$$Exactitud = \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN} \cdots (1)$$

5. **Precisión.** La precisión en un método de prueba se logra cuando las determinaciones o análisis repetidos sobre la misma muestra arrojan resultados consistentes. En el contexto de la exactitud, un método de prueba preciso exhibe una variación aleatoria mínima, lo que aumenta la confianza en su fiabilidad. La capacidad del método de prueba para reproducir resultados consistentemente a lo largo del tiempo subraya su dependabilidad [14].

$$Precisión = \frac{TP}{TP + FP} \cdots (2)$$

6. **Sensibilidad.** Denota la capacidad de una prueba diagnóstica para detectar correctamente a los individuos afectados por una enfermedad o trastorno específico. Una prueba con alta sensibilidad minimiza las instancias de "falsos negativos", en las que la prueba no logra identificar la presencia de una enfermedad a pesar de su existencia real [14].

$$Sensibilidad = \frac{TP}{TP + FN} \cdots (3)$$

7. **Puntuación F1.** Integra las mediciones de precisión y sensibilidad en una métrica unificada, facilitando una evaluación comparativa del rendimiento general a través de diversas soluciones. La puntuación F1 opera bajo la suposición de que tanto la precisión como la sensibilidad tienen igual importancia [15].

$$PuntuaciónF1 = 2 * \frac{Precisión * Sensi.}{Precisión + Sensi.} \dots \quad (4)$$

1.4. Cáncer oral

El cáncer oral incluye tumores malignos que afectan el labio, diferentes áreas de la boca y la orofaringe, como se muestra en la Figura 3. Esta forma de cáncer es más común en hombres y personas mayores, con diferencias significativas asociadas con el nivel socioeconómico. Curiosamente, en algunos países de Asia y el Pacífico, el cáncer oral se encuentra entre los tres tipos de cáncer con mayor incidencia [16].

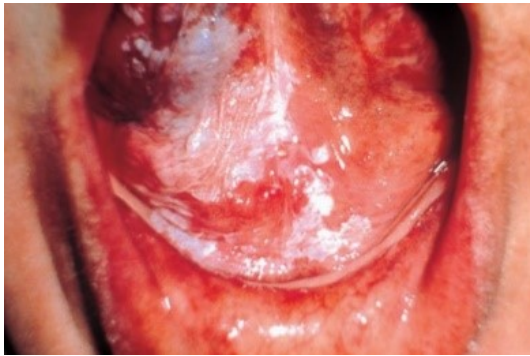


Figura 3. Úlcera de cáncer oral [16]

2. Materiales y métodos

2.1. Adquisición de datos

El conjunto de datos utilizado en este estudio fue adquirido de la plataforma web Kaggle [17], que ofrece acceso abierto a datos descargables. El formato original de los datos consistía en imágenes jpg. El conjunto de datos incluía 131 casos, con 87 presentando imágenes de labios, membranas mucosas y la cavidad oral indicativas de cáncer oral, y los 44 restantes mostrando imágenes sin cáncer oral. La Figura 4 resume visualmente la metodología de investigación, delineando claramente las fases. La implementación de esta etapa se detalla en la Sección 2.6.1.

2.2. Partición del conjunto de datos

La partición del conjunto de datos implica una división no superpuesta de los datos disponibles en dos subconjuntos distintos: el conjunto de datos de entrenamiento y el conjunto de datos de validación. Esta separación proporciona un subconjunto para propósitos analíticos y otro para la verificación del modelo.

1. **Conjunto de entrenamiento.** El conjunto de datos de entrenamiento constituye el 90 % del

conjunto total de datos, abarcando 118 imágenes de labios, mucosa y cavidad oral. Esto incluye 78 imágenes indicativas de cáncer oral y 40 imágenes sin signos de cáncer oral.

2. **Conjunto de validación.** El conjunto de datos de validación comprende el 10 % del conjunto total de datos, con 13 imágenes de labios, mucosa y cavidad oral. Esto incluye 9 imágenes indicativas de cáncer oral y 4 imágenes sin signos de cáncer oral.

La implementación de esta etapa se detalla en la sección 2.6.2.

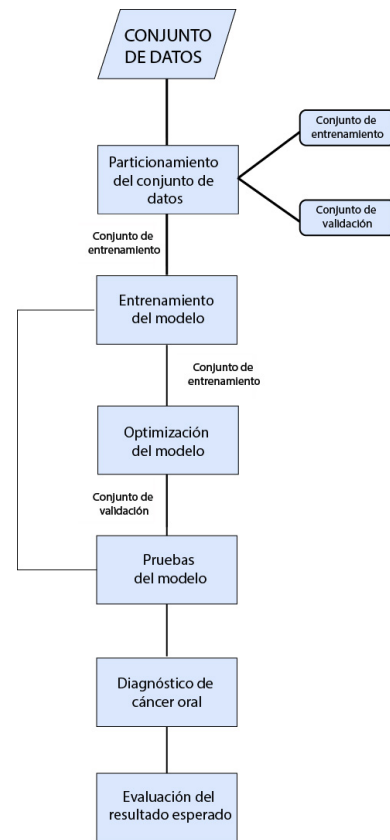


Figura 4. Metodología de desarrollo del modelo

2.3. Entrenamiento, optimización y pruebas del modelo

El modelo de red neuronal convolucional (RNC) propuesto en este estudio fue implementado y entrenado en la plataforma Kaggle, utilizando Python como lenguaje de programación, debido a sus extensas capacidades en aprendizaje automático (AA) y aprendizaje profundo (AP). Estas características hacen que Python sea particularmente adecuado para gestionar las complejidades de la tarea. Durante esta fase, el conjunto de datos de entrenamiento sirvió no solo para el entrenamiento inicial, sino también para la prevalidación

del modelo, sentando así las bases para una mayor optimización y pruebas.

Al validar el modelo desarrollado, que exhibe métricas de rendimiento que oscilan entre 0,5 y 1,0, se identifican las áreas que requieren mejora para optimizar su rendimiento. Se realizan ajustes utilizando el conjunto de datos de entrenamiento. Una vez que se logran métricas de evaluación satisfactorias, el modelo se somete a pruebas para verificar su efectividad y fiabilidad.

Para evaluar el modelo propuesto, se emplea el conjunto de datos de validación para confirmar su alto rendimiento. Si los resultados difieren de las expectativas, se realizan iteraciones adicionales de entrenamiento, optimización y pruebas hasta que se logren los resultados deseados. Este proceso iterativo se documenta en las secciones 2.6.3 y 2.6.4.

2.4. Diagnóstico de la enfermedad del cáncer oral

Basándose en los resultados de rendimiento obtenidos de las pruebas del modelo, se determina la capacidad para el diagnóstico automático del cáncer oral. Este diagnóstico se refiere a las imágenes de los labios, mucosa y cavidad oral utilizadas en el modelo. La implementación de esta etapa se detalla en la sección 2.6.5.

2.5. Evaluación del resultado esperado

Después del diagnóstico de cáncer oral, los resultados obtenidos se evalúan comparando su exactitud, precisión, sensibilidad y puntuación F1. A través de esta comparación, se determina que el diagnóstico proporcionado por el modelo propuesto arroja resultados satisfactorios. La implementación de esta etapa se detalla en la sección 2.6.6.

2.6. Implementación

2.6.1. Carga de bibliotecas y lectura de datos

El desarrollo de la solución comienza con la carga de bibliotecas esenciales, como matplotlib, NumPy y pandas. Se definen parámetros globales y se obtienen imágenes de los labios, mucosa y cavidad oral, ya sean indicativas de la enfermedad o no. Los parámetros clave incluyen:

1. **Tamaño:** Tamaño de entrada [18].
2. **Épocas:** El número de iteraciones sobre el conjunto de datos completo [19].
3. **Tamaño del lote:** División del conjunto de datos en múltiples lotes más pequeños [19].
4. **Pliegues:** El número de pliegues en los que se dividirá el conjunto de datos [20].

2.6.2. Generación del conjunto de datos

Se crea un conjunto de datos que comprende imágenes de labios, membranas mucosas y la cavidad oral, con o sin la enfermedad. Las imágenes se redimensionan y su cantidad se aumenta mediante diversas alteraciones, incluyendo recorte, ajuste de enfoque, rotación, modificación de brillo y volteo.

El conjunto de datos, inicialmente desequilibrado con 44 casos sin cáncer oral y 87 casos con cáncer oral, se somete a un balanceo de clases. Se determinan las clases para identificar la presencia o ausencia de la enfermedad, y las imágenes se segmentan según si muestran o no cáncer oral.

2.6.3. Creación de un modelo

El modelo de RNC propuesto se establece utilizando "MobileNet" como la arquitectura elegida. Además, se emplean los siguientes atributos:

1. **Early Stopping.** Configurado con una paciencia de "10" ciclos de entrenamiento, este atributo monitorea una métrica específica para detectar cualquier signo de mejora antes de concluir [21].
2. **Adam.** Este optimizador implementa el algoritmo de Adam, un método de descenso de gradiente estocástico, basado en la estimación adaptativa de momentos de primer y segundo orden [22].
3. **Sequential.** Este atributo proporciona funciones de entrenamiento e inferencia para el modelo [23].
4. **Conv2D.** Una capa de convolución 2D que genera un kernel de convolución que se aplica sobre las capas de entrada, produciendo un tensor de salida [24].
5. **Relu.** Aplicado para activar la función de activación de unidad lineal rectificada [25].
6. **MaxPooling2D.** Este atributo realiza una operación de pooling máximo para datos espaciales 2D [26].
7. **Flatten.** Utilizado para aplanar la entrada sin afectar el tamaño del lote [27].
8. **Dense.** Esta capa aplica pesos a todos los nodos de la capa precedente [28].
9. **Dropout.** Durante el entrenamiento, este atributo configura aleatoriamente unidades de entrada a 0 con una frecuencia especificada en cada paso, ayudando a prevenir el sobreajuste [29].
10. **SoftMax.** Convierte un vector de valores en una distribución de probabilidad [25].
11. **Compile.** Un método que acepta un argumento de métrica y una lista de métricas [30].

12. **Categorical cross entropy.** Este atributo calcula la pérdida de entropía cruzada entre etiquetas y predicciones [31].

13. **Accuracy.** Calcula la frecuencia con la que las predicciones coinciden con las etiquetas [32].

2.6.4. Entrenamiento con K-fold

El entrenamiento del modelo se ejecuta utilizando los siguientes atributos:

1. **K-fold.** El conjunto de datos se divide en K pliegues, donde cada pliegue sirve como el conjunto de prueba, mientras que el resto del conjunto de datos se utiliza como conjunto de entrenamiento [33, 34].
2. **Stratified Fold.** Este atributo asegura una mayor validación cruzada, preservando la distribución de clases en el conjunto de datos, tanto en las divisiones de entrenamiento como de validación [35].
3. **To categorical.** Convierte un vector de clases (enteros) en una matriz de clases binarias [36].
4. **Image Data Generator.** Este atributo facilita la generación de bloques de entrenamiento y realiza el aumento de datos, incrementando el número de imágenes mediante modificaciones como zum, escalado, volteo horizontal, etc. [37].
5. **Fit.** Esta función se utiliza para entrenar el modelo durante un número fijo de épocas (iteraciones sobre un conjunto de datos) [38].
6. **Model Checkpoint.** Sirve como un *callback* para guardar el modelo o los pesos del modelo de Keras en intervalos especificados [39].
7. **Create model.** Esta función es responsable de crear y entrenar una nueva instancia del modelo [40].

De manera similar, se propone otra RNC para crear el modelo, utilizando “ResNet152V2”, “DenseNet121” y “EfficientNetB6” como las arquitecturas elegidas. La Tabla 1 ilustra una comparación del rendimiento del modelo utilizando estas arquitecturas de aprendizaje profundo.

Tabla 1. Comparación de arquitecturas de aprendizaje profundo

ResNet152V2	Precisión (%)	Recall (%)	Puntuación F1 (%)
Con cáncer oral	90	93	92
Sin cáncer oral	85	80	82
Precisión AUC	0.8855		
	0.863244514106583		
DenseNet121	Precisión (%)	Recall (%)	Puntuación F1 (%)
Con cáncer oral	85	94	90
Sin cáncer oral	86	68	76
Precisión AUC	0.8550		
	0.812173458725183		

Con respecto al uso de “Efficient Net B6”, surge un problema de memoria al comienzo del pliegue 3 durante el entrenamiento del modelo, lo que impide la finalización del proceso.

De manera similar, aunque los resultados del modelo utilizando las arquitecturas “Res Net 152V2”, “Dense Net 121” y “Mobile Net”, en el mismo conjunto de datos, son comparables, el número de hiperparámetros utilizados en MobileNet es menor. Las figuras 5, 6, y 7 ilustran el número de hiperparámetros obtenidos para cada arquitectura:

“ResNet152V2” utilizó 76MM, como se muestra en la Figura 5.

Notebook	Input	Output	Logs	Comments (0)	Settings
<pre>*****Starting fold 1 of 4 Downloading data from https://storage.googleapis.com/tensorflow/keras-applications t152v2_weights_tf_dim_ordering_tf_kernels_notop.h5 234553344/234545216 [*****] - 6s 0us/step 234561536/234545216 [*****] - 6s 0us/step layers 564 Model: "sequential"</pre>					
Layer (type)	Output Shape	Param #			
resnet152v2 (Functional)	(None, 7, 7, 2048)	58331648			
conv2d (Conv2D)	(None, 5, 5, 64)	1179712			
conv2d_1 (Conv2D)	(None, 3, 3, 64)	36928			
max_pooling2d_3 (MaxPooling2D)	(None, 1, 1, 64)	0			
flatten (Flatten)	(None, 64)	0			
dense (Dense)	(None, 4096)	266240			
dropout (Dropout)	(None, 4096)	0			
dense_1 (Dense)	(None, 4096)	16781312			
dropout_1 (Dropout)	(None, 4096)	0			
dense_2 (Dense)	(None, 2)	8194			
Total params: 76,604,034					
Trainable params: 76,460,290					

Figura 5. Número de hiperparámetros de ResNet152V2

“DenseNet121” utilizó 24MM, como se muestra en la Figura 6.

Notebook	Input	Output	Logs	Comments (0)	Settings
****Starting fold 1 of 4					
Downloading data from https://storage.googleapis.com/tensorflow/keras-applications/senet121_weights_tf_dim_ordering_tf_kernels_notop.h5					
29089792/29084464 [*****] - 0s 0us/step					
29097984/29084464 [*****] - 0s 0us/step					
layers 427					
Model: "sequential"					
Layer (type)	Output Shape	Param #			
densenet121 (Functional)	(None, 7, 7, 1024)	7037504			
conv2d (Conv2D)	(None, 5, 5, 64)	589888			
conv2d_1 (Conv2D)	(None, 3, 3, 64)	36928			
max_pooling2d (MaxPooling2D)	(None, 1, 1, 64)	0			
flatten (Flatten)	(None, 64)	0			
dense (Dense)	(None, 4096)	266240			
dropout (Dropout)	(None, 4096)	0			
dense_1 (Dense)	(None, 4096)	16781312			
dropout_1 (Dropout)	(None, 4096)	0			
dense_2 (Dense)	(None, 2)	8194			
Total params: 24,720,066					
Trainable params: 24,636,418					

Figura 6. Número de hiperparámetros de DenseNet121

"MobileNet" utilizó 24MM, como se muestra en la Figura 7.

Notebook	Input	Output	Logs	Comments (0)	Settings
****Starting fold 1 of 4 layers 86 Model: "sequential_29"					

Layer (type)	Output Shape			Param #	
=====					
mobilenet_1.00_224 (Function)				(None, 7, 7, 1024)	
				3228864	

conv2d_52 (Conv2D)				(None, 5, 5, 64)	
				589888	

conv2d_53 (Conv2D)				(None, 3, 3, 64)	
				36928	

max_pooling2d_26 (MaxPooling)				(None, 1, 1, 64)	
				0	

flatten_26 (Flatten)				(None, 64)	
				0	

dense_84 (Dense)				(None, 4096)	
				266240	

dropout_58 (Dropout)				(None, 4096)	
				0	

dense_85 (Dense)				(None, 4096)	
				16781312	

dropout_59 (Dropout)				(None, 4096)	
				0	

dense_86 (Dense)				(None, 2)	
				8194	
=====					
Total params: 20,911,426					
Trainable params: 20,889,538					

Figura 7. Número de hiperparámetros de MobileNet

2.6.5. Verificación del modelo

El proceso de verificación del modelo se realiza utilizando todo el conjunto de datos de validación, empleando los siguientes atributos:

1. **Evaluate.** Esta función devuelve el valor de pérdida y los valores métricos del modelo en modo de prueba [38].
2. **Predict.** Genera predicciones de salida para las muestras de entrada [38].
3. **Confusion matrix.** El cálculo de la matriz de confusión se utiliza para evaluar la precisión de una clasificación [41].
4. **Subplot.** Este atributo obtiene la posición del índice en una cuadrícula con "n" filas y "n" columnas [42].
5. **Heatmap.** Se utiliza para obtener un mapa de calor de activación de clases para un modelo de clasificación de imágenes [43].
6. **Set-ticklabels.** Esta función establece los nombres de destino para la matriz de confusión.
7. **Roc curve.** Este atributo calcula la curva ROC [44].
8. **Roc-auc-core.** Calcula el AUC de la curva ROC a partir de las puntuaciones de predicción [45].

2.6.6. Trazado de curvas AUC

La Figura 8 muestra un gráfico de la tasa de verdaderos positivos frente a la tasa de falsos positivos, ilustrando el AUC a través de líneas. Esta visualización permite observar la relación entre estas dos variables.

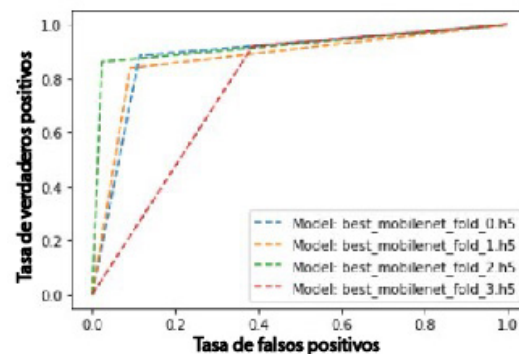


Figura 8. Trazado de curvas AUC

Se confirma que el modelo de RNC propuesto demuestra un alto rendimiento en la clasificación de la presencia y ausencia de cáncer oral.

3. Resultados y discusión

La Figura 9 ilustra el gráfico de los valores de precisión frente al número de épocas, utilizando líneas para visualizar la relación entre estas dos variables.

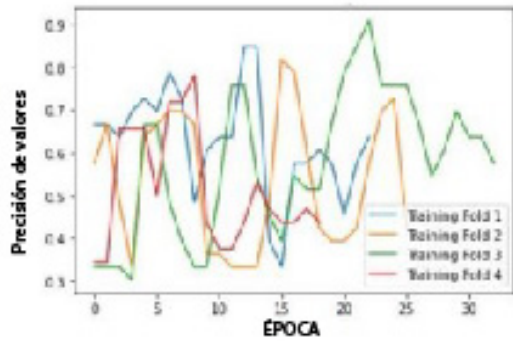


Figura 9. Precisión del modelo por pliegue

Al entrenar el modelo, se obtiene la precisión para cada pliegue.

En el primer entrenamiento, con el pliegue 1, se logra una "precisión de valor" de 0,84848.

En el segundo entrenamiento, con el pliegue 2, se logra una "precisión de valor" de 0,81818.

En el tercer entrenamiento, con el pliegue 3, se logra una "precisión de valor" de 0,90909.

En el cuarto entrenamiento, con el pliegue 4, se logra una "precisión de valor" de 0,78125.

Se observa que el pliegue 1 alcanza una buena "precisión de valor"; el pliegue 2 disminuye la "precisión de valor"; el pliegue 3 alcanza la mayor "precisión de valor" con un valor de 0,90909, y el pliegue 4 disminuye la "precisión de valor".

Durante la validación del modelo, se obtienen las siguientes métricas para el modelo guardado como "best mobilenet fold 0.h5," como se ilustra en la Tabla 2.

Tabla 2. Métricas de rendimiento del modelo simple con la partición 1

	Precisión (%)	Recall (%)	Puntuación F1 (%)
Con cáncer oral	80	89	84
Sin cáncer oral	94	89	91
AUC	0.8857105538140021		

El archivo "best mobilenet fold 1.h5" alcanza las siguientes clasificaciones, como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Métricas de rendimiento del modelo simple con la partición 2

	Precisión (%)	Recall (%)	Puntuación F1 (%)
Con cáncer oral	74	91	82
Sin cáncer oral	95	84	89
AUC	0.8740856844305119		

El archivo "best mobilenet fold 2.h5" alcanza las siguientes clasificaciones, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Métricas de rendimiento del modelo simple con la partición 3

	Precisión (%)	Recall (%)	Puntuación F1 (%)
Con cáncer oral	78	98	87
Sin cáncer oral	99	86	92
AUC	0.9196708463949843		

El archivo "best mobilenet fold 3.h5" alcanza las siguientes clasificaciones, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Métricas de rendimiento del modelo simple con la partición 4

	Precisión (%)	Recall (%)	Puntuación F1 (%)
Con cáncer oral	79	61	69
Sin cáncer oral	82	92	87
AUC	0.7665882967607105		

Se concluye que el modelo "best mobilenet fold 2.h5" se destaca como la opción óptima, exhibiendo la mayor precisión (78 % y 99 %), sensibilidad (98 % y 86 %), puntuación F1 (87 % y 92 %) y AUC (0,9196708463949843) tanto para casos no cancerosos como cancerosos, superando el rendimiento de otros modelos.

Comparativamente, entre las arquitecturas "ResNet152V2", "DenseNet121" y "MobileNet", se demuestra que la arquitectura "MobileNet" es óptima en términos de optimización de recursos, utilizando veinte millones de hiperparámetros, mientras que las arquitecturas "ResNet152V2" y "DenseNet121" utilizan un número significativamente mayor de hiperparámetros.

Además de las métricas de rendimiento de las arquitecturas "ResNet152V2", "DenseNet121" y "EfficientNetB6" evaluadas, el modelo presentado en [7] demostró una precisión de 84,3 %, una sensibilidad de 83,0 %, una puntuación F1 de 83,6 % y un AUC de 0,8974. En contraste, el modelo propuesto en este estudio mostró mejoras, logrando una precisión de 88,5 %, una sensibilidad de 92,0 %, una puntuación F1 de 89,5 % y un AUC de 0,9196708463949843. Por lo tanto, se observa una mejora notable en el rendimiento general, que oscila entre el 2 % y el 9 %.

4. Conclusiones

Este estudio resalta el potencial de la IA para abordar problemas de salud oral, particularmente el cáncer oral, que afecta a una parte significativa de la población. La investigación enfatiza la efectividad del aprendizaje profundo (AP) y concluye que las redes neuronales convolucionales (RNC) son un algoritmo adecuado de AP para procesar imágenes de la mucosa y la cavidad oral. Las RNC toman estas imágenes como entrada y asignan pesos a elementos específicos para distinguir entre ellos. La elección de la RNC MobileNet se

justifica por su capacidad para reducir el tamaño del modelo y la computación al reemplazar los filtros de convolución estándar con convoluciones profundas y puntuales.

El estudio utiliza la plataforma de código abierto Kaggle e implementa el modelo utilizando el lenguaje de programación Python. La evaluación de varias métricas de rendimiento arroja una precisión de 0,90909, confirmando que el modelo de RNC propuesto demuestra un alto rendimiento diagnóstico para el cáncer oral. En cuanto a la cantidad de imágenes, el estudio especifica que el uso de más imágenes mejora los resultados del modelo de AP propuesto. Además, la evaluación de diferentes arquitecturas de RNC ayuda a comprender su rendimiento, facilitando la determinación del modelo más óptimo.

En última instancia, esta investigación afirma que el modelo desarrollado está listo para su aplicación práctica, ofreciendo un valioso apoyo para la toma de decisiones dentales en escenarios de diagnóstico en tiempo real.

4.1. Trabajo futuro

Los esfuerzos continuados en la recolección de más imágenes de labios, mucosa y cavidad oral que representen diversas condiciones orales, incluido el cáncer oral, serán un punto focal para estudios futuros. Se cree que aumentar el conjunto de datos de imágenes y colaborar con instituciones clínicas públicas y privadas para su evaluación mejorará significativamente los resultados y facilitará la aplicación práctica del modelo. Reconociendo el papel crucial de los grandes conjuntos de datos en la optimización de los algoritmos de aprendizaje profundo (AP), los resultados actuales son prometedores y sirven como un primer paso para avanzar en esta línea de investigación. Además, los próximos esfuerzos de investigación se centrarán en evaluar el rendimiento del método de RNC propuesto en el diagnóstico de un espectro más amplio de enfermedades orales.

Referencias

- [1] L. A. Zanella-Calzada, C. E. Galván-Tejada, N. M. Chávez-Lamas, J. Rivas-Gutiérrez, R. Magallanes-Quintanar, J. M. Celaya-Padilla, J. I. Galván-Tejada, and H. Gamboa-Rosales, "Deep artificial neural networks for the diagnostic of caries using socioeconomic and nutritional features as determinants: Data from NHANES 2013–2014," *Bioengineering*, vol. 5, no. 2, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/bioengineering5020047>
- [2] J. Shan, R. Jiang, X. Chen, Y. Zhong, W. Zhang, L. Xie, J. Cheng, and H. Jiang, "Machine learning predicts lymph node metastasis in early-stage oral tongue squamous cell carcinoma," *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, vol. 78, no. 12, pp. 2208–2218, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.joms.2020.06.015>
- [3] A. M. Bur, A. Holcomb, S. Goodwin, J. Woodroof, O. Karadaghy, Y. Shnayder, K. Kakarala, J. Brant, and M. Shew, "Machine learning to predict occult nodal metastasis in early oral squamous cell carcinoma," *Oral Oncology*, vol. 92, pp. 20–25, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.oraloncology.2019.03.011>
- [4] O. Kwon, T.-H. Yong, S.-R. Kang, J.-E. Kim, K.-H. Huh, M.-S. Heo, S.-S. Lee, S.-C. Choi, and W.-J. Yi, "Automatic diagnosis for cysts and tumors of both jaws on panoramic radiographs using a deep convolution neural network," *Dentomaxillofacial Radiology*, vol. 49, no. 8, p. 20200185, Dec 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1259/dmfr.20200185>
- [5] X. Zhang, Y. Liang, W. Li, C. Liu, D. Gu, W. Sun, and L. Miao, "Development and evaluation of deep learning for screening dental caries from oral photographs," *Oral Diseases*, vol. 28, no. 1, pp. 173–181, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/odi.13735>
- [6] H.-J. Chang, S.-J. Lee, T.-H. Yong, N.-Y. Shin, B.-G. Jang, J.-E. Kim, K.-H. Huh, S.-S. Lee, M.-S. Heo, S.-C. Choi, T.-I. Kim, and W.-J. Yi, "Deep learning hybrid method to automatically diagnose periodontal bone loss and stage periodontitis," *Scientific Reports*, vol. 10, no. 1, p. 7531, May 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64509-z>
- [7] H. Lin, H. Chen, L. Weng, J. Shao, and J. Lin, "Automatic detection of oral cancer in smartphone-based images using deep learning for early diagnosis," *Journal of Biomedical Optics*, vol. 26, no. 8, p. 086007, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1117/1.JBO.26.8.086007>
- [8] W. Li, Y. Liang, X. Zhang, C. Liu, L. He, L. Miao, and W. Sun, "A deep learning approach to automatic gingivitis screening based on classification and localization in RGB photos," *Scientific Reports*, vol. 11, no. 1, p. 16831, Aug 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96091-3>
- [9] M. A. Dávila Olivos and F. M. Santos López, "Prediction models of oral diseases: A systematic review of the literature," in *Emerging Research in Intelligent Systems*, G. F. Olmedo Cifuentes, D. G. Arcos Avilés, and H. V. Lara Padilla,

- Eds. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 309–322. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-031-52255-0_22
- [10] A. Pujara, “Image classification with mobilenet,” *Analytics Vidhya*, 2020. [Online]. Available: <https://n9.cl/coutpg>
- [11] F. Melo, *Receiver Operating Characteristic (ROC) Curve*. New York, NY: Springer New York, 2013, pp. 1818–1823. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9863-7_242
- [12] —, *Area under the ROC Curve*. New York, NY: Springer New York, 2013, pp. 38–39. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9863-7_209
- [13] H. Rhys, *Machine Learning with R, the tidyverse, and mlr*. Manning Publications, 2020. [Online]. Available: <https://n9.cl/q3hijw>
- [14] LabTests Online UK. (2018) Accuracy, precision, specificity & sensitivity. Association for Laboratory Medicine. [Online]. Available: <https://n9.cl/8cvyq>
- [15] J. Martínez Heras. (2018) Machine learning lectures esa. GitHub, Inc. [Online]. Available: <https://n9.cl/7yim6>
- [16] OMS. (2021) Salud bucodental. Organización Mundial de la Salud. [Online]. Available: <https://n9.cl/zpz0f>
- [17] Kaggle. (2020) Oral cancer (lips and tongue) images. Kaggle. [Online]. Available: <https://n9.cl/7ftbq>
- [18] Keras. (2022) Mobilenet, mobilenetv2, and mobilenetv3. Keras. [Online]. Available: <https://n9.cl/dcv52>
- [19] S. Sharma. (2022) Epoch vs batch size vs iterations. Medium. [Online]. Available: <https://n9.cl/wlxncj>
- [20] S. Manna. (2022) K-fold cross validation for deep learning models using keras. Medium. [Online]. Available: <https://n9.cl/hmyvr>
- [21] Keras. (2022) Earlystopping. Keras. [Online]. Available: <https://n9.cl/undx7>
- [22] —. (2022) Adam. Keras. [Online]. Available: <https://n9.cl/x9m53>
- [23] —. (2022) The sequential class. Keras. [Online]. Available: <https://n9.cl/yi56j>
- [24] GeeksforGeeks. (2022) Keras.conv2d class. Geeks for Geeks. [Online]. Available: <https://n9.cl/6bemi>
- [25] Keras. (2022) Layer activation functions. Keras. [Online]. Available: <https://n9.cl/d9yeb>
- [26] —. (2022) Maxpooling2d layer. Keras. [Online]. Available: <https://n9.cl/51sbk>
- [27] —. (2022) Flatten layer. Keras. [Online]. Available: <https://n9.cl/cufk4>
- [28] I. Hull, *Dense layers – Introduction to tensorflow in Python*. DataCamp. [Online]. Available: <https://n9.cl/hny28>
- [29] Keras. (2022) Dropout layer. Keras. [Online]. Available: <https://n9.cl/02hdv>
- [30] —. (2022) Metrics. Keras. [Online]. Available: <https://n9.cl/jmihj>
- [31] —. (2022) Probabilistic metrics. Keras. [Online]. Available: <https://n9.cl/b3w2a>
- [32] —. (2022) Accuracy metrics. Keras. [Online]. Available: <https://n9.cl/7l3dt>
- [33] Data Science Team. (2020) Validación cruzada k-fold. Data Science Team. [Online]. Available: <https://n9.cl/c2i0bp>
- [34] R. Delgado. (2018) Introducción a la validación cruzada (k-fold cross validation) en R. Amazon-aws. [Online]. Available: <https://n9.cl/ijyq>
- [35] S. Yildirim. (2020) How to train test split : Kfold vs stratifiedkfold. Medium. [Online]. Available: <https://n9.cl/ymp9q>
- [36] Keras. (2022) Python & numpy utilities. Keras. [Online]. Available: <https://n9.cl/zrhgh>
- [37] J. Utrera Burgal. (2019) Tratamiento de imágenes usando imagedatagenerator en keras. Knowmad mood. [Online]. Available: <https://n9.cl/5gobr>
- [38] Keras. (2022) Model training apis. Keras. [Online]. Available: <https://n9.cl/4gjr6>
- [39] —. (2022) Modelcheckpoint. Keras. [Online]. Available: <https://n9.cl/wvut7>
- [40] Tensorflow. (2022) Guardar y cargar modelos. TensorFlow. [Online]. Available: <https://n9.cl/cjflnu>
- [41] Scikit Learn. (2022) sklearn.metrics.confusion matrix. Scikit-learn developers. [Online]. Available: <https://n9.cl/ya6b1h>
- [42] Matplotlib. (2022) matplotlib.pyplot.subplot. Matplotlib. [Online]. Available: <https://n9.cl/vlv1fe>

- [43] Keras. (2022) Grad-cam class activation visualization. Keras. [Online]. Available: <https://n9.cl/r5l7k>
- [44] Scikitlearn. (2022) sklearn.metrics.roc curve. Scikitlearn. [Online]. Available: <https://n9.cl/qles5>
- [45] ——. (2022) sklearn.metrics.roc auc score. Scikitlearn. [Online]. Available: <https://n9.cl/1zf6r>



ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA CINEMÁTICA EN LA COLISIÓN ELÁSTICA ENTRE DOS CUERPOS DURANTE EL TIEMPO DE CONTACTO

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE KINEMATICS IN THE ELASTIC COLLISION BETWEEN TWO BODIES DURING THE CONTACT TIME

Suyana Arcos Villagómez^{1,*} , Santiago Álvaro Pillalaza² ,
 Xavier Rivera Gálvez² , César Michelena Rosero² , Emilse Camacho Cañar²

Recibido: 25-03-2024, Recibido tras revisión: 21-05-2024, Aceptado: 06-06-2024, Publicado: 01-07-2024

Resumen

La colisión elástica entre dos cuerpos es un evento rápido y difícil de observar, dado que el tiempo de contacto es infinitesimal, del orden de centésimas o incluso milésimas de segundo, por lo que surge el desafío de medir con precisión las velocidades y fuerzas impulsivas, así como establecer funciones representativas. En este trabajo se propone abordar precisamente ese objetivo. Las mediciones experimentales de la variación de la velocidad, aceleración y fuerza, durante el tiempo de contacto, desempeñan un papel esencial en la validación de modelos teóricos y funciones que describen el comportamiento de las colisiones en situaciones del mundo real. Estas mediciones permiten optimizar la respuesta de activación de los airbags, sistemas de retención en los automóviles, hasta reconstruir accidentes desde el punto de vista de la Física. La experimentación se llevó a cabo en un laboratorio práctico asistido por computadora, empleando sensores inalámbricos incorporados en los carros de prueba y dispuestos sobre una pista de bajo coeficiente de rozamiento. El escenario de la colisión fue horizontal y frontal, sin que los cuerpos sufrieran deformaciones permanentes. La metodología principal utilizada en este análisis es cuantitativa y cualitativa, enfocándose en la recopilación y estudio de datos numéricos para identificar patrones y relaciones matemáticas entre las variables. Este enfoque combinado permite una comprensión más completa de la cinemática de los carros en colisión durante el tiempo de contacto.

Palabras clave: choque elástico, colisión de dos cuerpos, tiempo de contacto, cinemática de dos cuerpos, coeficiente de rozamiento

Abstract

The elastic collision between two bodies is a fleeting event challenging to observe due to its infinitesimally short contact time, usually lasting mere hundredths or even thousandths of a second. This brief duration poses significant challenges for accurately measuring velocities and impulsive forces and establishing representative functions. Consequently, this study aims to address these challenges. Experimental measurements of velocity, acceleration, and force changes during the contact period are crucial for validating theoretical models and functions that accurately represent the dynamics of collisions under realistic conditions. These measurements are critical in optimizing the activation response of airbag and restraint systems in vehicles and are fundamental in reconstructing physical scenarios of accidents. The experiments were conducted in a practical computer-assisted laboratory, utilizing wireless sensors embedded within the test vehicles and positioned on a low-friction track. The collision setup was designed to be horizontal and frontal, ensuring that the bodies involved did not undergo permanent deformations. The primary methodology adopted in this analysis integrates both quantitative and qualitative approaches, focusing on collecting and analyzing numerical data to identify patterns and establish mathematical relationships between variables. This integrated approach offers a more comprehensive understanding of the kinematics of colliding vehicles during the contact period.

Keywords: elastic collision, two-body collision, contact time, two-body kinematics, coefficient of friction

^{1,*}Escuela de Ingeniería de Sistemas, Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Ecuador.
 Autor para correspondencia ✉: sfarcos@puce.edu.ec.

²Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Ecuador.

Forma sugerida de citación: Arcos Villagómez, S.; Álvaro Pillalaza, S.; Rivera Gálvez, X.; Michelena Rosero, C. y Camacho Cañar, E. "Análisis experimental de la cinemática en la colisión elástica entre dos cuerpos durante el tiempo de contacto," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 32, pp. 69-76, 2024. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n32.2024.07>.

1. Introducción

En física resulta importante llevar a cabo experimentos para comprender a fondo los fenómenos que por lo general se dan por hecho en la teoría [1]. En el estudio de la colisión elástica frontal, donde los cuerpos no sufren deformaciones permanentes durante el impacto y no se produce intercambio de masa se separan íntegramente después de la colisión [2], se considera el principio de conservación de la energía cinética y del momento lineal, tanto antes como después del impacto. Sin embargo, se pasa por alto lo que acontece durante el tiempo de contacto entre los objetos que intervienen en la colisión.

Las colisiones entre cuerpos han sido objeto de un amplio estudio en el ámbito de la física y la caracterización del tiempo de contacto durante dichas colisiones es de particular interés para la presente investigación. Este tiempo, definido como el intervalo instantáneo en el cual los objetos interactúan durante el impacto, desempeña un factor importante en la determinación de las fuerzas y los cambios en las velocidades de los cuerpos de prueba. Por la complejidad inherente a este fenómeno, especialmente en entornos reales, se ha limitado significativamente la capacidad para comprenderlo de manera absoluta.

El tiempo de contacto puede situarse en el orden de centésimas o milésimas de segundo, lo que plantea desafíos considerables para la obtención precisa de datos experimentales.

La creciente incorporación de la tecnología en los laboratorios de física permite obtener mediciones de los parámetros físicos en intervalos cortos de tiempo, además, permite registrar información de eventos que pasan desapercibidos para el observador, debido a lo rápido que suceden y que con el uso de instrumentos convencionales no se puede lograr [2]. En este contexto, la evolución de los sensores de posición y movimiento desempeña un papel fundamental en el estudio de la colisión de los cuerpos, ya que posibilita la obtención de información de procesos graduales prácticamente instantáneos.

Los equipos actuales disponibles en diversos laboratorios de física incorporan avanzados dataloggers. Estos dispositivos digitales facilitan la conexión de varios sensores para la recopilación de datos, desempeñando un papel integral en la realización de experimentos.

Los *dataloggers* pueden ser reemplazados por computadores con conectividad Bluetooth para receptar la información de los sensores, que son transductores que tienen la tecnología para detectar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación y transformarlas en variables eléctricas [3].

En el mundo real, las magnitudes físicas son inherentemente analógicas, para su procesamiento y utilización en dispositivos digitales, se recurre al convertidor analógico-digital (ADC). Sin embargo, antes

de la digitalización, estas magnitudes atraviesan una etapa previa conocida como frecuencia de muestreo. Esta característica determina la cantidad de muestras que se toman por segundo. Un adecuado ajuste de la frecuencia de muestreo garantiza una captura efectiva de la información analógica, evitando pérdidas significativas de datos y permitiendo una conversión más fiel en el proceso de digitalización.

El muestreo, también denominado discretización de señal, es el primer paso en el proceso de conversión de una señal analógica (tiempo y amplitud continuos) en una señal digital (tiempo y amplitud discretos) [4].

Dada esta perspectiva, la implementación de carros con sensores se postula como una alternativa para recrear colisiones elásticas y examinar minuciosamente los eventos que suceden durante el momento de contacto entre los cuerpos.

La utilización de sensores en un entorno real es de importancia al momento de activar los sistemas de seguridad pasivos de los vehículos.

En el caso de un impacto, el cinturón de seguridad con pretensor y el airbag son sistemas de seguridad pasiva. Entre los principales elementos del sistema airbag, se encuentra la unidad de control, el sensor de seguridad *Safing* y el sensor de impacto. El sensor de seguridad *Safing* está integrado en el módulo airbag y conectado en línea con los sensores de impacto frontal. El sensor de impacto es sensible a la combinación de fuerza, aceleración y tiempo de duración [5]. El sensor de aceleración aporta información de cómo varía la velocidad a la que se mueve el vehículo y el sensor de impacto detecta la fuerza de impacto frontal [6].

El sistema airbag es comandado por la unidad electrónica para su activación, esto lo realiza sobre la base de las señales recibidas por el sensor del sistema que está ubicado estratégicamente para detectar paradas bruscas por causa de una colisión.

El airbag entra en acción ante un cambio brusco de la inercia general del vehículo, como sucede en caso de un impacto frontal contra un obstáculo u otro vehículo [7].

La simulación de impacto frontal para el análisis biomecánico mediante elementos finitos permite conocer los beneficios de la implementación de un airbag como elemento de seguridad pasiva [8]. Este enfoque no solo mejora la calidad de la presente investigación, sino que también abre nuevas posibilidades para explorar y validar modelos teóricos en un contexto práctico y dinámico.

El nuevo reto de los laboratorios de física es utilizar de forma efectiva toda la información generada por los sensores para su interpretación y análisis [9]. La interpretación cuidadosa y absoluta de estos datos es fundamental para comprender los fenómenos físicos subyacentes y para validar las teorías existentes o formular nuevas hipótesis. Los datos experimentales proporcionan una base empírica sólida que respalda las

conclusiones científicas y permite a los investigadores tomar decisiones informadas sobre el desarrollo de teorías y modelos.

2. Materiales y métodos

La metodología utilizada en la investigación se sintetiza en la Figura 1. Se muestran las etapas más relevantes de la experimentación.

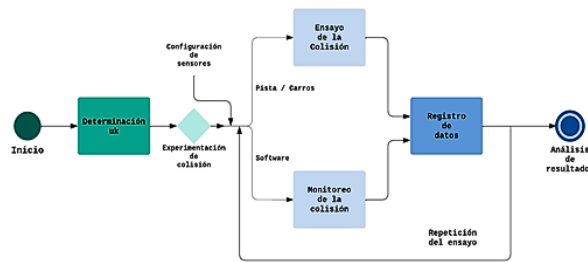


Figura 1. Diagrama de la metodología utilizada en la experimentación

Para llevar a cabo la experimentación, se determinó el coeficiente de rozamiento dinámico u_k entre las llantas delgadas de plástico de los carros y la pista de aluminio, para lo cual, se colocó un carro sobre la pista horizontal y se aumentó el ángulo de inclinación (θ) hasta que el carro comenzó a moverse libremente (θ_k), denominado ángulo de fricción cinética [10].

Para establecer la ecuación que permite encontrar el coeficiente de rozamiento dinámico se consideraron las fuerzas involucradas en el diagrama de cuerpo libre [11] y el ángulo de inclinación.

La relación matemática que se estableció para determinar este coeficiente es $u_k = \tan(\theta_k)$ [12], se obtuvo del libro de Física de Serway, dando como resultado un coeficiente de rozamiento dinámico experimental de $u_k = 0,009$.

A continuación, se utilizaron los carros de prueba equipados con sensores inalámbricos en condiciones óptimas y masas aproximadamente iguales ($m_1 = 0,5048 \text{ kg}$) y ($m_2 = 0,5022 \text{ kg}$).

Los carros fueron dispuestos de manera frontal sobre la pista de aluminio y separados por una distancia de un metro. Se estableció una conexión entre el sistema Bluetooth de la computadora y los sensores, con el fin de recopilar datos.

La pista fue instalada de manera tal que no presente desniveles y quede libre de obstrucciones, con el objetivo de minimizar la pérdida de energía cinética (ver Figura 2).

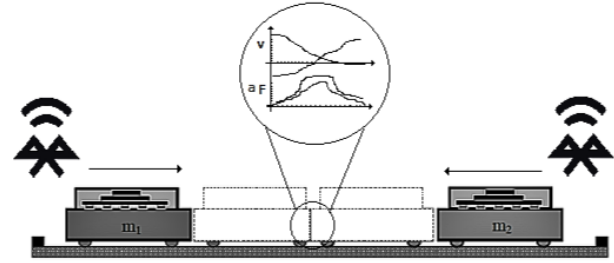


Figura 2. Representación esquemática de los sucesos que ocurren en el tiempo de colisión

Para proporcionar el impulso inicial a los carros, se utilizaron resortes con características similares y fuerzas equivalentes, los cuales fueron incorporados en la parte posterior de cada carro. Al liberar los resortes, los carros se desplazaron en sentidos contrarios, produciéndose la colisión.

Las experimentaciones permitieron verificar que el tiempo de contacto fue de 0,025 segundos, lo que implica una colisión rápida y potencialmente violenta. Durante esta fracción de tiempo, también se establecieron los valores de las velocidades al inicio y al final del contacto, los cuales representan el promedio de los datos experimentales (Tabla 1).

Tabla 1. Velocidades de los carros en el tiempo de contacto

Tiempo [s]	Velocidad carro (1) [m/s]	Velocidad carro (2) [m/s]
0,002	0,88	-0,88
0,024	-0,61	0,64

En este lapso, existen cambios rápidos de la velocidad, por lo tanto, con una frecuencia de muestreo inferior a la mínima requerida se puede llevar a la pérdida de información y a la distorsión de la señal registrada.

Para reconstruir con precisión la señal a partir de los datos muestreados, es esencial que la frecuencia de muestreo sea adecuada.

El teorema de Nyquist-Shannon se puede aplicar a cualquier señal, incluidas las señales polinómicas. Este teorema establece que, para reconstruir una señal de manera precisa a partir de sus muestras, la frecuencia de muestreo debe ser al menos el doble de la frecuencia más alta presente en la señal [13]. En el caso de una señal polinómica, la frecuencia más alta corresponde a la frecuencia de oscilación más alta de la función polinómica. La función polinómica no tiene una frecuencia intrínseca, ya que no se trata de una señal periódica. Sin embargo, su frecuencia más alta puede ser determinada por su tasa de cambio máxima.

La tasa de cambio máxima (T_{CM}) se obtiene al valorar la función de la velocidad en el intervalo de colisión, mediante la ecuación (1).

$$T_{CM} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_f - v_0}{t_f - t_0}$$

$$T_{CM}(v_1) = \frac{\Delta v_1}{\Delta t} = \frac{(-0,62 - 0,88)}{0,024 - 0,002} = -68,18 \quad (1)$$

$$T_{CM}(v_2) = \frac{\Delta v_2}{\Delta t} = \frac{(0,62 - (-0,87))}{0,024 - 0,002} = 67,72$$

La tasa de cambio de las funciones velocidad tiene valores considerables de $-68,18$ y $67,72$, sugiriendo que existe una variación rápida. Las tasas de cambio en valor absoluto son semejantes, sin embargo, la mayor tasa de cambio entre estos valores es $68,18$. Este valor es referente para aplicar el teorema de Nyquist-Shannon (F_{NyS}) que sugiere una frecuencia mínima de muestreo como el doble de la tasa máxima de cambio, (ecuación (2)).

$$T_{cm}(v_1, v_2) = 68,18$$

$$F_{NyS} = 2 * T_{cm} = 136,36 \quad (2)$$

La frecuencia mínima necesaria para el muestreo es de $136,36$ Hz. Sin embargo, para asegurar una reconstrucción óptima de la señal, se utilizó una frecuencia de muestreo superior a la mínima requerida, en este caso, se estableció una frecuencia de muestreo (f_m) de 500 Hz.

En un periodo de $0,024$ segundos y con una frecuencia de muestreo definida, se lograron registrar doce datos, número de datos (N_d), (ecuación (3)).

$$N_d = f_m * t$$

$$N_d = 500 * 0,024 = 12 \quad (3)$$

Este número de datos es aplicable para la reconstrucción de las señales en discusión, debido a que la experimentación ocurre en un tiempo de $0,024$ segundos.

3. Resultados y discusión

En el marco de análisis, se recrearon múltiples colisiones. Durante la colisión, los carros de prueba no sufrieron deformaciones permanentes ni variación de masa. Las velocidades fueron monitoreadas de manera continua, registrándose los datos en el intervalo de tiempo.

Los múltiples ensayos formaron patrones y valores similares de velocidad durante el tiempo de contacto (ver Figura 3).

Al observar el tiempo inicial en la Figura 3, los móviles tienen velocidades promedio con magnitudes de $0,88$ m/s y $-0,87$ m/s, respectivamente. Las velocidades tienen signos opuestos, indicando que los móviles se mueven en sentidos contrarios. A medida que avanza el tiempo, las velocidades de ambos móviles disminuyen.

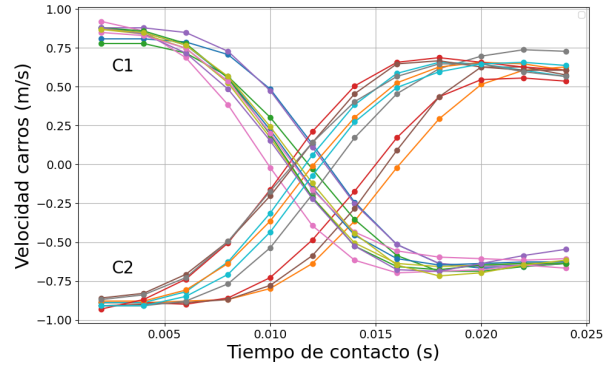


Figura 3. Velocidad de los carros durante el tiempo de contacto en la colisión

Esto indica que existe una fuerza de frenado que actúa sobre los carros en contacto. Alrededor de los $0,014$ segundos, las velocidades cambian de signo para los dos carros. Esto indica un cambio en el sentido del movimiento. De los $0,014$ segundos en adelante, las velocidades de los carros continúan variando, pero con magnitudes y sentidos diferentes; el carro 1 tiene velocidades negativas, el carro 2 tiene velocidades positivas, lo que indica que se están moviendo en sentidos opuestos a la inicial. A los $0,024$ segundos se observa que las velocidades de los carros han disminuido en magnitud, por la presencia de fuerzas disipativas como la fuerza de rozamiento, cuyo efecto es la pérdida de energía.

Para identificar las funciones matemáticas que se ajusten de manera óptima a los datos, se llevó a cabo un análisis de regresión. A través de este proceso, se determina que la función polinómica de grado 5 es la más adecuada para modelar la información disponible.

Las experimentaciones en un ambiente controlado pueden estar sujetas a variaciones y errores inherentes, como errores de medición o condiciones físicas de los instrumentos utilizados. Sin embargo, la reproducción de datos semejantes obtenidos en las experimentaciones, sugiere que los datos son consistentes. En este sentido, promediar las velocidades durante el tiempo de contacto, ayuda a minimizar el impacto de estos errores en el análisis (ver Figura 4).

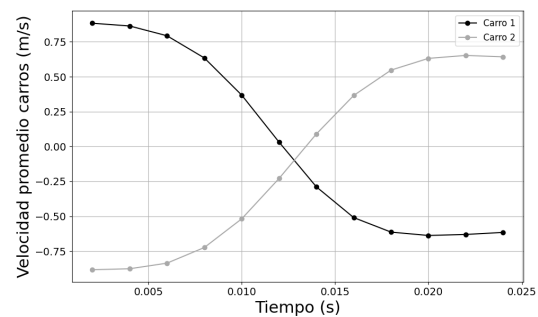


Figura 4. Velocidades promedio de los carros durante el tiempo de contacto en la colisión

3.1. Cinemática del carro 1

La Figura 5 representa la variación de la velocidad en el tiempo de contacto en la colisión. La función matemática que se ajusta al comportamiento de esta variación, es polinómica de grado 5, $v(t) = -5E9t^5 + 3E8t^4 - 5E6t^3 + 28990t^2 - 66,985t + 0.9339$.

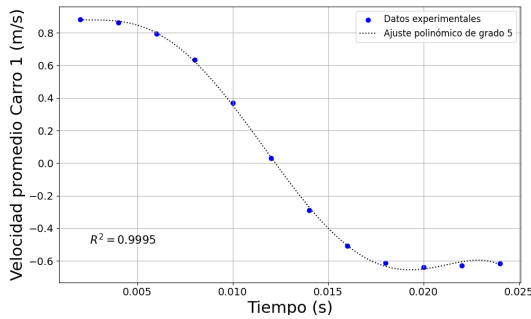


Figura 5. Variación de velocidad en función del tiempo del carro 1, durante el tiempo de contacto en la colisión

Para el ajuste de curva se obtiene un coeficiente de determinación $R^2 = 0,9995$. Un valor de coeficiente cerca de la unidad indica un ajuste fuerte del modelo a los datos. Prácticamente, el 99,95 % de la variabilidad en los datos se presenta mediante la relación en la función polinómica.

En $t = 0,002[s]$, la velocidad inicial del carro es $0,88[m/s]$. Desde $t = 0,002[s]$ hasta $t = 0,012[s]$, la velocidad disminuye, pasando de $0,88[m/s]$ a $0,03[m/s]$. A partir de $0,012$ segundos, la velocidad varía de positiva a negativa, indicando un cambio de sentido del movimiento. Después del cambio de sentido, la velocidad aumenta en magnitud, llegando a $-0,64[m/s]$ en $t = 0,020[s]$. A partir de los $0,020$ segundos, la velocidad tiende a estabilizarse alrededor de $-0,64[m/s]$.

3.2. Cinemática del carro 2

La función matemática que se ajusta al comportamiento de la variación de la velocidad del carro 2 (ver Figura 6), también es polinómica de quinto grado, $v(t) = 4E9t^5 - 3E8t^4 + 6E6t^3 - 43570t^2 + 135,4t - 1,023$.

El coeficiente de determinación R^2 , para el ajuste de curva es de $0,9999$. El valor de R^2 indica un ajuste fuerte del modelo a los datos. Prácticamente, el 99,99 % de la variabilidad en los datos de la variable dependiente se explica mediante la relación en la función polinómica.

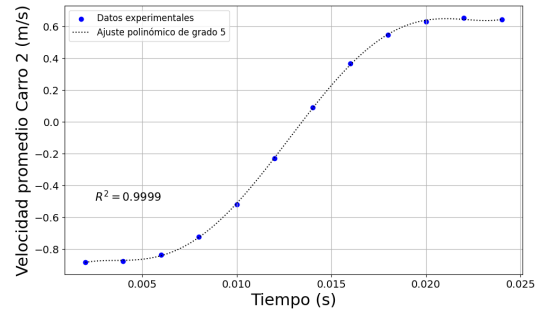


Figura 6. Variación de velocidad en función del tiempo del carro 2, durante el tiempo de contacto en la colisión

En $t = 0,002 [s]$, la velocidad inicial del carro es $-0,87 [m/s]$. El signo negativo indica que el carro se está moviendo en el sentido opuesto al elegido. La velocidad disminuye desde $-0,87 [m/s]$ hasta $-0,22 [m/s]$ en $0,012$ segundos. Luego, la velocidad cambia de sentido y comienza a aumentar. En $0,014$ segundos, la velocidad es $0,09 [m/s]$, indicando que el carro ha cambiado de sentido y ahora se está moviendo en el sentido opuesto. Después del cambio de sentido, la velocidad aumenta de manera constante hasta $0,63 [m/s]$ en $0,024$ segundos.

3.3. Coeficiente de restitución

Para el análisis del coeficiente de restitución se considera la ley cinemática de impacto de Newton (ϵ_n) a través de la ecuación (4), [14].

$$\epsilon_N = \frac{v^+}{u^-}, \quad 0 \leq \epsilon_N \leq 1 \quad (4)$$

Donde el coeficiente de restitución es el cociente entre las velocidades relativas de la colisión en el instante del contacto y separación como manifiesta la literatura [15], (ver Figura 7).

En consecuencia, la magnitud de la velocidad promedio al finalizar el contacto ($v_1 = 0,64$) del carro 2, disminuyó en 29,55 % en comparación a la magnitud de la velocidad promedio al contacto ($u_1 = -0,88$).

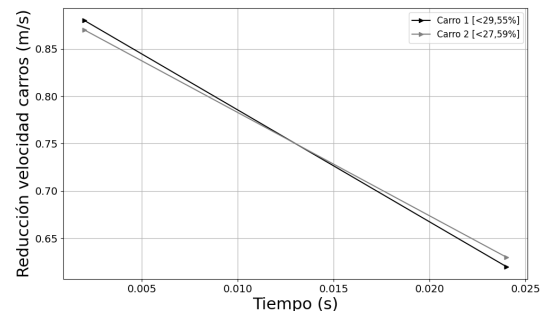


Figura 7. Variación de magnitud de las velocidades, durante el tiempo de contacto en la colisión

La magnitud de la velocidad promedio al finalizar el contacto ($v_2 = -0,61$) del carro 1, disminuyó en

27,59 % en comparación a la magnitud de la velocidad promedio al iniciar el contacto ($u_2 = 0,88$), en estas condiciones el coeficiente de restitución de la experimentación calculado a través de la ecuación (4), resulta ser $\epsilon_N = 0,712$.

Un coeficiente de restitución menor a 1 y superior a 0, revela que la colisión es parcialmente elástica, lo que significa que parte de la energía cinética se pierde durante la colisión en forma de calor, sonido, deformación u otras manifestaciones de energía no cinética.

3.4. Fuerzas impulsivas

La variación de las velocidades en una impulsión se produce en un intervalo muy breve (Δt), asociado a una fuerza de tipo impulsivo de valor máximo elevado [16]. En la teoría de impulsiones se adopta la hipótesis de que la duración del intervalo de impulsión es breve, pudiendo considerarse el fenómeno como prácticamente instantáneo. En física, el impulso o impulsión se define como la variación de la cantidad de movimiento de un objeto y está relacionada con la fuerza (F) y el diferencial del tiempo (dt) durante el cual actúa esa fuerza [16]. Ver ecuación (5).

$$I = \int_{t_1}^{t_2} F dt \quad (5)$$

Las fuerzas impulsivas son las responsables de cambiar las velocidades de los carros en la colisión.

La experimentación permite calcular las fuerzas impulsivas en el tiempo de contacto, mediante la segunda ley de Newton, y no asumir la hipótesis de que el fenómeno es instantáneo. En la Figura 8 se observan las fuerzas impulsivas en acción, en el instante de contacto 0,022 segundos. Estos fenómenos físicos pueden ser modelados mediante funciones polinómicas que permiten describir el comportamiento del sistema con precisión y predecir su evolución durante el tiempo de contacto.

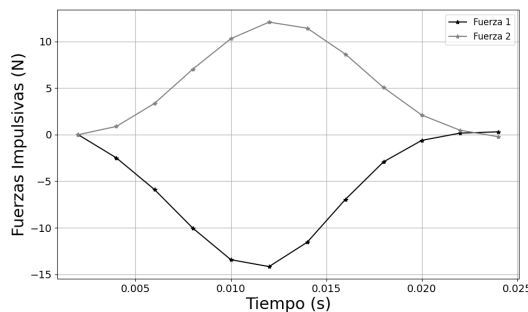


Figura 8. Fuerzas impulsivas durante el tiempo de contacto en la colisión

Las fuerzas impulsivas, que actúan sobre los carros 1 y 2, muestran comportamientos diferentes a lo largo del tiempo, la fuerza 1 y la fuerza 2 son contrarias, la

variación de la magnitud de la fuerza 1 es mayor en comparación con la fuerza 2.

Los ajustes de curva para las fuerzas impulsivas de los carros 1 y 2 se realizaron bajo el criterio del valor del coeficiente de determinación R^2 , cercano a 1 tiene un mejor ajuste.

El ajuste de curva para la fuerza impulsiva 1 (Figura 9) y la fuerza impulsiva 2 (Figura 10), se obtienen a través de la función polinómica de grado 5:

$$\begin{aligned} F_1(t) &= 9E10x^5 - 7E9x^4 + 2e8x^3 \\ &\quad - 2e6x^2 + 7179,7x - 7,8949 \\ R^2 &= 0,9901 \\ F_2(t) &= -3e11x^5 + 3e10x^4 - 1e8x^3 \\ &\quad + 1e6x^2 + 5414,2x + 6,4383 \\ R^2 &= 0,9944 \end{aligned} \quad (6)$$

En la Figura 9 se observa que la fuerza de impacto del carro 1 alcanzó el máximo valor $F_{I1} = -14,171$ [N] en un tiempo relativamente corto $t_{I1} = 0,012$ [s], lo que indica una transferencia rápida de energía entre los objetos en colisión.

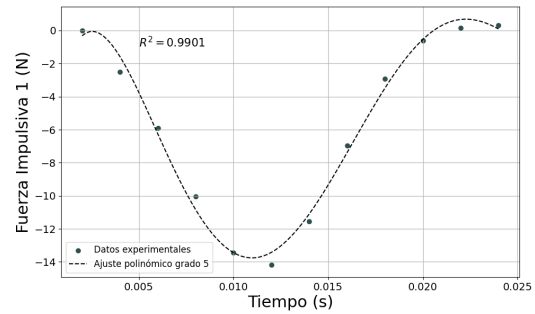


Figura 9. Ajuste de curva de la fuerza impulsiva 1 durante el tiempo de contacto en la colisión

En la Figura 10 se observa que la fuerza de impacto del carro 2 alcanzó el máximo valor $F_{I2} = 12,097$ [N] en un tiempo relativamente corto $t_{I2} = 0,012$ [s].

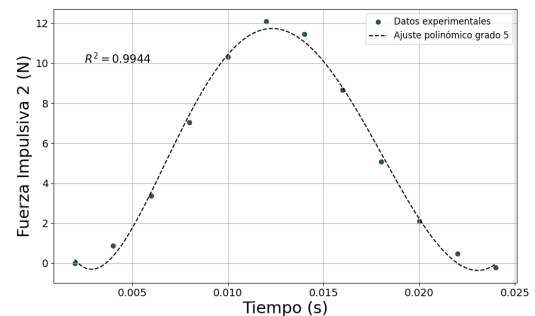


Figura 10. Ajuste de curva de la fuerza impulsiva 2 durante el tiempo de contacto en la colisión

El tiempo promedio en el que las fuerzas impulsivas alcanzan su valor máximo es de 0,012 segundos.

En un escenario real de impacto, este tiempo resulta concluyente, ya que la magnitud máxima de la fuerza estaría presente durante ese intervalo. En consecuencia, al considerar un entorno real, establecer un tiempo de reacción para un airbag menor a los 0,012 segundos se convertiría en un aspecto fundamental de la seguridad a tener en cuenta. La implementación de un tiempo de reacción pertinente en los sistemas de airbags permitiría mitigar los efectos de las fuerzas de impacto y, así, reducir el riesgo de lesiones para los ocupantes de un vehículo.

4. Conclusiones

El conocimiento de la variación de la velocidad, de las fuerzas impulsivas y del tiempo de contacto en una colisión, es esencial para la optimización de sistemas de retención, como cinturones de seguridad y sistemas de activación de airbags. Esto ayuda a garantizar que estos sistemas proporcionen la máxima protección durante una colisión en el instante adecuado, tal como lo dicen Guazhambo y Larrea [5].

Los modelos teóricos pueden sugerir colisiones perfectamente elásticas con un coeficiente de restitución de 1, en la práctica, siempre hay factores del mundo real que afectan a las colisiones y contribuyen a deformaciones imperceptibles, fricción y pérdida de energía. Estos factores hacen que sea difícil, e incluso imposible, alcanzar un coeficiente de restitución de 1 en experimentos de laboratorio. La búsqueda de modelos más realistas y la comprensión de las fuentes de pérdida de energía son esenciales para interpretar y aplicar los resultados experimentales.

A través de esta investigación se ha llegado a modelar las funciones de velocidad-tiempo y fuerza-tiempo como funciones polinómicas de grado 5, que representan la variación de velocidades y fuerzas en 25 milisegundos, indicando un comportamiento no lineal, crecimiento y decaimiento acelerado. Comprender la cinemática de la colisión a esta escala, incluyendo la velocidad relativa, la fuerza de impacto y la duración del contacto, puede ayudar a detectar cuándo ocurre una colisión y cuándo se presenta el valor pico de las fuerzas impulsivas y cuándo deben activar los sistemas de seguridad pasivos.

Al analizar y comprender procesos de interacciones dinámicas se estaría explorando conceptos de nanotecnología, donde los procesos físicos y químicos suceden a escalas infinitesimales. Por tal razón, para trabajos futuros se debería analizar la posibilidad de utilizar modelos matemáticos en la simulación y análisis de procesos físicos a nanoescala con el objetivo de anticipar el comportamiento de la velocidad y fuerza en periodos temporales más extensos y comparar los resultados con datos experimentales. También sería importante explorar, a qué variables representan cada

uno de los coeficientes de las funciones de velocidad y fuerza.

En el ámbito educativo, el análisis experimental de la cinemática en la colisión elástica entre dos cuerpos durante el tiempo de contacto, capacita a los estudiantes para aplicar conceptos teóricos de una manera práctica, lo que mejora su comprensión y valoración por la física.

Referencias

- [1] C. E. Donoso-León, M. M. Paredes-Godoy, M. M. Gallardo-Donoso, and A. F. Samaniego-Campoverde, "El laboratorio virtual en el aprendizaje procedimental de la asignatura de física," *Polo del Conocimiento*, vol. 6, no. 6, pp. 167–181, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.23857/pc.v6i6.2748>
- [2] P. M. Parra, *Uso de los Smartphones en los laboratorios de prácticas de física*. Universidad de Valladolid. España, 2017. [Online]. Available: <https://rb.gy/34xzk0>
- [3] P. Morcelle del Valle, *Transductores - instrumentación*. Universidad Nacional de la Plata, 2018. [Online]. Available: <https://rb.gy/iz42rz>
- [4] J. A. Osorio Cortéz, H. B. Cano Garzón, and J. A. Chaves Osorio, "Fundamentos y aplicación del muestreo en señales ubicadas en las bandas altas del espectro," *Scientia Et Technica*, 2008. [Online]. Available: <http://rb.gy/ctv6el>
- [5] B. I. Guazhambo Loja and D. J. Larrea Vásconez, *Base de datos del funcionamiento del airbag en los vehículos que realizan la RTV en la ciudad de Cuenca, determinando el cumplimiento de la RTE INEN 034*. Universidad Politécnica Salesiana, 2022. [Online]. Available: <http://rb.gy/qmnc4f>
- [6] A. González Mateo, *Sensores en los sistemas de seguridad del automóvil*. Universidad de Valladolid, 2019. [Online]. Available: <http://rb.gy/du99uh>
- [7] D. A. Jerez Mayorga, L. X. Orbea Hinojosa, E. P. Gualotuña Quishpe, J. A. Toapaxi Csanoba, and J. A. y Rodríguez Rodríguez, "Diseño de un protocolo de pruebas del sistema airbag mediante la interpretación de oscilogramas de operación," *INNOVA*, vol. 2, no. 9, pp. 135–146, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.33890/innova.v2.n9.2017.482>
- [8] E. I. Ayala Yunga and L. E. Tacuri Tacuri, *Análisis de la implementación de un sistema de airbag en autobuses en la seguridad del conductor durante un impacto frontal*. Universidad

- Politécnica Salesiana, 2021. [Online]. Available: <http://rb.gy/ui4ppl>
- [9] A. Cantero Díaz, M. M. Goire Castilla, and Y. Quintana Cassulo, "Sistema para la gestión y análisis de datos de una red de sensores inalámbricos basado en un almacén de datos." *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, 2019. [Online]. Available: <https://is.gd/C094kY>
- [10] R. Hibbeler, *Dinámica. Mecánica Vectorial Para Ingenieros*. Pearson Education, 2004. [Online]. Available: <https://n9.cl/olitx>
- [11] J. González-Laprea and A. Santiago, "Sistema automatizado para medición del coeficiente de fricción estática. un dispositivo para actividades de docencia," *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 43, p. e20210056, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2021-0056>
- [12] R. A. Serway and J. W. Jewett, *FÍSICA para ciencias e ingeniería*. CENGAGE Learning, 2005. [Online]. Available: <https://is.gd/LGiUOw>
- [13] M. Semeria, *Los tres teoremas: Fourier - Nyquist - Shannon*. ECONSTOR, 2015. [Online]. Available: <https://is.gd/t8NENe>
- [14] O. A. Rivera Ocampo, *Prototipo para el análisis dinámico del sistema leva-péndulo con impactos*. Universidad Nacional de Colombia, 2015. [Online]. Available: <https://is.gd/5aOwIx>
- [15] O. D. Pavioni and F. M. Ortega, "Obteniendo los coeficientes de restitución y arrastre en un solo experimento," *Revista Mexicana de Física E*, 2015.
- [16] J. M. Goicolea Ruigómez, *Curso de mecánica, vol. I y II*. Universidad Politécnica de Madrid, 2010. [Online]. Available: <https://is.gd/fzo4OI>



LOCALIZACIÓN DE ROBOTS BASADA EN RED NEURAL UTILIZANDO CARACTERÍSTICAS VISUALES

NEURAL NETWORK-BASED ROBOT LOCALIZATION USING VISUAL FEATURES

Felipe Trujillo-Romero¹ 

Recibido: 16-11-2023, Recibido tras revisión: 29-05-2024, Aceptado: 12-06-2024, Publicado: 01-07-2024

Resumen

Este artículo presenta el desarrollo de un módulo que puede desarrollar un algoritmo de construcción de mapas mediante odometría inercial y características visuales. Utiliza un módulo de reconocimiento de objetos basado en características locales y redes neuronales artificiales no supervisadas para conocer elementos no dinámicos en una habitación y asignarles una posición. El mapa está representado por una red neuronal donde cada neurona corresponde a una posición absoluta en la habitación. Una vez construido el mapa, basta con capturar un par de imágenes del entorno para estimar la ubicación del robot. Los experimentos se realizaron mediante simulación y utilizando un robot real. Se utilizó el entorno Webots con el robot humanoide virtual NAO para realizar las simulaciones. Al mismo tiempo, se obtuvieron resultados utilizando un robot NAO real en un escenario con diversos objetos. Los resultados muestran una buena precisión en la localización dentro de los mapas bidimensionales de $\pm(0,06, 0,1)$ m en simulación en contraste con el entorno natural; el mejor valor obtenido fue $\pm(0,25, 0,16)$ m.

Palabras clave: características visuales, mapas bidimensionales, odometría inercial, robot humanoide NAO, descriptor A-KAZE, estructura de crecimiento celular

Abstract

This paper outlines the development of a module capable of constructing a map-building algorithm using inertial odometry and visual features. It incorporates an object recognition module that leverages local features and unsupervised artificial neural networks to identify non-dynamic elements in a room and assign them positions. The map is modeled using a neural network, where each neuron corresponds to an absolute position in the room. Once the map is constructed, capturing just a couple of images of the environment is sufficient to estimate the robot's location. The experiments were conducted using both simulation and a real robot. The Webots environment with the virtual humanoid robot NAO was used for the simulations. Concurrently, results were obtained using a real NAO robot in a setting with various objects. The results demonstrate notable precision in localization within the two-dimensional maps, achieving an accuracy of $\pm (0.06, 0.1)$ m in simulations contrasted with the natural environment, where the best value achieved was $\pm (0.25, 0.16)$ m.

Keywords: Visual Features, Bidimensional Maps, Inertial Odometry, Humanoid Robot NAO, A-KAZE descriptor, Growing Cell Structure

^{1,*}Departamento de Ingeniería Electrónica, DICIS, Universidad de Guanajuato, México.
 Autor para correspondencia ✉: fdj.trujillo@ugto.mx.

Forma sugerida de citación: Trujillo-Romero, F. "Localización de robots basada en red neural utilizando características visuales," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 32, pp. 77-89, 2024. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n32.2024.08>.

1. Introducción

Según la Federación Internacional de Robótica (IFR) [1], un robot de servicio es un sistema robótico que opera total o parcialmente de forma autónoma para realizar servicios valiosos para el bienestar de los humanos y el equipo, excluyendo las operaciones de manufactura. Los robots de servicio están diseñados específicamente para entornos humanos, como hogares, hospitales y restaurantes, lo que les exige tomar decisiones complejas. Esto incluye identificar, detectar, reconocer y manipular diversos objetos dentro de su entorno.

Para que un robot de servicio opere de manera autónoma, debe estar equipado con un sistema de control que le permita interactuar con su entorno para tomar las decisiones correctas y lograr objetivos específicos. Un componente crítico de este sistema de control para los robots de servicio implica aprender sobre el entorno en el que operarán. Inicialmente, el robot debe familiarizarse con la ubicación y los elementos no dinámicos con los que interactuará. Por ejemplo, en algunas competiciones, se da a los participantes un período para familiarizarse con las interacciones del escenario y realizar las calibraciones necesarias para completar las tareas.

La capacidad de ver mejora su interacción con las personas y el entorno; por ejemplo, se utilizan sensores de visión para la localización y el mapeo [2]. Se desarrolla un sistema de estereovisión para detectar objetivos a partir del mapa de profundidad generado [3]. Además, Scona et al. [4] utilizaron un sensor de estereovisión para explorar desafíos como el desenfoco por movimiento, la falta de características visuales, los cambios de iluminación y el movimiento rápido.

En la localización ambiental por robots móviles, se implementó un sistema de visión para desarrollar algoritmos de localización y mapeo simultáneos (SLAM) [5]. En [6] se desarrolló una aplicación para mapeo topológico y navegación utilizando SLAM visual. Ovalle-Magallanes et al. [7] utilizaron información visual para crear un sistema de localización basado en la apariencia para un robot humanoide. Lasgunes et al. [8] implementaron un sistema de localización apoyado en ICP, utilizando información visual en el robot humanoide TALOS. Por el contrario, Wozniak et al. [9] propusieron un algoritmo para el reconocimiento visual de lugares utilizando imágenes adquiridas por un robot humanoide, con una red neuronal como reconocedor. También se desarrolló un SLAM elipsoidal basado en visión de hitos aumentados en un robot humanoide NAO para escenarios interiores [10]. Además, se implementó un método para SLAM eficiente utilizando un sensor de visión monocular con vista frontal [11].

Además de las cámaras RGB, se emplean otros sensores; en [12], se utilizó un sensor IMU para localizar un robot humanoide en el entorno. En [13] se implementó una combinación de LiDAR 2D y odometría

para permitir que un robot navegue y se localice. Wen et al. [14] presentaron un EKF-SLAM, utilizando sensores de cámara y láser para la localización y el mapeo en interiores. Un SLAM, basado en visión, permite a un robot móvil navegar en entornos desconocidos [15]. En [16] se propone un sistema SLAM para estimar las poses del robot y construir un mapa tridimensional del entorno. Además, se combinó el seguimiento basado en características de un sensor de visión estereoscópica para obtener un SLAM híbrido [17].

Mientras tanto, Cheng et al. [18] utilizaron puntos característicos para desarrollar un método que integra el flujo óptico con ORB-SLAM para diferenciar entre elementos dinámicos y estáticos. Ganesan et al. [19] propusieron un método para reducir el espacio de búsqueda para el algoritmo RRT* en tareas de planificación de rutas. La coincidencia de características para algoritmos de construcción de mapas se exploró utilizando la distancia de una nube de puntos obtenida de un sensor de alcance [20]. Se construye un mapa del entorno utilizando una fusión de sensores de odometría, láser 2D y RGB-D [21]. Una propuesta donde el entorno se representa mediante polígonos 3D que permiten a un robot localizarse se presenta en [22]. En contraste, se propuso un sistema de navegación topológica basado en representación simbólica en [23] para un robot humanoide.

Todos los trabajos mencionados anteriormente emplean técnicas para mejorar la localización, el mapeo o la búsqueda de objetos dentro de un entorno humano, llevadas a cabo por un robot móvil. Por esta razón, se utiliza el robot humanoide NAO [24] como plataforma para implementar la localización y el mapeo en este estudio.

En la sección 2 se describe los diversos métodos y materiales utilizados en este estudio. Posteriormente, en la sección 2.5 se presenta la implementación del sistema propuesto. Los resultados obtenidos con ambas plataformas se detallan en la sección 3. Finalmente, la sección 4 se discute las conclusiones y las direcciones para futuras investigaciones.

2. Materiales y métodos

2.1. Robot NAO

El robot NAO, como se muestra en la Figura 1(a), es la plataforma robótica principal elegida para implementar el sistema desarrollado. NAO, un robot autónomo y programable de altura media [24], es ampliamente reconocido como uno de los robots más sofisticados y completos del mercado. A lo largo de los años, se han introducido cinco versiones, cada una incorporando mejoras específicas, mientras que el concepto fundamental permanece inalterado.

La Figura 1(b) presenta un esquema del robot, indicando sus dimensiones, incluyendo altura, ancho y

longitud de los brazos. El robot NAO está equipado con el software integrado NAOqi, que le proporciona autonomía. NAOqi está integrado en el sistema operativo del robot, OpenNAO, una distribución GNU/Linux embebida basada en Gentoo. Este sistema incluye numerosas bibliotecas y programas esenciales para NAOqi. Una característica notable es la capacidad de ejecutar copias de NAOqi en una computadora, lo que facilita el uso de robots virtuales.

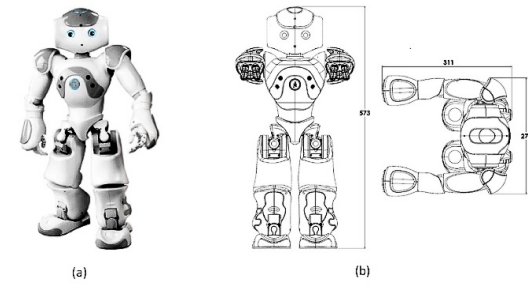


Figura 1. NAO (a) Robot, y (b) dimensiones en mm [25]

2.2. A-KAZE descriptor

El método A-KAZE [26], representado en la Figura 2, se divide en tres tareas principales: (1) construcción de un espacio de escala no lineal, (2) detección de características y (3) descripción de características. La construcción del espacio de escala no lineal implica procesar una imagen de entrada utilizando el método numérico de difusión rápida explícita (FED) [25], aplicado con un enfoque piramidal.

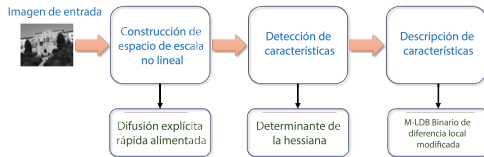


Figura 2. Descripción general del algoritmo A-KAZE

Inicialmente, el espacio de escala se discretiza en una serie de O octavas y S subniveles, identificados por índices discretos (o y s , respectivamente). Posteriormente, se mapean a su escala correspondiente, σ , utilizando la ecuación (1).

$$\sigma(o, s) = 2^{\frac{o+s}{s}} \quad (1)$$

La imagen de entrada se convoluciona con una desviación estándar gaussiana σ_0 para reducir el ruido y los posibles artefactos, considerando tanto la imagen de entrada como un factor de contraste λ , que es calculado automáticamente por el algoritmo. Posteriormente, se detectan características 2D de interés que exhiben un determinante de escala normalizada de la respuesta hessiana a través del espacio de escala

no lineal para cada imagen filtrada. La normalización se realiza utilizando un factor que tiene en cuenta la escala de cada imagen en el espacio de escala no lineal, como se ilustra en la ecuación (2).

$$L_{Hessiana}^i = \sigma_{i,norm}^2 (L_{xx}^i L_{yy}^i - L_{xy}^i L_{yx}^i) \quad (2)$$

El filtro concatenado de Scharr [27] calcula derivadas de segundo orden para aproximar la invariancia rotacional. Inicialmente, se obtiene la respuesta máxima del detector en una ubicación espacial específica para estimar la posición 2D del punto clave. Esto se logra ajustando una función cuadrática a la respuesta máxima del determinante de Hessian dentro de un vecindario de 3×3 .

Finalmente, la orientación principal del punto clave se calcula utilizando el descriptor modificado-binario de diferencia local (M-LDB) [28]. Este método utiliza información sobre gradientes e intensidad del espacio de escala no lineal para generar un vector descriptor de longitud 64.

En el caso del descriptor utilizado, su principal ventaja es su rendimiento superior en la obtención de información visual al implementar el sistema de mapeo, debido a su invariancia a los cambios de escala y rotación. Además, opera más rápido que otros descriptores y el autor del algoritmo proporciona el código. Entre las desventajas, es necesario mencionar que se requiere una afinación precisa del umbral utilizado para identificar los puntos característicos, junto con el ajuste del número de niveles y subniveles dentro del espacio de escala no lineal.

2.3. Estructura de células en crecimiento

Las estructuras de células en crecimiento (GCS) [29] están disponibles en variantes supervisadas y no supervisadas. La variante de interés en este contexto es el modelo no supervisado, que ofrece la ventaja significativa de determinar automáticamente una estructura y tamaño de red adecuados. Esta capacidad se facilita mediante un crecimiento controlado, que incluye la eliminación periódica de unidades. Este modelo se basa en el trabajo de Kohonen [30] sobre mapas autoorganizativos. El pseudocódigo para GCS se presenta en el algoritmo 1 (Figura 3).

El algoritmo de estructura de células en crecimiento (GCS) ofrece varias ventajas clave. Puede ajustar autónomamente el número de neuronas, añadiéndolas o eliminándolas según sea necesario. Funciona como una red no supervisada, lo que le permite formar asociaciones de vectores de entrada de manera independiente de la entrada externa. Su simplicidad de implementación es también una característica destacable. Sin embargo, una desventaja notable es que la red puede fallar si los vectores a asociar están muy cerca unos de otros.

Algorithm 1: Growing Cell Structure [30].

Data: e_b Best matching, ϵ_n neighboring and λ steps
1 Start: k-dimensional simplex $V = R^b$
2 while ($\neq$ desired network size) do
3 for adaptationsteps = 0 $\rightarrow$ λ do
4 Choose an input signal ξ according to $P(\xi)$
5 Locate the best matching unit $s = \phi_w(\xi)$.
6 Increase matching:
7 $\Delta w_s = \epsilon_b(\xi - w_s)$
8 $\Delta w_c = \epsilon_n(\xi - w_c)(\forall c \in N_s)$
9 Increment the signal counter of s:
10 $\Delta \tau_s = 1$
11 Decrease all signal counters by a fraction α in the network A:
12 $\Delta \tau_c = -\alpha \tau_c (\forall c \in A)$
13 Determine $q : h_q \geq h_c (\forall c \in A)$
14 Look q largest distance neighbor $f : \|w_f - w_q\| \geq \|w_c - w_q\| (\forall c \in N_q)$
15 Insert cell r between q and f .
16 Initialize $r : w_r = 0 : 5(w_q + w_f)$
17 Redistribute counter:

$$\Delta \tau_c = \frac{|F_c^{new}| - |F_c^{old}|}{|F_c^{old}|} \tau_c$$

18 Initialize new cell:

$$\tau_r = - \sum_{c \in N_r} \Delta \tau_c$$

19 After insertion, check $\hat{p}_i < \eta$

20 Cells remove:

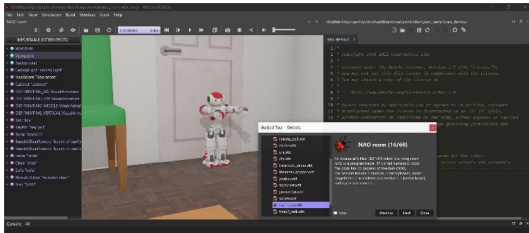
$$\hat{p} = \bar{p} - \sum_{c \in A} \hat{f}_c$$

Figura 3. Estructura celular en crecimiento [30]

2.4. Simulador robótico WEBOTS

Webots [31] es una aplicación de escritorio de código abierto y multiplataforma para la simulación de robots. Por esta razón, se utilizará Webots para simular el sistema y facilitar su respectiva validación.

Este simulador de software permite probar aplicaciones y algoritmos para el robot NAO dentro de un entorno virtual. La Figura 4 ilustra el entorno del software, un mundo virtual que simula los movimientos de NAO mientras se adhiere a las leyes físicas. Este entorno ofrece un entorno seguro para probar comportamientos antes de que se implementen en un robot real.

**Figura 4.** Entorno de Webots [32]

2.5. Construcción de mapas bidimensionales

Como se mencionó en la Introducción, la autonomía se logra a través de un sistema de planificación y control

de actividades, diseñado para asegurar el cumplimiento de sus objetivos. Una característica clave de estos sistemas es la navegación espacial, que permite el cálculo de la pose del robot (posición y orientación) basada en mediciones incrementales, inerciales y visuales. Esta sección presenta los conceptos de odometría y características visuales empleados en el módulo de navegación espacial. Estas herramientas permiten al robot construir un mapa bidimensional y localizarse mientras navega.

2.5.1. Odometría

La odometría facilita la estimación de la posición relativa de un robot móvil dentro de un entorno durante la navegación, partiendo de su ubicación inicial. Además, registra y rastrea el movimiento del robot dentro de un espacio para construir un mapa bidimensional. El robot NAO tiene funciones que abordan varios desafíos, incluida la odometría. El algoritmo 2 (ver Figura 5) muestra el pseudocódigo donde se utilizan funciones de la odometría inercial de Aldebaran [24].

Algorithm 2: Pseudo code to store inertial odometry using Aldebaran functions [25].

```

1 //Store the initial position
2 AL::Math::Pose2D worldToRobotInit= Pose2D(getRobotPosition())
3 //Wait until it finishes scrolling
4 //Storing the final position
5 AL::Math::Pose2D worldToRobotAfter= Pose2D(getRobotPosition())
6 Pose2D robotMove = pose2DInverse(worldToRobotInit)+worldToRobotAfter //Movement
7 theta = modulo2PI(robotMove.theta)//Angle

```

Figura 5. Pseudocódigo para almacenar odometría inercial utilizando funciones de Aldebaran [26]

En esta implementación, la posición bidimensional del robot se inicializa con valores explícitos obtenidos de los valores de pose inicializados, que se recuperan de los encoders rotatorios magnéticos (MRE) de las articulaciones. Cada vez que el robot se activa, registra una posición absoluta dentro del mundo del escenario.

Al construir el mapa bidimensional, el robot primero guarda su posición inicial. Luego, se le instruye para que siga una trayectoria de circuito cerrado predeterminada dentro de la habitación, avanzando una distancia especificada mientras camina. A medida que se mueve, la posición bidimensional del robot se registra periódicamente. Posteriormente, se calculan el desplazamiento y el ángulo recorridos por el robot. La posición bidimensional entre puntos consecutivos se calcula entonces para reflejar con precisión el movimiento del robot.

Así, la implementación general de la odometría puede establecerse de la siguiente manera:

1. Capturar la posición del robot relativa al entorno antes de caminar.
2. Detectar cuando el robot comienza a caminar.
3. Simultáneamente, comenzar a recopilar datos odométricos

4. Procesar y acumular los datos odométricos.
5. Detectar la finalización del recorrido del robot.
Si el recorrido no está completado, repetir los pasos 3 y 4.
6. Calcular la distancia recorrida por el robot.
7. Almacenar los datos de distancia y posición del robot para construir el mapa bidimensional.

La Figura 6 presenta el diagrama de flujo general para generar el mapa bidimensional. En este diagrama, el algoritmo comienza con la captura de una imagen. Posteriormente, se extraen características visuales de esta imagen; estas características sirven como entradas para el sistema de aprendizaje, es decir, la red neuronal. A continuación, el robot aprende y registra la localización espacial correspondiente a su posición. Si el recorrido designado se completa, el algoritmo concluye. Si no, el robot se mueve a la siguiente posición y el algoritmo continúa hasta que se alcance el final del recorrido.

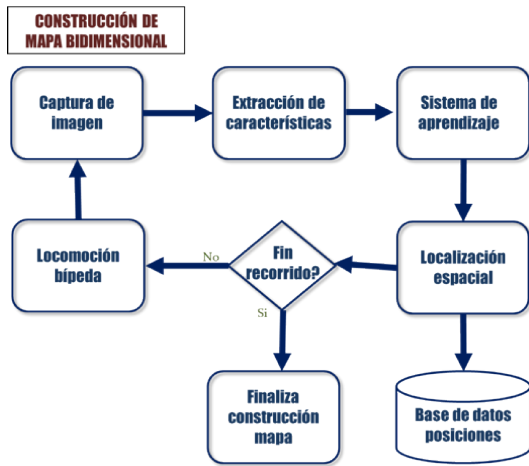


Figura 6. Diagrama de flujo de datos para la reconstrucción del mapa

2.6. Características visuales

Los elementos visuales se identifican analizando y catalogando los detalles existentes en el entorno, considerando la posición del robot cuando se captura la imagen. Generalmente, se considera que los elementos visuales más significativos para representar el entorno son aquellos ubicados en o cerca de las paredes. Un mapa bidimensional de la habitación recorrida por el robot puede construirse utilizando estos elementos visuales y la ubicación estimada derivada de la odometría. Por ejemplo, la Figura 7 ilustra una habitación virtual con varios objetos cotidianos típicamente encontrados en un hogar. Estos objetos suelen permanecer estacionarios. Por lo tanto, el robot debe navegar por esta

habitación siguiendo un circuito cerrado, preferiblemente cuadrangular, capturar imágenes y registrar la posición estimada desde donde se tomó cada imagen.



Figura 7. Habitación virtual en Webots

Además, el robot debe centrarse en capturar imágenes de la pared más cercana a su recorrido. La Figura 8 ilustra tres capturas realizadas por el robot en diferentes puntos. Durante la navegación, tomará una captura de pantalla en cada paso basado en el número de imágenes especificadas por el usuario para la habitación. Por ejemplo, si se requieren veinte imágenes en una habitación donde cada pared mide 4 metros de largo, se tomará una imagen cada 20 cm. Además del número de capturas y las dimensiones de las paredes de la habitación, también se puede determinar la frecuencia del recorrido. Cuantos más circuitos se completen, más detallada será la construcción del mapa de la habitación y más fácil será localizar al robot.

Una vez completados los circuitos, el robot utiliza la información almacenada para construir el mapa bidimensional. Las imágenes capturadas contendrán objetos de los cuales se deben extraer detalles específicos. El módulo de reconocimiento de objetos [32] procesa las imágenes para obtener descriptores, que luego se aprenden y se vinculan a la pose del robot durante la captura. Esta información se integra en una representación bidimensional, formando el mapa de la habitación. Antes de iniciar cualquier recorrido por la habitación, el robot debe identificar la pared más cercana para determinar dónde enfocará sus capturas de imagen, simplemente girando su cabeza hacia la pared visible. Esta detección de paredes se logra estimando visualmente las distancias. Antes de la navegación, el robot debe estar posicionado en paralelo a la pared seleccionada y colocado en una esquina de la habitación. Luego captura una imagen, que se analiza posteriormente dividiéndola en dos partes.

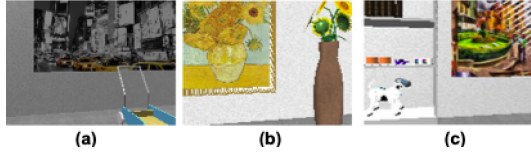


Figura 8. Imágenes adquiridas por el robot NAO en una habitación simulada

Por ejemplo, la Figura 9 muestra tres capturas diferentes de una habitación tomadas desde varias posiciones del robot. En la imagen 9(a), la pared más cercana está a la izquierda, mientras que en las imágenes 9(b) y 9(c), está a la derecha. Para cada imagen, se identifican puntos de interés en cada lado, utilizando el algoritmo A-KAZE [26]. La imagen con más puntos salientes indica la ubicación de la pared más cercana, asumiendo que la habitación está libre de obstáculos.

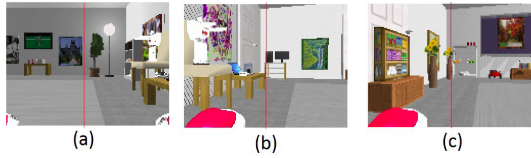


Figura 9. Imágenes tomadas por el robot NAO anteriormente

La Figura 10 muestra los resultados de la evaluación para cada imagen, con los puntos salientes indicados por pequeños círculos de colores. En la imagen 10(a), el lado derecho contiene la mayoría de los puntos salientes, con 108 en comparación con 36 en el lado izquierdo; en la 10(b), predomina el lado izquierdo con 128 puntos frente a 50 en el derecho; y en la 10(c), nuevamente el lado izquierdo lidera con 119 puntos comparados con 53 en el derecho. Basándose en estas observaciones, el robot luego gira hacia el lado con más puntos salientes para continuar su exploración de la habitación.

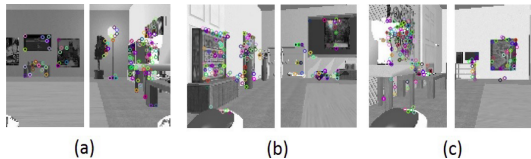


Figura 10. Detección de paredes utilizando descriptores

2.7. Algoritmo para la construcción del mapa

La construcción del mapa bidimensional procede de la siguiente manera: inicialmente, el robot realiza un circuito cerrado alrededor de una habitación cuadrada, capturando y registrando imágenes junto con sus respectivas poses. Es esencial conocer las dimensiones de las paredes, el tamaño del paso durante el movimiento y el número de iteraciones. El robot mejora su comprensión de la habitación con cada circuito adicional

completado. Al inicio del algoritmo 3 (Figura 11), el robot realiza una captura inicial para detectar la pared más cercana y determinar el ángulo para su siguiente giro.

Antes de comenzar su movimiento, el robot registra su posición actual mediante odometría como el punto de referencia global para la habitación. Posteriormente, se registra la distancia recorrida, indicando tanto la longitud del trayecto del robot como la distancia total que necesita navegar dentro de la habitación. Esta medida se monitorea continuamente durante un ciclo de trabajo, que persiste hasta que la distancia recorrida sea igual a la longitud combinada de las cuatro paredes de la habitación.

Algorithm 3: Navigation Module. Execution of a closed lap.

Data: d dimensions of the room, p step size of the robot when walking, n number of paths

Result: data images and poses

```

1 picture = TakePicture()
2 AngleYaw = DetectNearestWall(picture)
3 TurnHead(AngleYaw)
4  $O_t$  = CurrentPose()
5 TotalDistanceWalked = 0
6 for  $j = 1$  to  $n$  do
7   while TotalDistanceWalked  $\neq d \times 4$  do
8     DistanceWalked = 0
9     while DistanceWalked  $\neq d$  do
10      Walk( $p$ )
11      RP = CurrentPose()
12      picture = TakePicture()
13      data = ( $P, I$ )
14      DistanceWalked = DistanceWalked +  $p$ 
15    TurnBody(-AngleYaw)
16    TotalDistanceWalked = TotalDistanceWalked + DistanceWalked

```

Figura 11. Módulo de navegación. Ejecución de una vuelta cerrada

Después de completar el circuito y almacenar la base de datos de la habitación, se inicia el algoritmo 4 (Figura 12) para aprender de una nueva base de datos que incluye información de captura y pose. Se extraen todos los puntos de interés, se construyen histogramas y se entrena una red neuronal utilizando el método de Growing Cell Structures (GCS) [32].

Algorithm 4: Navigation Module. Construction of two-dimensional map

Data: I images, P poses.

Result: classes(N, P) classes of the two-dimensional map.

```

1 for  $i \leftarrow 1$  to  $I$  do
2   keypoints = AKAZE( $I(i)$ )
3    $H(i)$  = BuildHistos(keypoint)
4 ANN_trained = GCS( $H$ )
5 classes( $N$ ) = ANN_trained
6 for  $i \leftarrow 1$  to  $N$  do
7   NewPose( $i$ ) =  $\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n P(classes(i))$ 

```

Figura 12. Módulo de navegación. Construcción de mapa bidimensional

El algoritmo 5 (Figura 13) se utiliza para evaluar el mapa. Este módulo procesa las imágenes, extrayendo puntos salientes y construyendo histogramas. Estos histogramas se utilizan luego para evaluar la red neuronal entrenada. Este proceso ayuda a identificar las neuronas correspondientes. Una vez determinadas las clases, se recuperan las poses asociadas. Las posiciones

bidimensionales en el mapa se calculan luego y se devuelven.

El algoritmo opera dentro de ciertas restricciones, que incluyen conocer las dimensiones de la habitación para calcular la distancia total que el robot recorrerá alrededor de ella. Además, el entorno debe estar libre de obstáculos, ya que este trabajo no incorpora estrategias de evasión de los mismos.

Finalmente, si algún elemento dentro de la habitación ha sido movido, el robot debe reconstruir su mapa de navegación para reflejar estos cambios.

Algorithm 5: Navigation Module. *Using the two-dimensional map*

Data: I images
Result: $class(I)$ object classes, $Pose$ pose
1 keypoints = AKAZE(I)
2 $H(I)$ = BuildHistos(keypoint)
3 $classes(I)$ = ANN_trained
4 $Pose = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n NewPose(I)(classes(i))$

Figura 13. Módulo de navegación. Uso del mapa bidimensional

3. Resultados y discusión

Los experimentos descritos en esta sección se dividen en dos partes: (1) construcción de un mapa bidimensional y (2) localización dentro del mapa. Estos experimentos se han llevado a cabo utilizando tanto robots NAO virtuales como reales.

3.1. Entorno virtual

3.1.1. Construcción del mapa

La habitación simulada representada en la Figura 7, con dimensiones de 6×6 metros, fue creada utilizando Webots. Esta habitación estaba amueblada con varios objetos, como sillas, mesas y retratos. Se empleó un robot NAO virtual para construir el mapa bidimensional de la habitación. El robot inició su recorrido desde la esquina inferior izquierda de la habitación, navegando en un circuito cerrado cuadrangular. El robot giró la cabeza hacia las paredes durante todo su recorrido para capturar imágenes. Las paredes se numeraron del 1 al 4 en sentido antihorario para ilustrar los resultados de la construcción del mapa bidimensional.

El robot completó dos circuitos en sentido antihorario alrededor de la habitación, capturando imágenes y registrando sus relaciones espaciales. El número de imágenes tomadas por pared se detalla en la Tabla 1. El término ‘vuelta’ se refiere al número de circuitos que completa el robot. ‘Imágenes’ indica el número total de imágenes guardadas durante cada vuelta. ‘Pared 1’, ‘Pared 2’, ‘Pared 3’ y ‘Pared 4’ indican el número de imágenes almacenadas para cada pared. En total,

se registraron 164 imágenes y sus poses asociadas, las cuales se utilizaron para construir el mapa bidimensional.

Tabla 1. Principales parámetros de los experimentos: Construcción del mapa bidimensional

Vuelta	Imágenes	Pared 1	Pared 2	Pared 3	Pared 4
1	89	20	21	31	17
2	75	18	20	24	13

Los parámetros correspondientes al reconocimiento de objetos se detallan en la Tabla 2. Como se señala, se realizaron tres iteraciones de construcción de mapas bidimensionales utilizando 100, 200 y 300 neuronas, respectivamente. El objetivo fue evaluar la efectividad del módulo en construir un mapa que refleje con precisión las observaciones del robot dentro de la habitación.

Tabla 2. Parámetros del módulo de reconocimiento de objetos para la construcción del mapa bidimensional

Experimento	Entrenamiento	Neuronas	Época	Tiempo
1	164	100	100	4,063
2	164	200	200	14,287
3	164	300	300	33,347

Después del entrenamiento, se generaron mapas bidimensionales que contenían 72, 111 y 132 poses, respectivamente. Los puntos marcados en cada mapa en la Figura 14 representan una pose asociada con una neurona. Es evidente que a medida que aumenta el número de neuronas, la distribución de las poses se vuelve más refinada. Es importante destacar que las poses se homogeneizaron en las coordenadas y se mantuvieron constantes durante el recorrido para asegurar que se muestre una distribución precisa.

La distribución en el mapa construido con cien neuronas es subóptima, ya que incluye algunas poses en áreas donde el robot no ha viajado, junto con agrupamientos de poses en ciertas secciones. La distribución mejora significativamente en el mapa construido con doscientas neuronas, aunque aún se observa cierto apilamiento de poses. El mapa con trescientas neuronas muestra la mejor distribución, cubriendo más áreas de manera más completa. Aunque aún existen algunas poses erróneas, son mínimas.

Gracias al mapa bidimensional, el robot puede identificar las ubicaciones de las paredes, lo que le permite evitarlas mientras ejecuta sus tareas.

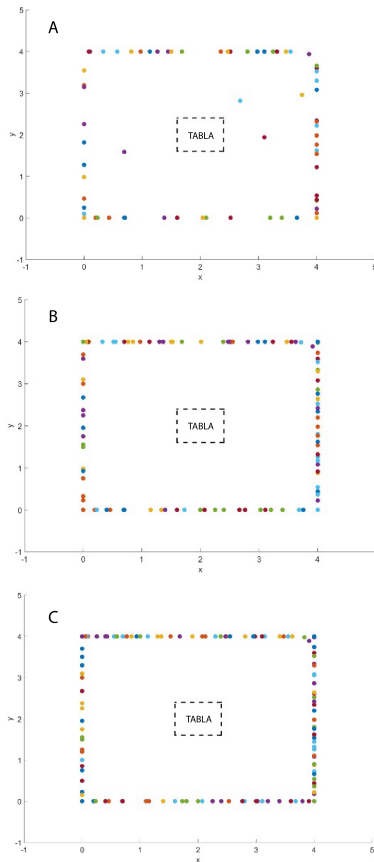


Figura 14. Distribución de neuronas por poses en la habitación de los experimentos: (a) 1, (b) 2 y (c) 3.

3.1.2. Ubicación en el mapa

El propósito del mapa bidimensional es permitir que el robot regrese a la posición global 0 en el mapa, una vez que haya completado sus tareas. Con el mapa construido, el robot puede determinar su ubicación dentro de la habitación utilizando una o dos imágenes de las paredes más cercanas. Se realizaron cuatro experimentos para validar esta funcionalidad.

La Tabla 3 enumera los parámetros, que incluyen el número de experimento, el mapa bidimensional construido en la sección anterior (1, 2 y 3), y la posición real a calcular (x, y) en metros.

La construcción del mapa bidimensional se evalúa de la siguiente manera: el robot virtual captura dos imágenes desde diferentes perspectivas en cada una de las cuatro posiciones más cercanas a las paredes bajo evaluación. Ejemplos de estas capturas realizadas por el robot se ilustran en la Figura 15. En cada posición, se capturan dos imágenes de las paredes más cercanas.

Las dos primeras imágenes superiores corresponden a la posición $(0, 0)$, mientras que las dos siguientes corresponden a la posición $(4, 4)$ dentro de la habitación. Los resultados se presentan en la Tabla 3, que detalla cinco evaluaciones con dos imágenes para cada

experimento. El módulo registra las poses individuales capturadas en cada columna para los cuatro experimentos, con un par de imágenes por evaluación.



Figura 15. Ejemplos de capturas realizadas por el robot NAO virtual

Tabla 3. Resultados de las evaluaciones de poses y ubicaciones en el mapa

N.º	Mapa	(x,y) m	1	2	3	4	5
1	1	(3.5,0.5)	(3.7,1.7)	(3.6,1.6)	(3.7,1.7)	(3.8,1.8)	(3.3,1.7)
2	1	(0,0)	(0.1,0.2)	(0.2,0.2)	(0.3,0.1)	(0.3,0.0)	(0.3,0.2)
3	2	(0.5,3.5)	(0.0,2.0)	(0.0,2.0)	(0.2,2.2)	(0.0,2.0)	(0.2,2.2)
4	3	(4,4)	(4.0,3.8)	(3.9,3.9)	(4,4)	(3.9,3.9)	(3.9,3.9)

3.2. Escenario real

3.2.1. Construcción del mapa

El mapa bidimensional se construyó en una habitación de 4×3 metros, dentro de la cual el robot desarrolló un mapa de 3×3 metros. La habitación contiene varios elementos, incluidos carteles con información diversa. La Figura 16 muestra las cuatro paredes de la habitación, ilustrando los elementos utilizados para el aprendizaje. Además, hay una plataforma de 30 cm ubicada en el centro de la habitación, como se muestra en la Figura 17. Esta plataforma sostiene 20 objetos distribuidos a lo largo de los bordes, mejorando la visibilidad para el robot y asegurando que los objetos permanezcan dentro del área de trabajo de los manipuladores para facilitar su recuperación.

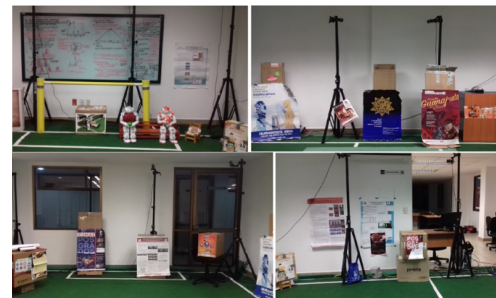


Figura 16. Las paredes del escenario real para la construcción del mapa

Esta evaluación completó tres circuitos para construir un mapa más preciso. El robot inició su ruta desde las coordenadas globales de la habitación (0, 0), ubicadas en la esquina derecha de la pared 1.



Figura 17. Plataforma con objetos colocados en el centro de la habitación

Durante los recorridos, el robot gira la cabeza hacia la pared para capturar imágenes mientras avanza y mantiene su posición relativa (Figura 18).



Figura 18. El robot sigue su trayectoria dirigiéndose hacia la pared para capturar imágenes

La Tabla 4 detalla las imágenes capturadas durante cada circuito a lo largo de las paredes. Esta tabla especifica el número de circuitos completados, el total de imágenes tomadas y las imágenes capturadas correspondientes a cada pared. Se registraron un total de sesenta y ocho imágenes y poses utilizadas para construir el mapa bidimensional.

Al igual que en el escenario virtual, las imágenes capturadas se introducen en el módulo de reconocimiento de objetos, encargado del aprendizaje de características y la generación del mapa de la habitación.

Tabla 4. Principales parámetros de los experimentos: Construcción del mapa bidimensional

Vuelta	Imágenes	Pared 1	Pared 2	Pared 3	Pared 4
1	25	7	7	5	6
2	26	5	8	5	8
3	17	5	5	4	3

La Tabla 5 presenta los parámetros utilizados para generar el mapa de la habitación, incluyendo el número

de experimentos realizados, las imágenes utilizadas para el entrenamiento, el número de neuronas y las épocas involucradas.

Tabla 5. Parámetros para la construcción del mapa

Experimento	Entrenamiento	Neuronas	Veces
1	68	400	100
2	68	500	200

Después del entrenamiento, los mapas bidimensionales contenían 27 y 36 poses, respectivamente. La Figura 19 muestra estos mapas, donde los puntos azules indican las poses en las que el robot capturó imágenes. La Figura 19(a) ilustra el mapa ideal, mostrando las poses objetivo para la captura de imágenes durante los experimentos. El mapa construido para el experimento 1 corresponde a la Figura 19(b), mientras que el mapa para el segundo experimento se representa en la Figura 19(c). Estos mapas reflejan la distribución de las neuronas asociadas con cada pose. Se observa que al aumentar el número de neuronas de 400 a 500 mejora ligeramente la distribución. Sin embargo, el tamaño del mapa construido se redujo de 3×3 metros a 1,5×1,5 metros.

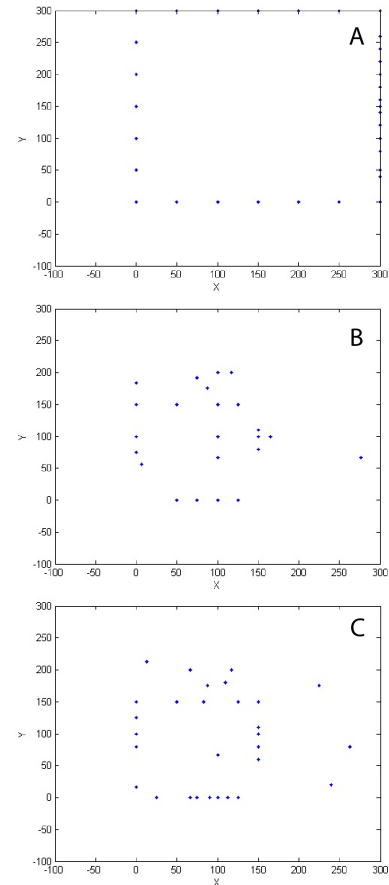


Figura 19. Distribución de neuronas por poses en la habitación

Desde el análisis anterior, se puede inferir que la reducción en el tamaño del mapa se debió a numerosos falsos positivos y a la interasociación de poses, lo que condujo a su consolidación.

3.2.2. Localización en el mapa bidimensional

La tarea de localización en el mapa bidimensional sirve varios propósitos. Un objetivo clave es que el robot regrese al punto de partida para entregar un objeto solicitado por el usuario. Además, el robot utiliza el mapa para localizar las paredes de la habitación, lo que ayuda a evitarlas durante las tareas de búsqueda de objetos.

Por lo tanto, con el mapa construido, el robot puede determinar su ubicación dentro de la habitación utilizando una o dos imágenes de las paredes más cercanas. Esta capacidad se evaluó a través de diez experimentos que se llevaron a cabo.

La Tabla 6 enumera los números de experimento y las posiciones correspondientes a calcular (x, y) en metros.

Tabla 6. Parámetros principales de los experimentos para la ubicación del mapa

Nº	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
(x,y)m	(0,0)	(0,1)	(0,2)	(0,3)	(1,0)	(2,0)	(3,0)	(3,3)	(1.5,2)	(2,1.5)

La precisión de la ubicación del robot en el mapa bidimensional se determina utilizando dos imágenes capturadas desde las posiciones potenciales más cercanas a la pared adyacente a ese punto.

Los resultados se presentan en la Tabla 7, donde se muestran las diez ubicaciones asociadas con dos poses derivadas de la evaluación de las dos imágenes tomadas desde cada posición. Debido a las imprecisiones en la construcción del mapa bidimensional, las poses obtenidas no coinciden estrechamente con las posiciones reales.

La mayor precisión se logró con la pose número (1), mostrando una precisión de $\pm(0.25, 0.16)$ cercana a la pose esperada. La siguiente mejor precisión se obtuvo con la pose número (9), mostrando una precisión de $\pm(0.34, 0.62)$. Las poses menos precisas fueron (2) y (8), con precisiones de $\pm(1.50, 0.50)$ y $\pm(1.75, 2.00)$, respectivamente. Aunque el mapa construido fue inexacto, la evaluación arroja resultados favorables dados el mapa entrenado. La Figura 20 proporciona una representación gráfica de las diez ubicaciones determinadas, utilizando el módulo en el mapa bidimensional previamente entrenado. Se observa que la mayoría de las poses están muy cerca de las posiciones entrenadas, excepto 2, 7 y 8, que estaban significativamente desalineadas.

Tabla 7. Resultados de las evaluaciones de poses para cada experimento

Nº	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	(0,0.16)	(1.50,1.50)	(0.75,0)	(1.00,0)	(0,0.80)	(0,1.0)	(0.25,0)	(1.25,0)	(1.06,1.75)	(1.50,0.80)
2	(0.25,0)	(1.50,0.60)	(1.25,0)	(0,0.80)	(0.25,0)	(0.25,0)	(0.66,0)	(0,1.00)	(1.25,1.00)	(1.25,1.00)

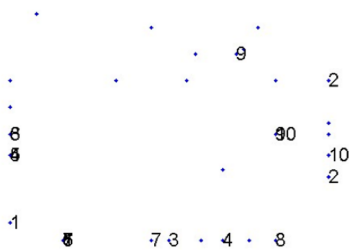


Figura 20. Gráfico con las diez ubicaciones determinadas en el mapa entrenado

4. Conclusiones

Este estudio presenta el desarrollo de un algoritmo para la construcción de mapas bidimensionales utilizando odometría inercial y elementos visuales. El mapa bidimensional se crea utilizando un módulo de reconocimiento de objetos basado en características locales y redes neuronales artificiales no supervisadas.

Este módulo se utiliza para aprender el diseño de la habitación y asociar una pose con cada neurona en la red, que se entrena para representar el mapa bidimensional.

Se realizaron experimentos utilizando (1) un robot NAO virtual y (2) un robot NAO real en un escenario auténtico. Los resultados son prometedores, ya que fue posible construir un mapa bidimensional de la habitación y localizar con precisión el robot móvil con una precisión de hasta $\pm(0.06, 0.1)$ en simulación y $\pm(0.25, 0.16)$ en el entorno natural. Estos resultados pueden mejorarse aún más mejorando la calidad de las imágenes capturadas.

El enfoque para generar mapas a partir de información visual presenta varias limitaciones, incluyendo las siguientes:

1. Las cámaras del robot NAO no son óptimas para capturar imágenes de alta calidad, lo que conduce a errores tanto en las fases de aprendizaje como de reconocimiento.

2. El entorno debe estar estructurado para incluir suficientes referencias visuales en las paredes de la habitación para mejorar la precisión de localización del robot.
3. Esta implementación no tiene en cuenta elementos dinámicos; por lo tanto, la escena solo contiene al robot, la mesa y los objetos circundantes.
4. El camino del robot debe ser recto, lo que requiere un camino despejado libre de objetos para permitir un posicionamiento adecuado con respecto a la pared y sus marcadores visuales.
5. El enfoque depende en gran medida de la información visual, por lo que la ausencia de esta información causaría confusión y obstaculizaría significativamente la capacidad del robot para navegar por la habitación.

4.1. Trabajo futuro

1. **Fusión avanzada de sensores.** El trabajo futuro se centrará en mejorar la integración de datos de odometría inercial y elementos visuales. Este enfoque tiene como objetivo reducir la dependencia únicamente de características visuales, mejorando así la robustez y precisión del sistema.
2. **Evaluación de arquitecturas de redes neuronales.** Se evaluarán diversas arquitecturas de redes neuronales para determinar cuál es la más adecuada para la tarea de construcción de mapas. La arquitectura que muestre el mejor rendimiento será seleccionada para un desarrollo e implementación adicionales.
3. **Pruebas de detectores avanzados de puntos característicos.** Para mejorar el rendimiento del sistema, se probarán detectores de puntos característicos de última generación. Se espera que estos detectores ofrezcan mejoras significativas en la detección y procesamiento de puntos característicos, contribuyendo a la eficiencia general del sistema.

Referencias

- [1] IFR. (2024) Homepage. International Federation of Robotics. International Federation of Robotics. [Online]. Available: <https://ifr.org/>
- [2] Y. Omori, T. Furukawa, T. Ishikawa, and M. Inaba, "Humanoid vision design for object detection, localization and mapping in indoor environments," in *2018 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*, 2018, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/SSRR.2018.8468604>
- [3] X. Cui, M. Wang, B. Fan, and J. Yi, "Target detection based on binocular stereo vision," in *2017 International Conference on Computer Technology, Electronics and Communication (ICCTEC)*, 2017, pp. 1093–1097. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICCTEC.2017.00239>
- [4] R. Scona, S. Nobili, Y. R. Petillot, and M. Fallon, "Direct visual SLAM fusing proprioception for a humanoid robot," in *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2017, pp. 1419–1426. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/IROS.2017.8205943>
- [5] L. K. Garzón Obregón, L. A. Forero Rincón, and O. M. Duque Suárez, "Diseño e implementación de un sistema de visión artificial usando una técnica de mapeo y localización simultánea (SLAM) sobre una plataforma robótica móvil," *Mundo FESC*, vol. 8, no. 16, pp. 8–17, 2018. [Online]. Available: <https://is.gd/pqjvTy>
- [6] F. Blochliger, M. Fehr, M. Dymczyk, T. Schneider, and R. Siegwart, "Topomap: Topological mapping and navigation based on visual SLAM maps," in *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2018, pp. 3818–3825. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2018.8460641>
- [7] E. Ovalle-Magallanes, N. G. Aldana-Murillo, J. G. Avina-Cervantes, J. Ruiz-Pinales, J. Cepeda-Negrete, and S. Ledesma, "Transfer learning for humanoid robot appearance-based localization in a visual map," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 6868–6877, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3048936>
- [8] T. Lasguignes, I. Maroger, M. Fallon, M. Ramezani, L. Marchionni, O. Stasse, N. Mansard, and B. Watier, "ICP Localization and Walking Experiments on a TALOS humanoid robot," in *2021 20th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, 2021, pp. 800–805. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICAR53236.2021.9659474>
- [9] P. Wozniak, H. Afrisal, R. G. Esparza, and B. Kwolek, "Scene recognition for indoor localization of mobile robots using deep CNN," in *Computer Vision and Graphics*, L. J. Chmielewski, R. Kozera, A. Orłowski, K. Wojciechowski, A. M. Bruckstein, and N. Petkov, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 137–147. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-030-00692-1_13
- [10] E. S. Lahemer and A. Rad, "An adaptive augmented vision-based ellipsoidal slam

- for indoor environments,” *Sensors*, vol. 19, no. 12, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s19122795>
- [11] T.-J. Lee, C.-H. Kim, and D.-I. D. Cho, “A monocular vision sensor-based efficient slam method for indoor service robots,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 1, pp. 318–328, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2826471>
- [12] M. Fourmy, D. Atchuthan, N. Mansard, J. Solà, and T. Flayols, “Absolute humanoid localization and mapping based on IMU Lie group and fiducial markers,” in *2019 IEEE-RAS 19th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, 2019, pp. 237–243. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/Humanoids43949.2019.9035005>
- [13] S. J. Dignadice, J. R. Red, A. J. Bautista, A. Perol, A. Ollanda, and R. Santos, “Application of simultaneous localization and mapping in the development of an autonomous robot,” in *2022 8th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR)*, 2022, pp. 77–80. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICCAR55106.2022.9782658>
- [14] S. Wen, M. Sheng, C. Ma, Z. Li, H. K. Lam, Y. Zhao, and J. Ma, “Camera recognition and laser detection based on EKF-SLAM in the autonomous navigation of humanoid robot,” *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 92, no. 2, pp. 265–277, Oct 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10846-017-0712-5>
- [15] X. Deng, Z. Zhang, A. Sintov, J. Huang, and T. Bretl, “Feature-constrained active visual SLAM for mobile robot navigation,” in *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2018, pp. 7233–7238. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2018.8460721>
- [16] A. Li, J. Wang, M. Xu, and Z. Chen, “DP-SLAM: A visual SLAM with moving probability towards dynamic environments,” *Information Sciences*, vol. 556, pp. 128–142, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2020.12.019>
- [17] N. Krombach, D. Droschel, S. Houben, and S. Behnke, “Feature-based visual odometry prior for real-time semi-dense stereo SLAM,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 109, pp. 38–58, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2018.08.002>
- [18] Y. S. Jiyu Cheng and M. Q.-H. Meng, “Improving monocular visual slam in dynamic environments: an optical-flow-based approach,” *Advanced Robotics*, vol. 33, no. 12, pp. 576–589, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/01691864.2019.1610060>
- [19] S. Ganesan and S. K. Natarajan, “A novel directional sampling-based path planning algorithm for ambient intelligence navigation scheme in autonomous mobile robots,” *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*, vol. 15, pp. 269–284, 2023, 3. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3233/AIS-220292>
- [20] K. Zhang, H. Gui, Z. Luo, and D. Li, “Matching for navigation map building for automated guided robot based on laser navigation without a reflector,” *Industrial Robot: the international journal of robotics research and application*, vol. 46, no. 1, pp. 17–30, Jan 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1108/IR-05-2018-0096>
- [21] C. Wang, J. Wang, C. Li, D. Ho, J. Cheng, T. Yan, L. Meng, and M. Q.-H. Meng, “Safe and robust mobile robot navigation in uneven indoor environments,” *Sensors*, vol. 19, no. 13, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s19132993>
- [22] A. Roychoudhury, M. Missura, and M. Bennewitz, “3D polygonal mapping for humanoid robot navigation,” in *2022 IEEE-RAS 21st International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, 2022, pp. 171–177. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/Humanoids53995.2022.10000101>
- [23] F. Martín, J. Ginés, D. Vargas, F. J. Rodríguez-Lera, and V. Matellán, “Planning topological navigation for complex indoor environments,” in *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2018, pp. 1–9. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/IROS.2018.8594038>
- [24] Aldebaran. NAO Documentation. Aldebaran NAO Documentation. [Online]. Available: <https://is.gd/eSNPWH>
- [25] MIA. (2023) Mathematical image analysis group. MIA Group. [Online]. Available: <https://is.gd/69mEso>
- [26] P. Fernández Alcantarilla, “Fast explicit diffusion for accelerated features in nonlinear scale spaces,” in *British Machine Vision Conference (BMVC)*, 09 2013. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.5244/C.27.13>
- [27] H. Scharr, *Optimale Operatoren in der Digitalen Bildverarbeitung*. University of Heidelberg, Germany, 2000. [Online]. Available: <https://doi.org/10.11588/heidok.00000962>

-
- [28] X. Yang and K. Cheng, "LDB: an ultra-fast feature for scalable augmented reality on mobile devices," *2012 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, pp. 49–57, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2012.6402537>
- [29] B. Fritzke, "Growing cell structures—a self-organizing network for unsupervised and supervised learning," *Neural Networks*, vol. 7, no. 9, pp. 1441–1460, 1994. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/0893-6080\(94\)90091-4](https://doi.org/10.1016/0893-6080(94)90091-4)
- [30] T. Kohonen, "The self-organizing map," *Proceedings of the IEEE*, vol. 78, no. 9, pp. 1464–1480, 1990. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/5.58325>
- [31] Cyberbotics. (2023) Simulating your robots with webots. Cyberbotics - Robotics simulation services. Cyberbotics - Robotics simulation services. [Online]. Available: <https://is.gd/Q31yau>
- [32] K. L. Flores-Rodríguez, F. Trujillo-Romero, and W. Suleiman, "Object recognition modular system implementation in a service robotics context," in *2017 International Conference on Electronics, Communications and Computers (CONIELECOMP)*, 2017, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CONIELECOMP.2017.7891833>



OPTIMIZACIÓN DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE LAS ESTACIONES DE ALA DE AERONAVES DE COMBATE: UN ENFOQUE DE ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS

OPTIMIZING STRUCTURAL INTEGRITY OF FIGHTER AIRCRAFT WING STATIONS: A FINITE ELEMENT ANALYSIS APPROACH

Aun Haider Bhutta^{1,*}

Recibido: 02-05-2024, Recibido tras revisión: 29-05-2024, Aceptado: 13-06-2024, Publicado: 01-07-2024

Resumen

Los aviones de combate modernos están equipados con múltiples estaciones en el fuselaje y debajo de las alas para acomodar varios almacenes externos, tanto descartables como no descartables. Cada configuración se somete a una certificación de aeronavegabilidad, incluido un análisis estructural de las estaciones individuales dentro de la envolvente de vuelo del transporte. Este estudio se centra en el análisis estructural de una estación de ala de un avión de combate dentro de esta envolvente especificada. Para realizar este análisis, la estación del ala se extrae del modelo global integral del ala, creando un submodelo con propiedades de rigidez equivalentes. Utilizando ANSYS Workbench®, se realiza un análisis de elementos finitos (FEA) para casos de carga críticos para determinar el factor de seguridad (FoS). El análisis inicial revela que la estación del ala tiene un FoS de 1,2 bajo la carga máxima de diseño. Los análisis modales y de pandeo pretensados indican un aumento del 10 % en la rigidez debido a los efectos de rigidez por tensión. Para mejorar aún más la capacidad de carga, se introducen cambios de diseño paramétrico. El cambio del diámetro del perno de 8 mm a 10 mm incrementa el FoS a 1,33, lo que da como resultado un aumento del 8 % en la capacidad máxima de carga de la estación del ala. Este enfoque integral, que emplea FEA, garantiza la integridad estructural del ala bajo condiciones de carga estática dentro de la envolvente del carro. Los hallazgos del estudio respaldan el rendimiento mejorado de la estación del ala y contribuyen a operaciones de aeronaves más seguras y eficientes.

Palabras clave: tienda externa, transporte de armas, análisis estructural estático; submodelado, análisis modal, análisis de pandeo, optimización del diseño

Abstract

Modern fighter aircraft are equipped with multiple stations on the fuselage and under the wings to accommodate various external stores, both jettisonable and non-jettisonable. Each configuration undergoes airworthiness certification, including structural analysis of individual stations within the carriage flight envelope. This study focuses on the structural analysis of a fighter aircraft wing station within this specified envelope. To perform this analysis, the wing station is extracted from the comprehensive global wing model, creating a sub-model with equivalent stiffness properties. Utilizing ANSYS Workbench®, Finite Element Analysis (FEA) is conducted for critical load cases to determine the Factor of Safety (FoS). The initial analysis reveals that the wing station has an FoS of 1.2 under the maximum design load. Prestressed modal and buckling analyses indicate a 10% increase in stiffness due to stress-stiffening effects. To further enhance load-carrying capacity, parametric design changes are introduced. Increasing the bolt diameter from 8 mm to 10 mm raises the FoS to 1.33, resulting in an 8% increase in the maximum load-carrying capacity of the wing station. This comprehensive approach, employing FEA, ensures the wing's structural integrity under static load conditions within the carriage envelope. The study's findings support the wing station's enhanced performance and contribute to safer and more efficient aircraft operations.

Keywords: External store; Weapon Carriage; Static Structural Analysis; Sub-modelling; Modal Analysis; Buckling Analysis; Design Optimization

^{1,*}Instituto de Aeronáutica y Astronáutica, Universidad Aérea de Islamabad, Pakistán.
 Autor para correspondencia ✉: aunbhutta@gmail.com.

Forma sugerida de citación: Haider Bhutta, A. "Optimización de la integridad estructural de las estaciones de ala de aeronaves de combate: Un enfoque de análisis de elementos finitos," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 32, pp. 90-100, 2024. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n32.2024.09>.

1. Introducción

En las últimas dos décadas, ha habido un notable aumento en la adopción del método de elementos finitos (MEF) para el análisis de estructuras complejas [1]. Esta técnica numérica proporciona una solución aproximada altamente precisa para problemas que carecen de soluciones en forma cerrada.

En el análisis estático estructural mediante el método de elementos finitos (FEA), las leyes constitutivas describen cómo los materiales responden a cargas aplicadas y definen la relación entre el esfuerzo y la deformación. La ley de Hooke, presentada en la ecuación (1), es la ley constitutiva fundamental empleada para materiales elásticos lineales. Esta ley proporciona una relación lineal entre los tensores de esfuerzo (σ_{ij}) y deformación (ϵ_{kl}), representada de la siguiente manera:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\epsilon_{kl} \quad (1)$$

C_{ijkl} es el tensor de rigidez elástica, que depende de propiedades del material como el módulo de Young (E) y el coeficiente de Poisson (ν).

En un escenario práctico de análisis por elementos finitos (FEA), varias variables son conocidas, incluyendo propiedades del material (módulo de Young, coeficiente de Poisson y densidad), geometría (dimensiones y forma de la estructura), y condiciones de contorno (desplazamientos como soportes fijos o movimientos prescritos, y fuerzas como cargas aplicadas o presión).

En el análisis por elementos finitos (FEA), las cantidades desconocidas incluyen los desplazamientos nodales (u_i) en cada nodo de la malla, así como las deformaciones (ϵ_{ij}) y los esfuerzos (σ_{ij}) en cada punto de integración o nodo. Para un material elástico lineal en 3D, la matriz de rigidez puede expresarse utilizando las constantes de Lamé, λ y G , derivadas del módulo de Young y el coeficiente de Poisson.

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2)$$

La ecuación (3) presenta la relación esfuerzo-deformación en forma matricial.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda + 2G & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2G & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2G & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Al introducir las propiedades conocidas del material y las condiciones de contorno en el software de FEA, se pueden determinar las incógnitas (desplazamientos, deformaciones y esfuerzos). Este proceso garantiza una predicción precisa del comportamiento estructural bajo cargas aplicadas, facilitando el diseño y la evaluación de la integridad estructural.

Una revisión de la investigación publicada revela el uso prevalente de condiciones de contorno fijas en el análisis estructural estático de miembros aislados de la estructura global [2]. Aunque comúnmente empleado, se reconoce que esta condición de contorno representa una aproximación conservadora, que sobreestima el máximo esfuerzo en el miembro estructural, lo que conduce consecuentemente a una subestimación del factor de seguridad (FOS) [3].

El uso de condiciones de contorno de soporte fijo en el análisis de estructuras estáticamente indeterminadas, como las alas de aeronaves, presenta limitaciones significativas debido principalmente a las suposiciones que introducen los soportes fijos, las cuales pueden no reflejar con precisión las condiciones del mundo real [4]. Los soportes fijos asumen que no hay movimiento ni rotación en los puntos de soporte, lo cual frecuentemente es irrealista en escenarios prácticos. Las alas de aeronaves experimentan diversas fuerzas y momentos que causan deformaciones, lo que influye significativamente en el comportamiento estructural global [5]. Además, las uniones y conexiones en una aeronave no son perfectamente rígidas; poseen cierto grado de flexibilidad que debe considerarse para un análisis estructural más preciso.

Los soportes fijos pueden distorsionar los verdaderos caminos de carga y las distribuciones de esfuerzos dentro de la estructura. Las alas de las aeronaves están diseñadas para distribuir las cargas de manera eficiente, pero los soportes fijos pueden alterar estas distribuciones, lo que conduce a análisis inexactos [6]. Esto puede resultar en concentraciones artificiales de esfuerzos que no existen en la estructura, lo que potencialmente lleva a evaluaciones erróneas de la integridad estructural y la vida útil a fatiga.

Además, los soportes fijos simplifican las condiciones de contorno hasta un grado que puede no capturar con precisión las no linealidades del material, como la deformación plástica y el flujo viscoso [7]. A menudo, las alas de las aeronaves operan bajo condiciones donde estas no linealidades del material son significativas, lo que requiere condiciones de contorno que puedan tener en cuenta tales efectos. Además, las grandes deformaciones y las no linealidades geométricas en las alas de las aeronaves requieren condiciones de contorno que puedan adaptarse a configuraciones cambiantes, una capacidad que los soportes fijos no pueden proporcionar.

Por último, los resultados de los análisis, utilizando soportes fijos, pueden no correlacionarse bien con los datos experimentales o las mediciones en vuelo. Para garantizar un análisis preciso y confiable, los ingenieros a menudo recurren a condiciones de contorno más realistas que simulan la interacción entre las diferentes partes de la estructura y a soportes flexibles que incorporan la elasticidad de los accesorios y conexiones. También se emplean modelos híbridos, que combinan

diversas condiciones de contorno, para capturar mejor las complejas interacciones dentro de la estructura. Estas condiciones de contorno avanzadas facilitan predicciones más precisas del comportamiento estructural bajo diversas condiciones de carga, lo que conduce a diseños de aeronaves más seguros y eficientes.

El ala de una aeronave se clasifica como una estructura estáticamente indeterminada [8]. Estas estructuras presentan redundancia cinemática, donde las restricciones superan el mínimo necesario para evitar el movimiento rígido del cuerpo bajo cargas aplicadas. En estructuras estáticamente indeterminadas, los valores de las fuerzas y momentos de reacción en los soportes son influenciados por las características de rigidez de la estructura [9]. En consecuencia, la rigidez del ala juega un papel crucial en determinar la distribución de carga en los puntos de conexión de la estación del ala [10].

En lugar de imponer una condición de contorno fija en un modelo local aislado del modelo global, un enfoque alternativo implica asignar desplazamientos nodales derivados de la solución del modelo global de elementos finitos (FE) [11]. Se realiza un análisis de FE del miembro estructural aislado, incorporando estos desplazamientos nodales y la carga aplicada, para obtener resultados precisos. Este método requiere soluciones para ambos modelos, global y local, para cada caso de carga [12].

Una tercera técnica implica aislar el modelo local del modelo global, utilizando resortes traslacionales y rotacionales. La rigidez de estos resortes depende del campo de deformación del modelo global bajo la carga aplicada [13]. Posteriormente, se analiza un modelo local refinado utilizando estos resortes para cada caso de carga. La implementación de estos resortes en ANSYS se logra aplicando condiciones de contorno de soporte elástico, con rigidez derivada del análisis del modelo global del ala bajo la carga de diseño [14].

Este examen se centra en un avión de combate a reacción contemporáneo.

La Figura 1 muestra el ala de una aeronave, que incluye cuatro largueros: el de la pared frontal, el frontal, el principal y el trasero [15]. Estos largueros constituyen un marco cohesivo interconectado intrínsecamente a través de un sistema de doce costillas.

Este estudio se centra en la estación del ala externa 2/6, ubicada en la costilla del ala 7, específicamente designada para transportar cargas externas. Esta estación consta de dos componentes estructurales integrales: el *tulip* frontal (FT) y el *tulip* trasero (RT).

Considerando las limitaciones de las condiciones de contorno fijas, este estudio mejora la fidelidad del análisis incorporando la rigidez del ala. El objetivo principal es determinar la capacidad máxima de carga de la estación del ala 2/6, utilizando condiciones de contorno precisas a través de la técnica de submodelado [16].

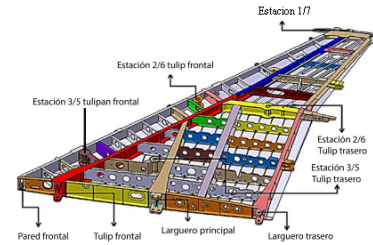


Figura 1. Estructura interna del ala de la aeronave [15]

Este método tiene como objetivo proporcionar una representación más precisa del comportamiento estructural, permitiendo una evaluación precisa de los niveles de esfuerzo y el factor de seguridad (FOS) para la estación del ala. La incorporación de la rigidez del ala mejora la fiabilidad del análisis estructural y proporciona percepciones detalladas sobre el rendimiento del ala bajo diversas condiciones. Las técnicas de submodelado tienen en cuenta la influencia de la rigidez del ala, lo que resulta en una mayor precisión y comprensión del comportamiento estructural. En última instancia, la integración de la rigidez del ala mejora la fiabilidad del análisis estructural, ofreciendo valiosas percepciones sobre el rendimiento del ala en varios escenarios.

2. Materiales y métodos

La metodología implica extraer los *tulip* frontal y trasero del modelo global del ala e introducir la rigidez del ala mediante condiciones de contorno elásticas derivadas del análisis de elementos finitos bajo la carga de diseño [17]. Se aplican cargas críticas a cada *tulip* del ala, y se realiza un análisis estructural estático en ANSYS Workbench versión 14.5 para generar el campo de deformación y esfuerzos. Utilizando el factor de seguridad (FOS) basado en la resistencia a la fluencia, el estudio determina la capacidad máxima de carga de la estación del ala. Se llevan a cabo análisis modales preestresados y de pandeo [18] para evaluar el efecto de rigidez por esfuerzos bajo la carga máxima de diseño. El verdadero potencial de este estudio reside en la optimización del diseño, que se implementa mediante alteraciones paramétricas de los agujeros de perno del *tulip* del ala. Este proceso mejora la capacidad de carga de la estación del ala, facilitando una evaluación integral del rendimiento estructural y mejorando las capacidades generales de la aeronave de combate [19]. Aunque este estudio proporciona una comprensión completa del comportamiento de la estación del ala bajo cargas estáticas, no tiene en cuenta condiciones de carga cíclica. El análisis PSD para carga cíclica se abordará en estudios posteriores.

3. Resultados y discusión

3.1. Condiciones de contorno para los *tulip*

El modelo de elementos finitos (FE) del ala, construido utilizando elementos de línea y de cáscara, se ilustra en la Figura 2. El análisis de este modelo de ala bajo carga de diseño genera un campo de desplazamiento representado en la Figura 3. El campo de desplazamiento resultante bajo las cargas aplicadas proporciona valores de rigidez para los soportes elásticos impuestos como condición de contorno para el análisis de los *tulip* frontal y trasero.

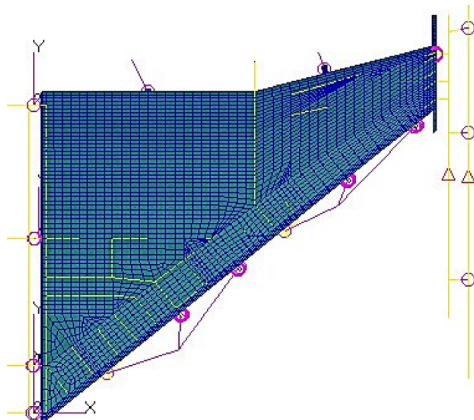


Figura 2. Modelo de elementos finitos del ala [9]

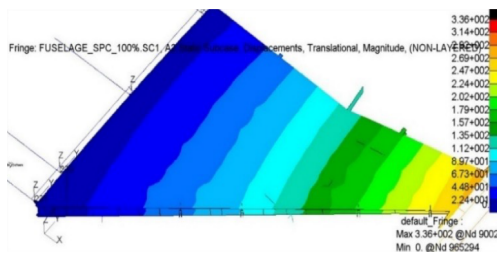


Figura 3. Campo de deformación del ala

Los valores de rigidez para los respectivos soportes elásticos, obtenidos a través de ANSYS Workbench versión 14.5, se presentan a continuación. Estos valores de rigidez se utilizan en el análisis de los *tulip* del ala aislados.

Las cargas aplicadas al ala se transfieren al fuselaje, causando deformación y movimiento en el centro de gravedad de la aeronave. Para eliminar el movimiento rígido del cuerpo en el análisis, es necesario restringir la línea central de la aeronave. En el estudio actual, el modelo de ala de la aeronave se restringe a seis grados de libertad (6 DOF) en la línea central de la aeronave.

Esta restricción evita movimientos rígidos no deseados, asegurando una transferencia precisa de carga y simulación del comportamiento estructural. Al aplicar estas restricciones, el análisis proporciona condiciones de contorno estables y realistas para el análisis por elementos finitos (FEA).

3.2. Modelos de elementos finitos de los *tulip*

Los modelos CAD de los *tulip* frontal y trasero para la estación del ala 2/6, desarrollados en el módulo de diseño ANSYS Design Module®, se ilustran en la Figura 4 y Figura 5, respectivamente. Estos modelos CAD sirven como plantillas para desarrollar modelos de elementos finitos en ANSYS Workbench®. Las propiedades del material asignadas a los *tulip* del ala se detallan en el análisis aerodinámico de la aeronave con cargas externas dentro del envoltorio de transporte de la aeronave, proporcionando casos críticos de carga para los *tulip* del ala [1]. La Tabla 3 y Tabla 4 describen exhaustivamente los casos de carga aplicados al *tulip* frontal (FT) y al *tulip* trasero (RT) durante el envoltorio de transporte [1]. Estas fuerzas y momentos flectores se aplican tanto al *tulip* frontal como al trasero de la estación 2/6.

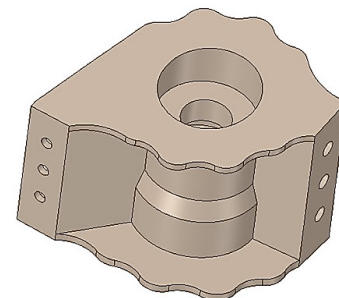


Figura 4. Modelo sólido del *tulip* frontal (FT) [9]

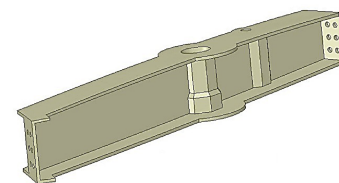


Figura 5. Modelo sólido del *tulip* trasero

Tabla 1. Condición de contorno elástica para los *tulip* [9]

<i>Tulip</i>	Rigidez Lineal	Rigidez rotacional
<i>Tulip</i> frontal	242 kN/m	11173 Nm/rad
<i>Tulip</i> trasero	99 kN/m	50825 Nm/rad

Tabla 2. Propiedades del material de los *tulip*

Componente	Material	σ_y (MPa)	E (GPa)	Coefficiente Poisson ν	Densidad (g/cm^3)
<i>tulip</i> frontal (FT)	30CrMnSi	835	196	0.3	7.75
<i>tulip</i> trasero (RT)	7050-	427	70	0.33	2.82

Tabla 3. Casos de carga (LC) para el *tulip* frontal (FT) (fuerzas en kN y momentos en kN.m) [1]

LC	N_Z	F_X	F_Y	F_Z	M_X	M_Y	M_Z
1	5	1.2	-11	-33	0	0	1
2	5	-20	-4	1	2	-78	-3
3	4.5	3.8	-12	-29	-1	40	2
4	4.5	28	4	-37	1	35	1
5	2	-14.8	-9	-11	2	-82	-2
6	2	16.8	-5	-20	-1	-49	1
7	4.5	2.96	-10	-30	0	21	1
8	4.5	30	10	-37	1	37	1
9	2.74	-10	-5	-17	2	-121	-3
10	2.74	14	3	-24	0	11	1
11	2	-16	-6	-10	2	-112	-3
12	2	11	-6	-5	0	-31	1
13	-1	1.4	2	6	0	31	1

Tabla 4. Casos de carga (LC) para el *tulip* trasero (RT) (fuerzas en kN y momentos en kN.m) [1]

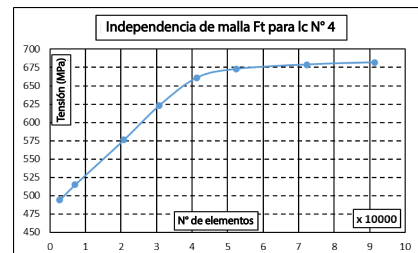
LC	N_Z	F_X	F_Y	F_Z	M_X	M_Y	M_Z
14	1	4	2	0	-1	-2	24
15	5	6	7	0	-2	-8	-9
16	5	2	6	2	-3	-7	13
17	2	1	3	1	-1	-4	-13
18	5	6	7	0	-2	-8	-10
19	1	-1	1	1	0	-1	2
20	4.5	-4	7	2	0	-6	-28
21	4.5	-3	3	11	0	0	24
22	2.17	15	6	-5	1	-5	6
23	2.17	-40	6	3	0	0	73

3.3. Análisis del *tulip* frontal (FT)

El modelo ha sido mallado libremente utilizando elementos Tet6, que son elementos tetraédricos con tres nodos y una función de forma cuadrática. Para asegurar la precisión, la malla se refina en los puntos críticos de tensión ubicados en los agujeros de perno. Como se ilustra en la Figura 6, un estudio de independencia de la malla establece que la solución se vuelve independiente del refinamiento de la malla a partir de 70 000 elementos. La Figura 7 muestra el modelo mallado del *tulip* frontal (FT), mientras que la Figura 8 ilustra las condiciones de contorno y cargas aplicadas en el FT.

Para cada caso de carga, se generan gráficos de deformación y esfuerzo en ANSYS. La comparación del esfuerzo máximo equivalente (von Mises) para cada caso de carga en el *tulip* frontal (FT) se ilustra en la

Figura 9. El caso de carga 4 se identifica como el caso crítico para el FT, con un valor de esfuerzo de 674 MPa. El campo de deformación del *tulip* frontal bajo el caso de carga crítica 4 se muestra en la Figura 10. Se observa una deformación máxima de 0,13 mm en el nervio del FT.

**Figura 6.** Independencia de la malla del FT

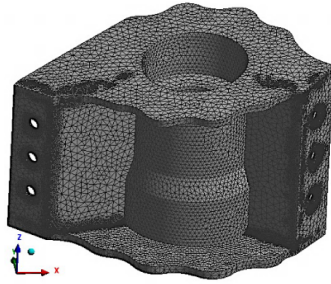


Figura 7. Malla libre del FT [9]

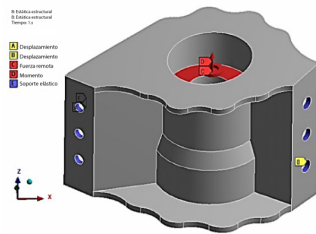


Figura 8. Cargas y condiciones de contorno en el FT

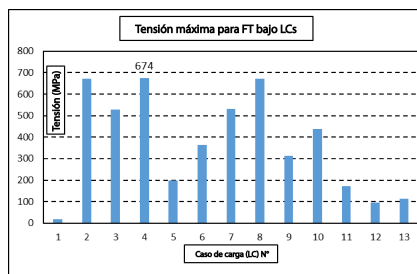


Figura 9. Esfuerzo máximo para el FT bajo todos los LC

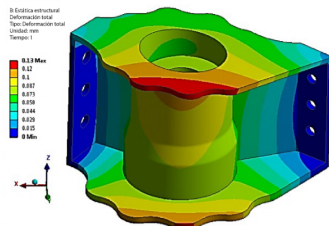


Figura 10. Deformación del FT bajo LC 4

Se proporciona un mayor entendimiento de la respuesta estructural, específicamente el campo de esfuerzos resultante y el factor de seguridad (FOS), en la Figura 11 y Figura 12, respectivamente. El FOS del *tulip* frontal (FT) es de 1,23 bajo el caso de carga crítica 4, lo que indica que el FT se encuentra seguro dentro del envoltorio de transporte. Estos análisis contribuyen a una comprensión integral del comportamiento estructural, evaluando márgenes de seguridad e identificando áreas potenciales para la optimización del diseño.

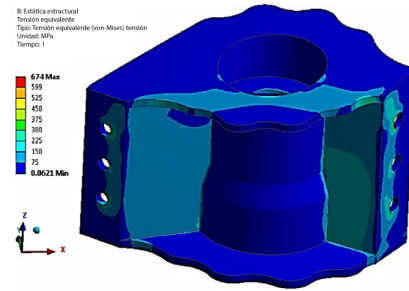


Figura 11. Esfuerzo equivalente del FT bajo LC 4

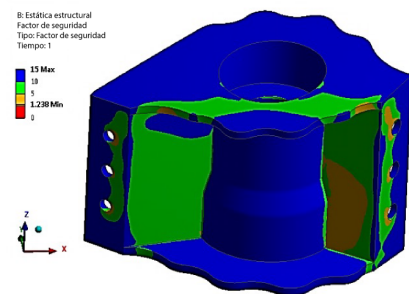


Figura 12. Factor de seguridad (FOS) del FT bajo LC 4

3.4. Análisis del *tulip* trasero (RT)

Se ha realizado el mallado libre del modelo del *tulip* trasero utilizando elementos Tet6, que son elementos tetraédricos con tres nodos y una función de forma cuadrática. Se implementa un refinamiento de malla en los agujeros de perno para capturar el gran gradiente de tensión en estos puntos críticos. Un estudio de independencia de la malla, como se ilustra en la Figura 13, demostró que la solución se volvió independiente del refinamiento de la malla a partir de 130 000 elementos. La Figura 14 muestra el modelo mallado del *tulip* trasero (RT). La Figura 15 ilustra las condiciones de contorno y las cargas aplicadas, representadas como fuerzas y momentos.

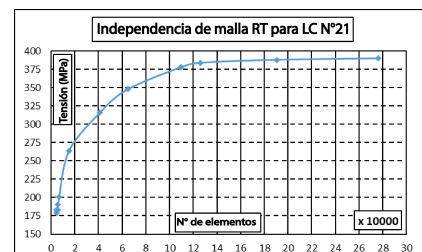


Figura 13. Independencia de la malla para el RT

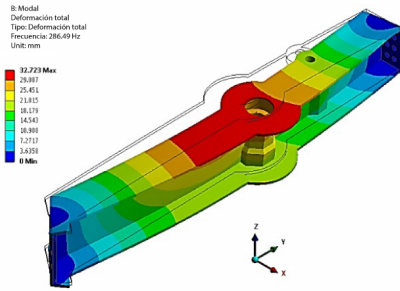


Figura 21. Forma modal fundamental del RT

Además, se ha realizado un análisis modal preactivado para evaluar los efectos de endurecimiento por esfuerzo. Se presenta una comparación entre las frecuencias modales libres y preactivadas para los *tulip* frontal y trasero en la Figura 22 y Figura 23, respectivamente. El análisis modal preactivado revela una disminución mínima en las frecuencias modales para el *tulip* frontal (FT). Para el *tulip* trasero (RT), no hay disminución en la frecuencia modal bajo el esfuerzo aplicado. Por lo tanto, el efecto de endurecimiento por esfuerzo para los *tulip* FT y RT es insignificante.

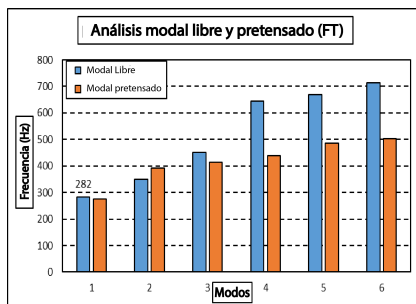


Figura 22. Análisis modal libre y preactivado del FT

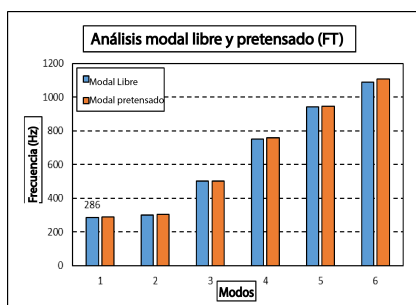


Figura 23. Análisis modal libre y preactivado del RT

Un análisis comparativo ofrece información sobre cómo las condiciones preactivadas afectan el comportamiento modal de los *tulip*, proporcionando detalles sobre la respuesta estructural bajo la influencia de tensiones preexistentes. Estos hallazgos mejoran la comprensión integral de las características dinámicas de los *tulip* frontal y trasero.

3.6. Análisis de pandeo

Se han realizado análisis de pandeo de los *tulip* frontal y trasero para determinar las cargas de pandeo y las correspondientes formas modales de pandeo [21]. Los resultados de estos análisis se muestran en la Figura 24 y Figura 25, que muestran el primer modo de pandeo para los *tulip* frontal y trasero, respectivamente, bajo sus casos de carga críticos.

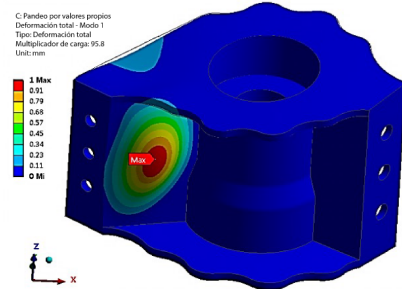


Figura 24. Primer modo de pandeo del FT

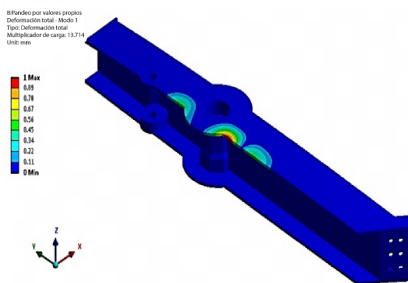


Figura 25. Primer modo de pandeo del RT

Los multiplicadores de carga de pandeo para los *tulip* frontal y trasero se determinaron como 95 y 13, respectivamente, bajo casos de carga críticos. Estos altos multiplicadores de carga sugieren que el pandeo no es un modo de fallo probable para los *tulip* del ala. Las formas modales ofrecen información crucial sobre la estabilidad estructural de los *tulip* bajo condiciones de carga específicas, mejorando la identificación de posibles modos de fallo y la determinación de márgenes de seguridad para los componentes de la estación del ala.

3.7. Optimización

Los radios actuales para todos los agujeros de perno de los *tulip* son de 4 mm. Este estudio revela que el máximo esfuerzo bajo un caso de carga crítico ocurre en los agujeros de perno. Para realizar un análisis de sensibilidad al esfuerzo, el diámetro de los agujeros de perno varía de 6 a 10 mm, utilizando el módulo de optimización de ANSYS [22]. La Figura 26 y la Figura 27 muestran las superficies de respuesta de esfuerzo en función de los radios de los agujeros de perno para el *tulip* frontal y el *tulip* trasero, respectivamente. Estas superficies muestran visualmente cómo los cambios

en los radios de los agujeros de perno influyen el máximo esfuerzo de los *tulip*.

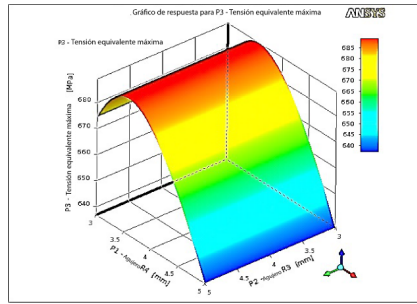


Figura 26. Superficie de respuesta para el esfuerzo máximo del FT

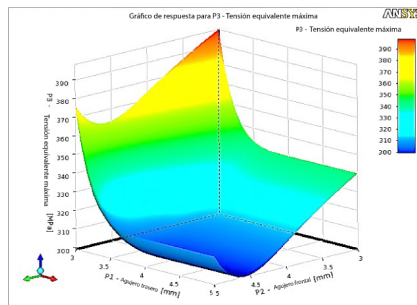


Figura 27. Superficie de respuesta para el esfuerzo máximo del RT

La Figura 26 indica que los radios de los pernos en el lado interior (P2) no tienen un impacto discernible en el valor máximo de esfuerzo del *tulip* frontal (P3). En contraste, los radios de los pernos en el lado exterior (P1) influyen de forma significativa en el valor máximo de esfuerzo del *tulip* frontal. Al aumentar los radios de los agujeros de perno en el lado exterior de 3 mm a 3,5 mm resulta en un aumento en el valor máximo de esfuerzo (P3); más allá de este punto, aumentos adicionales conducen a una disminución en el valor máximo de esfuerzo.

En la Figura 27 se muestra que los radios de los agujeros de perno en ambos lados frontal (P1) y trasero (P2) del *tulip* trasero tienen un impacto significativo en el valor máximo de esfuerzo (P3). Inicialmente, a medida que los valores de P1 y P2 aumentan desde 3 mm, el valor máximo de esfuerzo disminuye, alcanzando un mínimo a los 4,5 mm. Sin embargo, aumentos adicionales en los radios de los agujeros de perno incrementan el valor máximo de esfuerzo.

Este análisis de sensibilidad revela que el esfuerzo mínimo para el *tulip* frontal ocurre con un radio de agujero de perno de 5 mm, mientras que para el *tulip* trasero, un radio de 4,5 mm es óptimo. Estos parámetros de diseño reducen el esfuerzo máximo a 627 MPa y 286 MPa para el *tulip* frontal y trasero, respectivamente. Los agujeros de perno más grandes contribuyen

a un factor de seguridad (FOS) incrementado de 1,33. En consecuencia, la capacidad máxima de carga de la estación alar aumenta de 653 kg a 706 kg con este diseño optimizado. Este análisis de sensibilidad es crucial para optimizar el diseño de las conexiones atornilladas en los *tulip*, ayudando a identificar el diámetro más adecuado que minimiza las concentraciones de esfuerzos y mejora el rendimiento estructural general de los *tulip* frontal y trasero.

4. Conclusiones

Este estudio aborda una brecha significativa en la aplicación de investigaciones similares de vanguardia al centrarse en la influencia de las características de rigidez en la capacidad máxima de carga del ala de un avión de combate. Aunque estudios previos han explorado varios factores que afectan la integridad estructural de los componentes de las aeronaves, pocos han profundizado en el papel de la rigidez del ala y su impacto directo en la capacidad de carga. Esta investigación integra la rigidez del ala en el modelo de elementos finitos (FE) de los *tulip* aislados, proporcionando un análisis que predice con precisión la integridad estructural de la estación del ala. Además, al utilizar el submodelado como una técnica versátil y eficiente desde el punto de vista computacional, se introduce una metodología innovadora que llena un vacío en la literatura existente al mostrar su aplicabilidad a componentes estructurales complejos con un gasto computacional mínimo.

La validación de la hipótesis inicial mediante los datos obtenidos subraya la importancia de la rigidez del ala en la evaluación de la capacidad máxima de carga de la estación del ala. En conjunto, esta investigación mejora la comprensión del análisis estructural en ingeniería aeroespacial al proporcionar nuevos conocimientos y metodologías para abordar una brecha crítica en el campo. Los principales hallazgos de esta investigación se detallan de la siguiente manera:

tulip frontal

- Radio óptimo del agujero del perno: 5 mm
- Reducción máxima del estrés: 627 MPa

tulip trasero

- Radio óptimo del agujero del perno: 4,5 mm
- Reducción máxima del estrés: 286 MPa

Factor de seguridad (FOS)

- Aumentado a 1,33 con agujeros de perno más grandes

Capacidad máxima de carga

- Aumentada de 653 kg a 706 kg con el diseño optimizado

Identifica parámetros críticos de diseño para optimizar las conexiones atornilladas en los *tulip*, ayudando a determinar el diámetro más adecuado que minimice las concentraciones de estrés y mejore el rendimiento estructural general tanto del *tulip* frontal como del *tulip* trasero.

Una limitación notable de esta investigación es la exclusión de los sujetadores del análisis, basada en la suposición de una transferencia de carga perfecta entre los elementos estructurales del ala y los *tulip* del ala. Por lo tanto, este estudio no considera los posibles modos de falla asociados con los sujetadores.

Los futuros esfuerzos de investigación deberían explorar los siguientes aspectos para mejorar la integridad de los análisis estructurales. Abordar estos aspectos contribuiría significativamente a las evaluaciones estructurales de grandes conjuntos.

Efectos no lineales.

- Implicaciones de los efectos no lineales en la integridad estructural.

Patrones de malla.

- Efectos de los patrones de malla regular en los resultados de simulación.

Carga cíclica / Análisis de densidad espectral de potencia (PSD).

- Análisis de carga cíclica y PSD para evaluar el rendimiento estructural a largo plazo.

Contribuciones del autor

La totalidad de esta investigación, incluida la revisión de literatura, metodología, resultados y conclusiones, representa el trabajo del autor.

Agradecimientos

El autor agradece el apoyo de su departamento en la Universidad del Aire por proporcionar todos los recursos necesarios para esta publicación.

Conflictos de interés

El autor declara no tener conflictos de interés potenciales en relación con la investigación, autoría y publicación de este artículo.

Financiamiento

El autor no recibió apoyo financiero para la investigación, autoría y publicación de este artículo.

Declaraciones de disponibilidad de datos

El estudio actual está disponible del autor correspondiente previa solicitud razonable.

Referencias

- [1] K. Sinha, T. Klimmek, M. Schulze, and V. Handoyo, "Loads analysis and structural optimization of a high aspect ratio, composite wing aircraft," *CEAS Aeronautical Journal*, vol. 12, no. 2, pp. 233–243, Apr 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s13272-021-00494-x>
- [2] B. D. Upadhyay, S. S. Sonigra, and S. D. Daxini, "Numerical analysis perspective in structural shape optimization: A review post 2000," *Advances in Engineering Software*, vol. 155, p. 102992, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2021.102992>
- [3] N. Zimmermann and P. H. Wang, "A review of failure modes and fracture analysis of aircraft composite materials," *Engineering Failure Analysis*, vol. 115, p. 104692, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104692>
- [4] R. L. Muhanna and S. Shahi, *Uncertainty in Boundary Conditions—An Interval Finite Element Approach*. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 157–167. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-030-40814-5_20
- [5] T. Martins, V. Infante, L. Sousa, A. Fonseca, P. Antunes, A. Moura, and B. Serrano, "Numerical and experimental study of aircraft structural health," *International Journal of Fatigue*, vol. 132, p. 105348, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.105348>
- [6] J. Lim, C. You, and I. Dayyani, "Multi-objective topology optimization and structural analysis of periodic spaceframe structures," *Materials & Design*, vol. 190, p. 108552, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108552>
- [7] C. Touzé, A. Vizzaccaro, and O. Thomas, "Model order reduction methods for geometrically nonlinear structures: a review of nonlinear techniques," *Nonlinear Dynamics*, vol. 105, no. 2, pp. 1141–1190, Jul 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11071-021-06693-9>

- [8] C. You, M. Yasaee, S. He, D. Yang, Y. Xu, I. Dayyani, H. Ghasemnejad, S. Guo, P. Webb, J. Jennings, and G. Federico, "Identification of the key design inputs for the FEM-based preliminary sizing and mass estimation of a civil aircraft wing box structure," *Aerospace Science and Technology*, vol. 121, p. 107284, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.107284>
- [9] A. Haider Bhutta, "Appropriate boundary condition for finite element analysis of structural members isolated from global model," *NED University Journal of Research*, vol. 18, no. 3, pp. 61–75, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.35453/NEDJR-STMECH-2021-0001>
- [10] E. Narvydas, N. Puodziuniene, and T. A. Khan, "Application of finite element sub-modeling techniques in structural mechanics," *Mechanika*, vol. 27, no. 6, pp. 459–464, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5755/j02.mech.25962>
- [11] J. Jang and S. Ahn, "Fe modeling methodology for load analysis and preliminary sizing of aircraft wing structure," *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*, vol. 6, no. 2, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.15394/ijaaa.2019.1301>
- [12] A. Mishra, S. Pal, G. Singh Malhi, and P. Singh, "Structural analysis of UAV airframe by using FEM techniques: A review," *International Journal of Advanced Science and Technology*, vol. 29, pp. 195–204, 06 2020. [Online]. Available: <https://is.gd/4NRfx9>
- [13] S. Henclik and A. Maurin, "Determination of the stiffness matrix of flat springs for modeling of the boundary condition at a pipeline support," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 123, pp. 102–116, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2018.12.047>
- [14] M. d. C. Alves, F. N. Corrêa, J. R. M. de Sousa, and B. P. Jacob, "A coupled, global/local finite element methodology to evaluate the fatigue life of flexible risers attached to floating platforms for deepwater offshore oil production," *Mathematics*, vol. 12, no. 8, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/math12081231>
- [15] V. Karnozov, "China's fighter aircraft detailed," *Defence Review Asia*, vol. 13, no. 1, pp. 42–47, 2019. [Online]. Available: <https://is.gd/dM2DHD>
- [16] A. G. Manca and C. M. Pappalardo, "Topology optimization procedure of aircraft mechanical components based on computer-aided design, multibody dynamics, and finite element analysis," in *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III*, V. Ivanov, I. Pavlenko, O. Liaposhchenko, J. Machado, and M. Edl, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 159–168. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50491-5_16
- [17] A. Aabid, M. A. M. B. M. Zakuan, S. A. Khan, and Y. E. Ibrahim, "Structural analysis of three-dimensional wings using finite element method," *Aerospace Systems*, vol. 5, no. 1, pp. 47–63, Mar 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s42401-021-00114-w>
- [18] P. Wang, Y. Chen, R. Pei, C. Lian, K. Zhang, and Y. Zhou, "Buckling and post-buckling analysis of composite wing box under loads with torsion-bending coupling," *Thin-Walled Structures*, vol. 193, p. 111266, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111266>
- [19] N. Yang, "Methodology of aircraft structural design optimisation," *International Journal of Computer Applications in Technology (IJCAT)*, vol. 70, no. 3, pp. 145–154, 2022. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.1504/IJCAT.2022.130874>
- [20] A. Basutkar, K. Baruah, and S. K. Kudari, "Frequency analysis of aircraft wing using FEM," in *Recent Trends in Mechanical Engineering*, G. S. V. L. Narasimham, A. V. Babu, S. S. Reddy, and R. Dhanasekaran, Eds. Singapore: Springer Singapore, 2020, pp. 527–533. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-981-15-1124-0_46
- [21] B. Ravi Kumar, "Investigation on buckling response of the aircraft's wing using finite-element method," *Australian Journal of Mechanical Engineering*, vol. 18, no. sup1, pp. S122–S131, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2514/1.C034818>
- [22] S. De, M. Jrad, and R. K. Kapania, "Structural optimization of internal structure of aircraft wings with curvilinear spars and ribs," *Journal of Aircraft*, vol. 56, no. 2, pp. 707–718, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2514/1.C034818>



CUENTACUENTOS BASADO EN IA GENERATIVA PARA PROMOVER LA INCLUSIÓN DE PERSONAS CON DISCAPACIDADES

STORYTELLING UTILIZING GENERATIVE AI TO FOSTER INCLUSION OF INDIVIDUALS WITH DISABILITIES

Keren Mitsue Ramírez Vergara^{1,*} , Asdrúbal López-Chau¹ ,
 Rafael Rojas Hernández¹ 

Recibido: 27-03-2024, Recibido tras revisión: 05-06-2024, Aceptado: 18-06-2024, Publicado: 01-07-2024

Resumen

En este artículo se presenta el diseño completo y la evaluación de un sistema cuentacuentos digital destinado a niños de entre 4 y 6 años en Latinoamérica. Este sistema está basado en inteligencia artificial generativa. Se realizaron pruebas que abarcaron el funcionamiento del sistema, la diversidad de contenidos, los tiempos de generación, la evaluación de voz, entonación, velocidad y calidad de pronunciación. Los resultados confirman que el sistema funciona correctamente y es intuitivo. Las historias generadas muestran un alto grado de diversidad, ya que al calcular los índices de Jaccard, el valor máximo encontrado fue de 0,2 en las evaluaciones de treinta cuentos analizados. Como era de esperarse, los tiempos de generación aumentan conforme se incrementa la longitud de los cuentos. Se identificó que la voz que mejor se adapta para contar los cuentos es Onyx de la TTS de OpenAI. Sin embargo, se observaron errores de pronunciación en todas las voces del modelo TTS. De acuerdo con el análisis realizado, el sistema crea historias diferentes, que promueven valores en los niños de habla hispana, fomentando la importancia de la inclusión de personas con discapacidad. Cabe destacar que en ningún cuento se encontró contenido no apto para niños.

Palabras clave: ChatGPT, cuentacuentos, discapacidad, IA generativa, inclusión

Abstract

This article presents the comprehensive design and evaluation of a digital storytelling system tailored for Latin American children aged 4 to 6, leveraging generative artificial intelligence. Tests were conducted to assess the system's functionality, content diversity, generation times, and voice quality, including intonation, speed, and pronunciation. The results substantiate the system's operational efficacy and user-friendly interface. The stories generated demonstrate substantial diversity, as indicated by Jaccard indices calculations, which reveal a maximum value of 0.2 derived from evaluating 30 distinct stories. As expected, there was a proportional increase in story generation times relative to their length. 'Onyx' from OpenAI's text-to-speech (TTS) was identified as the most appropriate voice for storytelling. Nonetheless, pronunciation inaccuracies were observed across all tested TTS model voices. The analysis demonstrated that the system generates a variety of stories that foster value formation in Spanish-speaking children, thereby promoting the importance of including individuals with disabilities. Notably, all content within the stories was found to be suitable for children, with no inappropriate material detected in any of the narratives.

Keywords: ChatGPT, Storytelling, Disability, AI Generative, Inclusion

^{1,*}Centro Universitario UAEM ZUMPANGO, Universidad Autónoma del Estado de México. Zumpango, Estado de México. México. Autor para correspondencia ✉: kramirezv003@alumno.uaemex.mx.

Forma sugerida de citación: Ramírez Vergara, K. M.; López-Chau, A. y Rojas Hernández, R. "Cuentacuentos basado en IA generativa para promover la inclusión de personas con discapacidades," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 32, pp. 101-113, 2024. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n32.2024.10>.

1. Introducción

La inteligencia artificial generativa (IAG) presenta un avance significativo en el campo de la inteligencia artificial (IA), siendo capaz de producir una amplia gama de contenidos, como textos, imágenes, código fuente para distintos lenguajes de programación, diseño de escenarios, argumentos legales y videos de alta definición, entre otros.

Para la generación automática de textos, actualmente se usan modelos de lenguaje de gran tamaño (*large language models*, LLM), los cuales producen documentos inéditos, basados en una gran cantidad de texto extraído de internet. Estas creaciones son posibles gracias a las arquitecturas modernas de aprendizaje por refuerzo con retroalimentación humana y de aprendizaje profundo [1] y, en particular, a los transformadores.

ChatGPT ha emergido como una poderosa herramienta en diversos ámbitos, como educación, mercadotecnia, finanzas, servicio al cliente, entre otros. En el área educativa, la aplicación de la inteligencia artificial generativa de textos ha aumentado considerablemente a nivel mundial en la era digital [2], ya que puede apoyar en la comprensión de conceptos al explicarlos en términos más sencillos, en la resolución de ejercicios al demostrar una variedad de enfoques, y en el desarrollo de habilidades de lectura y comprensión de textos en los alumnos de los primeros años escolares, entre muchas otras aplicaciones.

Esta nueva tecnología impulsa la transición hacia una educación más inmersiva, dinámica, participativa e inclusiva, destacando la importancia de los docentes y estudiantes como agentes de cambio en esta transformación [3]. En el futuro, la integración de sistemas como ChatGPT en la educación debería impulsar el desarrollo de las capacidades humanas, al mismo tiempo que contribuya positivamente a la reducción de las desigualdades y fomente los valores fundamentales.

Una excelente manera de fomentar estos valores es a través de la narración de cuentos a niños, pues esta actividad facilita la comprensión del mundo, estimula la imaginación y promueve la resolución de conflictos. Incluso, tiene el poder de transmitir mensajes importantes, ampliar horizontes y fomentar la participación activa en el entorno, así como promover habilidades de comunicación, debate o interpretación [4].

Como herramienta educativa, la narración de cuentos resulta eficaz en el proceso de enseñanza-aprendizaje al hacer que la adquisición de conocimientos sea divertida. Si bien, la narración de cuentos ayuda a generar reflexiones y considerar las moralejas; es un proceso que se necesita enfatizar desde una edad temprana, para estimular adecuadamente el desarrollo cognitivo e intelectual del niño [4].

Por lo tanto, es importante enriquecer la experiencia de contar cuentos con valores humanos desde una

edad temprana. Es por ello por lo que el sistema propuesto en este artículo, está dirigido a niños entre 4 y 6 años, porque es una etapa en la cual los niños comienzan a familiarizarse con el texto escrito.

La orientación del sistema hacia la educación inclusiva responde a la creciente importancia que se ha dado en las últimas décadas en la eliminación de la discriminación hacia los grupos más vulnerables. La intención es contribuir a la disminución de esta problemática, específicamente en México, donde la implementación de la educación inclusiva es escasa. Según informes de la OCDE (2019), México se encuentra entre los países con menor nivel de inclusión educativa: solo el 2,85 % de los alumnos con discapacidad reciben educación, a pesar de que aproximadamente el 15 % de la población estudiantil presenta alguna discapacidad [5]. Además, según el Banco Mundial, en 2021, aproximadamente hay 85 millones de personas con algún tipo de discapacidad en América Latina y el Caribe [6], y se ha observado pocos avances en la mejora de los programas de empleo, educación y servicios de salud para las personas con discapacidad.

En este artículo se muestra el diseño y la implementación de un sistema basado en inteligencia artificial generativa –en específico, ChatGPT, junto con otras tecnologías– para la creación automática de cuentos dirigidos a niños de habla hispana. Los dos objetivos principales del sistema son los siguientes: a) inculcar en la niñez los valores de respeto, tolerancia y empatía hacia personas con discapacidad a través de historias, b) promover las habilidades de lectura y comprensión en niños de habla hispana.

Las principales contribuciones de este artículo son las siguientes:

1. Se propone una alternativa para abordar el desafío de fomentar la inclusión de personas con discapacidades en América Latina, mediante una solución tecnológica del estado del arte.
2. Se presenta el diseño completo de un sistema de software basado en IAG orientado a generar y contar historias para niñas y niños de habla hispana.
3. Se muestra el diseño de un prompt especialmente diseñado para generar distintos cuentos que promueven valores de empatía y respeto hacia personas con discapacidad.
4. Se realiza una evaluación del sistema en cuanto a la diversidad de historias generadas, así como entonación, velocidad y calidad de pronunciación en las narrativas de los cuentos.
5. Se proporciona públicamente el código fuente completo del sistema y también los archivos complementarios para fines no comerciales a través de un repositorio de github [7].

1.1. Revisión de literatura

Se llevó a cabo una revisión exhaustiva de la literatura utilizando las bases de datos electrónicas: IEEE Explore, Science Direct y Scopus. Los idiomas de los artículos buscados fueron inglés y español. Se restringieron los resultados a artículos de revista, libros y artículos de conferencia publicados entre los años 2021 y 2024. Esta selección de fechas se basó en el hecho de que la inteligencia artificial generativa de texto se hizo accesible para el público a nivel mundial en 2021. En total se recolectaron 91 documentos, de los cuales 85 son artículos, 5 son libros y 1 es un manual.

Las búsquedas se realizaron usando las palabras claves y operadores lógicos mostrados a continuación:

- “*inclusiveness AND AI AND education*”,
- “*disability AND AI AND education*”,
- “*storytelling AND inclusiveness AND education*”,
y
- “*apps AND inclusiveness AND AI*”

El análisis de las fuentes obtenidas de bases de datos reconocidas, revela que Scopus contribuyó con 18 documentos, ACM Digital Library con 4, ScienceDirect con 47 e IEEE Explore con 4 documentos. Se descartaron los artículos que no tenían relación directa con el presente artículo, quedando solamente 23 artículos.

La revisión del estado del arte se centró en cuatro categorías fundamentales que fueron identificadas como objeto de investigación:

- La aplicación de cuentos digitales en el desarrollo infantil.
- La aplicación de la inteligencia artificial en la creatividad.
- El impacto de cuentos digitales en el desarrollo infantil, y
- Su potencial para promover la educación inclusiva.

1.1.1. Cuentos digitales en el desarrollo infantil

La importancia y el impacto significativo que los cuentos digitales tienen en el desarrollo infantil han sido resaltadas por varios autores. Una historia se define como una serie de oraciones que describen eventos o experiencias, generalmente relacionadas con actores principales [8].

A través de los cuentos se destacan temas como la compasión, la solidaridad y la empatía. Además de lo mencionado anteriormente, Juppi señala que un cuento digital incorpora elementos tales como texto, música,

efectos de audio o voz grabada del autor, y sugiere que la duración de la historia digital dure aproximadamente entre 2 y 4 minutos [9]. Este mismo autor aclara que las narraciones digitales, a menudo, buscan empoderar a las personas; aumentando su crecimiento personal, el control de su propia vida y la capacidad de actuar como un ciudadano consiente. Este empoderamiento se logra gracias a la habilidad técnica y creativa de expresión y comunicación que caracteriza a las narraciones digitales. Finalmente, Juppi sugiere que las instituciones educativas de diferentes niveles académicos aprovechen la narración digital como herramienta para fomentar la educación inclusiva, la empatía, el respeto, el compromiso cívico, y la participación democrática.

El estudio de la influencia de los cuentos digitales en niños ha sido objeto de estudios previos. Bratitsis y Ziannas exploraron el desarrollo de la empatía social en niños mayores de 6 años mediante la narración digital interactiva del cuento “El pollito triste”, desarrollada en el entorno de programación Scratch [8]. En el estudio participaron 25 niños de sexto grado de educación infantil, quienes leyeron el cuento y participaron en actividades interactivas diseñadas para observar sus reacciones emocionales. Los resultados fueron positivos, evidenciando el interés y la sensibilidad hacia el personaje principal, así como su comprensión de la empatía y su aplicación en situaciones cotidianas. Este estudio demostró que las historias digitales facilitan la comprensión de valores inclusivos y la empatía entre los niños.

Por otra parte, Tseng *et al.* desarrollaron una herramienta llamada PlushPal que permite convertir juguetes de peluche en objetos digitales interactivos usando técnicas de aprendizaje automático. PlushPal permite a los niños hacer que sus peluches digitalizados reconozcan gestos y emitan sonidos personalizados [10]. Además, combina técnicas de narración de cuentos para dar vida a los muñecos, agregándoles habilidades, lo que permite a los niños conectar con recuerdos positivos y experiencias previas.

1.1.2. Inteligencia artificial generativa y su apoyo en la creatividad

La creatividad puede definirse como la capacidad de crear algo nuevo, único y útil [11]. Actualmente, esta capacidad puede ser apoyada por sistemas de IAG. Por ejemplo, Haase y Hanel argumentan que los chatbots, al contar con una amplia base de datos, pueden realizar una recombinación de ideas para generar contenido con niveles similares de creatividad, en especial en el nivel de la creatividad cotidiana [11].

Por otro lado, Li considera que la IA es una herramienta valiosa para los escritores humanos al potenciar ideas cada vez más complejas, con capacidad de expandirse y divergir [12]. Además, prevé que una futura colaboración entre la IA y los humanos será partici-

pativa, dinámica e interactiva. Por su parte, Habib *et al.* evalúan la creatividad en sistemas de IAG en el contexto educativo; analizando la flexibilidad, la elaboración y originalidad de las respuestas mediante pruebas de aceptación del usuario [1]. En [13] se destaca la mejora en el pensamiento divergente y la oferta de diferentes perspectivas. También se enfatiza que una integración cuidadosa de la IAG en la educación creativa, promueve una relación simbiótica entre la creatividad humana y la IA. Li coincide en esta idea, sugiriendo que el uso ético de ChatGPT podría fomentar la inclusión y la diversidad en la educación [12].

1.1.3. Inteligencia artificial en el desarrollo infantil

En una investigación reciente, Kalantari *et al.* [14] estudiaron el impacto de la IA en la educación infantil. En este estudio se llevó a cabo un análisis cualitativo exploratorio en el que participaron niños de entre 6 y 7 años, junto con sus padres, para evaluar una aplicación de software llamada "Kids Story Builder". Los resultados del estudio revelaron que la tecnología refuerza la comprensión y vínculo de los niños con ellos mismos y sus familias, promoviendo incluso el pensamiento narrativo durante la creación de historias.

Jiahong y Yang [15] presentan los resultados de una revisión exploratoria que evalúa, sintetiza y expone la literatura más reciente sobre la IA en la educación infantil temprana. Sin embargo, el estudio aborda de manera superficial cómo se utiliza la IA en estos contextos.

1.1.4. Inteligencia artificial para desarrollar una educación inclusiva

Las tecnologías de inteligencia artificial (IA) y las nuevas herramientas tecnológicas están dejando una huella significativa en la sociedad y se están integrando cada vez más en el ámbito educativo [16]. Por esta razón, varios autores sugieren que es crucial poner en marcha estas herramientas de manera adecuada en la educación. Aunque en la literatura revisada no se encontraron implementaciones específicas de la IA generativa (IAG) en la educación inclusiva, se observó la existencia de guías, consejos y recomendaciones destinadas a garantizar un impacto positivo.

Estas tecnologías tienen el potencial de transformar la educación al modificar las experiencias de los alumnos tanto dentro como fuera de las aulas [16]. Yu [17] destaca que la esencia educativa de ChatGPT radica en facilitar el acceso al conocimiento, crear contenido y promover la inclusión educativa. Además, resalta que la gestión ética, la transparencia y la responsabilidad son desafíos importantes planteados por la IA en el ámbito educativo. ChatGPT no solo debe mejorar las capacidades humanas, sino también contribuir de ma-

nera ética, guiando hacia una educación más inmersiva, dinámica, participativa e inclusiva.

Li y Lan [18] coinciden con Salas-Pilco *et al.* [16] y proporcionan una guía para una adopción adecuada de la tecnología, enfatizando la necesidad de promover la inclusión social.

2. Materiales y métodos

El sistema basado en IAG para generar cuentos con contenido que promueven la inclusión de personas con discapacidad, fue diseñado y desarrollado con base en la metodología Kanban, la cual permitió una entrega continua de tareas, ya que se pudo visualizar el progreso en las diferentes secciones y mantener un seguimiento de las tareas pendientes. Esta metodología fue elegida debido a su enfoque de entrega continua, donde el equipo trabaja en las tareas según van surgiendo, sin roles específicos asignados. Cualquier miembro del equipo tomó nuevas tareas de la lista según sea necesario. Además, se utilizó una combinación de tecnologías modernas para garantizar su robustez y eficiencia.

Como lenguaje de programación se usó TypeScript, debido a su capacidad para crear aplicaciones web robustas. TypeScript puede compilar su código a JavaScript y ejecutarse en cualquier navegador, plataforma o sistema operativo [19].

Además de su potencial técnico, TypeScript es un lenguaje de programación de código abierto que amplía la sintaxis de JavaScript, garantizando la compatibilidad con los navegadores, servidores y sistemas operativos. Esta elección de la tecnología se vio respaldada por la facilidad de integración con Angular y otras bibliotecas, lo que facilitó el desarrollo y la escalabilidad de la aplicación [20].

En complemento con TypeScript, se utilizó el framework Angular para la generación de las interfaces de usuario del sistema. Entre las ventajas de Angular se destaca su eficiente manejo del DOM (*Document Object Model*) y su capacidad para crear aplicaciones web escalables con TypeScript. Además, Angular es conocido por su facilidad de aprendizaje y su capacidad para aumentar la productividad del desarrollo, lo que lo convirtió en una elección natural para este proyecto.

Se integró ChatGPT en la aplicación para implementar la funcionalidad de generación de cuentos. Es un colaborador creativo debido a su capacidad para generar ideas, dar forma a los personajes y crear líneas argumentales para las historias. ChatGPT ha sido utilizado con éxito en el campo de la narración interactiva y los juegos, permitiendo a los usuarios participar en la creación de experiencias narrativas dinámicas y personalizadas, donde la forma de la trama se ajusta a los gustos y experiencias del usuario. Además, tiene la capacidad de enriquecer cuentos o poemas con una variada selección de palabras realistas, emociones y

personajes [21]. Estas características lo hacen muy útil y atractivo para la generación de cuentos con contenido inclusivo para las personas con discapacidad.

En la implementación de la aplicación, se consideraron tres etapas: el desarrollo de interfaces de usuario, la generación del prompt para el modelo y la implementación de la API de OpenAI. La arquitectura general del sistema desarrollado se resume de manera gráfica en la Figura 1.

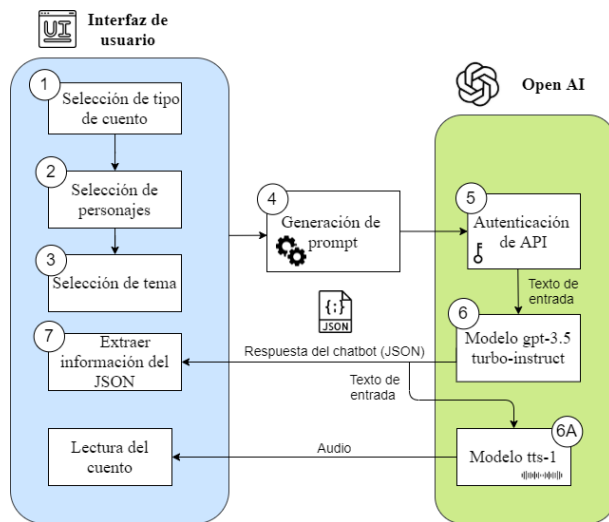


Figura 1. Arquitectura del sistema

2.1. Diseño de la estructura del prompt

Los LLM son entrenados con una gran cantidad de información, superando lo que una sola persona promedio puede leer en toda su vida. Esta basta cantidad de información hace posible que los LLM puedan generar textos prácticamente de cualquier tema que se les solicite. Sin embargo, el contar con instrucciones precisas resulta esencial en el proceso creativo [22], lo anterior es debido a que la calidad de las respuestas que genera ChatGPT dependen en gran medida de las solicitudes (llamadas prompts, o promotores de respuestas) que se le realizan, es responsabilidad del usuario redactar cuidadosamente los estimuladores de respuestas que generen contenido útil.

En la primera etapa del desarrollo del sistema, se reconoció la importancia de contar con una estructura general de un prompt adecuado que orientará al sistema hacia la generación de resultados coherentes, relevantes, precisos y adecuados para niños de habla hispana. Con este fin, se definieron tres elementos fundamentales de dicha estructura que el usuario puede personalizar, para garantizar una generación efectiva de cuentos. Estos son los siguientes:

1. *Tipo de cuento.* Se refiere a la extensión del cuento, es decir, el número de palabras que contiene. Nos basamos en la clasificación mostrada en [23], donde se mencionan que los tres tipos de cuentos infantiles son: microcuento, cuento flash y cuento corto; los cuales constan aproximadamente de 300, 750 y 2000 palabras, respectivamente.
2. *Personajes.* Este elemento de la estructura del prompt diseñado, hace referencia a las características físicas y de personalidad de cada uno de los personajes que aparecen en los cuentos. Inicialmente, estos personajes fueron sugeridos por ChatGPT; posteriormente se seleccionaron a los que consideraron apropiados para el objetivo del sistema: inculcar en la niñez los valores de respeto, tolerancia y empatía hacia las personas con discapacidad. Debido a la extensión de los cuentos, se decidió que cada historia puede tener un máximo de tres personajes.
3. *Tema.* Se trata del contexto o tema en el que se desarrollará la historia. Estos temas están centrados en fortalecer los valores éticos y de inclusión, como el respeto, la tolerancia y cuidado del medioambiente. Debido a que el sistema está diseñado para niños, y que los cuentos son distintos unos a otros en cada solicitud de generación de historia, se decidió incluir una cantidad máxima de cuatro temas.

En el bloque (4) de la Figura 1, se genera el prompt correspondiente a partir de los parámetros seleccionados por el usuario, el cual guiará al modelo para obtener resultados precisos y adecuados para los niños. La estructura propuesta incluye el rol que debe adoptar ChatGPT para generar las historias, así como las instrucciones precisas sobre el formato en que debe devolver la respuesta. Esta estructura se muestra en la Figura 2. En dicha figura, los parámetros mostrados entre signos de llave como `{tipo_de_cuento}`, `{numero_de_palabras}`, etc., son sustituidos por valores específicos que el usuario (niño o niña) elija. Esto corresponde a los bloques (1), (2) y (3) de la arquitectura mostrada en la Figura 1. Además, se puntualizaron las características de los cuentos para obtener los resultados esperados. Las observaciones fueron las siguientes:

1. *Definición del cuentacuentos.* Se establece que el modelo es un cuentacuentos que inculca valores a personas con discapacidad.
2. *Formato de respuesta.* Se indica que la respuesta debe ser en formato JSON y se define su estructura.

Eres un cuentacuentos creativo que inculca valores en sus cuentos para niños de latinoamérica, los cuentos son divertidos e interesantes, y a veces misteriosos.

La respuesta debe ser en formato JSON con la siguiente estructura:

```
{
  'titulo': string,
  'personajes': [nombre del personaje],
  'contenido': string
}
```

Crea un cuento de {tipo_de_cuento} con {número_de_palabras} palabras sobre el tema {tema_a_tratar}, en el que participen los siguientes personajes:

- {nombre_del_personaje_uno}, un {ocupación_del_personaje_uno} de nacionalidad {nacionalidad_del_personaje_uno} con las siguientes características físicas: {características_físicas_del_personaje_uno}.

La personalidad de {nombre_del_personaje_uno} es {personalidad_del_personaje_uno}.

- {nombre_del_personaje_dos}, un {ocupación_del_personaje_dos} de nacionalidad {nacionalidad_del_personaje_dos} con las siguientes características físicas: {características_físicas_del_personaje_dos}.

La personalidad de {nombre_del_personaje_dos} es {personalidad_del_personaje_dos}.

- {nombre_del_personaje_tres}, un {ocupación_del_personaje_tres} de nacionalidad {nacionalidad_del_personaje_tres} con las siguientes características físicas: {características_físicas_del_personaje_tres}.

La personalidad de {nombre_del_personaje_tres} es {personalidad_del_personaje_tres}.

Consideraciones para el cuento:

- El cuento debe ser original, por favor, esfuérzate en que no se repitan los cuentos.

- Si hay personajes con alguna discapacidad, asegúrate de que sean los protagonistas. Enfoca la atención en ellos para que la trama del cuento resalte el valor de {tema_a_tratar} hacia los personajes con discapacidad.

- Evita colocar en el cuento la descripción física y de personalidad de los personajes, solo menciona implícitamente cual es la discapacidad del personaje, si así la tuvieran.

- El contexto en el que se desarrollan los personajes debe ser ambientado en la nacionalidad del protagonista o los protagonistas, ya sean lugares turísticos, pueblos, costumbres, cultura, ideologías, economía, etc. Debes ser específico en el lugar en el que se encuentran, puedes mencionar nombre de los lugares.

- Puedes elegir el estilo narrativo entre monólogo, narración en segunda persona, narración epistolar, narración como testigo, narración omnisciente, etc. además de cambiar la atmósfera, el ambiente y el simbolismo; la idea es crear un cuento original, creativo y único o inédito que inculque valores a los niños.

- Es importante que los cuentos no sean repetidos en cada una de las iteraciones que se realicen, debe de cambiar el contexto, ambiente, el nombre del cuento, su trama y la forma de narración.

- Es importante que el cuento deje un mensaje o impacto sobre los valores. Este mensaje no debe ser explícito en el cuento, debe ser tratado con una intención didáctica (el niño debe ser capaz de comprender el mensaje o valores a lo largo del desarrollo del cuento).

Figura 2. Prompt para la generación de cuentos

- 3 *Creación del cuento.* Se instruye al sistema para crear un cuento utilizando los parámetros entre llaves, que serán reemplazados por los valores elegidos por el usuario.
- 4 *Consideraciones para el cuento.* En esta sección se indica que el cuento debe ser original y centrarse en personajes con alguna discapacidad, quienes serán los protagonistas. El objetivo es reflejar las dificultades y conflictos que estas personas enfrentan en la vida real y cómo, a través de valores, se pueden superar las barreras y desafíos diarios. Para asegurar que el contexto en el que se desenvuelven los personajes sea realista y auténtico, se solicitó que el escenario del cuento incluya lugares, ideas, costumbres o historias relacionadas con la nacionalidad de los personajes, específicamente de países de Latinoamérica y el Caribe.

2.2. Conexión con ChatGPT

La tercera fase implica la integración de la API de OpenAI en el sistema desarrollado. Esta API proporciona una amplia gama de servicios para el procesamiento del lenguaje natural, síntesis de habla, generación de texto y otras funcionalidades no relevantes para los propósitos del sistema propuesto.

Para acceder a los servicios de OpenAI, se requiere de una autenticación mediante una clave API proporcionada por la plataforma (ver bloque ⑤ de la Figura 1). Es importante tener en cuenta que el uso de esta API está sujeto a tarifas, dependiendo del volumen y tipo de solicitudes realizadas.

Para la generación de las historias se utilizó el modelo gpt-3.5-turbo (bloque ⑥ de la arquitectura mostrada en Figura 1), usando la siguiente configuración de parámetros:

1. *Mensaje.* Este parámetro acepta un arreglo de objetos mensaje, que pueden ser en el rol de sistema, usuario o asistente, y su contenido [24]. Para el sistema desarrollado, el mensaje tiene la estructura mostrada en la Figura 2.
2. *Modelo.* Se usó el modelo gpt-3.5-turbo-instruct.
3. *Número de tokens.* Este parámetro define el límite máximo de tokens que el generador puede producir en una sola solicitud. Para nuestro caso, se estableció el valor de 2048 tokens.
4. *Temperatura.* Este parámetro controla el nivel de variabilidad y originalidad en el texto generado por el modelo. Una temperatura más alta produce respuestas más diversas y creativas, pero también aumenta la probabilidad de obtener respuestas incoherentes o irrelevantes. Por lo tanto,

se utilizó una temperatura de 0.5 para la aplicación.

El modelo devuelve el contenido generado en formato JSON. La respuesta obtenida es procesada por la aplicación, extrayendo los contenidos y mostrándolos en la interfaz de usuario (bloque ⑦ de la arquitectura). Lo que el niño visualiza es la historia generada en forma de texto, con las imágenes de los personajes que intervienen en el cuento.

Además de mostrar el cuento en forma texto, el sistema desarrollado permite la narración las historias generadas mediante el uso de voces sintéticas. Esta funcionalidad se implementó debido a que los usuarios para los que fue desarrollada la aplicación son niños en edad de aprender a leer. Para lograr esto, se usó también la API TTS (Text To Speech) de OpenAI (bloque ⑥A en Figura 1). Esta última permite elegir seis voces integradas (aleación, eco, fábula, ónice, nova y brillo), las cuales pueden utilizarse para realizar narraciones en varios idiomas, incluyendo el español [25].

2.3. Medición de similitud entre cuentos

Una de las principales características del sistema cuentacuentos es la capacidad de generar cuentos diferentes en cada ejecución. Para medir esta diversidad, se usó el índice de Jaccard.

El índice de Jaccard es una medida estadística utilizada para comparar la similitud y la diversidad entre dos conjuntos, se calcula como se muestra en la ecuación (1).

$$J(A, B) = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|} \quad (1)$$

Donde A y B son los conjuntos a comparar; los valores de este índice están entre 0 y 1, donde 0 indica ninguna similitud entre los conjuntos y 1 indica que los conjuntos comparados son idénticos.

En el estudio de la similitud entre cuentos, se implementó un preprocesamiento que incluye las siguientes etapas:

- *Transformación de texto.* Todos los caracteres se convirtieron a minúsculas para garantizar la uniformidad en el análisis.
- *Limpieza de textos.* Se eliminaron todos los signos de puntuación, nombres de personajes, nacionalidades, números y cualquier carácter no alfabético. Además, se eliminaron los espacios extra para mantener la coherencia del texto.
- *Lematización.* Este proceso implica la conversión de una palabra a su forma base o lema. Esta transformación permite que palabras diferentes, pero con significados similares, sean consideradas como la misma entidad. En los cuentos generados,

las distintas conjugaciones verbales se identifican como la misma palabra base; se empleó la biblioteca spaCy, utilizando el modelo preentrenado denominado es_core_news_md, diseñado específicamente para el idioma español. Se aplicó el proceso de lematización a todas las palabras del documento.

3. Resultados y discusión

Se realizó una prueba de funcionamiento del sistema para verificar la correcta generación de cuentos. Posteriormente, se midió la diversidad entre los contenidos generados, y se llevó a cabo un análisis de las voces utilizadas en la producción de los cuentos. La prueba del sistema de cuentacuentos se llevó a cabo en un navegador web, utilizando una computadora con sistema operativo Windows 10.

3.1. Pruebas de funcionamiento

La prueba de funcionamiento del sistema consistió en ingresar los parámetros elegidos por un usuario. Para propósitos demostrativos, se presentan los siguientes:

1. Se seleccionó un microcuento utilizando la interfaz mostrada en la Figura 3.



Figura 3. Interfaz de selección del tipo de cuento

2. Se eligieron tres personajes para el cuento: Andrés, Fernanda y Omar, esto se muestra en la Figura 4.

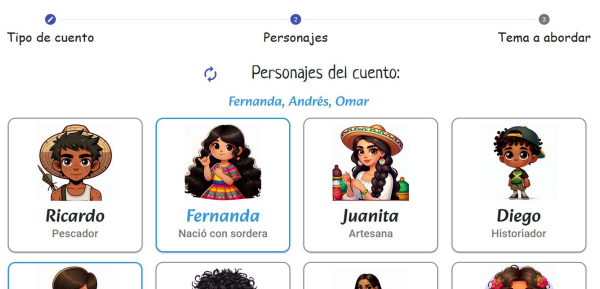


Figura 4. Interfaz de selección de los personajes

3. Por último, se optó por el tema de tolerancia, como se indica en la Figura 5.



Figura 5. Interfaz de selección del tema

Una vez establecidos los parámetros, se generó el cuento mostrado en la Figura 6. Este proceso de generación del cuento tomó aproximadamente 4816 ms.



Figura 6. Ejemplo de cuento generado

En la interfaz del sistema, el usuario puede reproducir el cuento seleccionando el botón de audio ubicado en la esquina superior derecha. Este audio, generado por el modelo TTS-1-HD y narrado con la voz de Aleación (Alloy), tiene una duración de 1:01 minutos, y su proceso de creación tomó un total de 10.79 segundos.

3.2. Diversidad de contenidos generados

Para medir la diversidad de contenidos en los cuentos generados, es decir, que tan diferentes son las historias que genera el sistema; se realizaron dos experimentos.

El primer experimento consistió en mantener invariables a los personajes, temas y tipos de cuentos, solicitando al sistema que genere historias con esos parámetros fijos. Aunque los cuentos generados mostraron

similitudes, en ninguna de las treinta ejecuciones se observaron historias idénticas (repetidas). Los contenidos generados en esta prueba pueden ser consultados libremente en el repositorio público de github.

La Figura 7 muestra un resumen de las palabras frecuentemente utilizadas en los títulos de los treinta cuentos generados. Se observa que algunas palabras no fueron indicadas explícitamente en el prompt diseñado, pero siguen las instrucciones para crear historias interesantes.



Figura 7. Nube de palabras de los títulos

Por otra parte, en los cuentos generados se usan palabras que promueven la tolerancia y la colaboración, como se observa en la nube de palabras de la Figura 8, generada a partir de los contenidos de los cuentos.



Figura 8. Nube de palabras de los contenidos de los cuentos

Se calcularon todos los índices de Jaccard entre pares de cuentos, estos valores se representan gráficamente en la Figura 9. Se observa que las historias tienen poca similitud entre ellas, ya que el valor máximo del índice de Jaccard fue de 0.2137, alcanzado por los microcuentos 23 y 29 que se encuentran en el repositorio indicado anteriormente.

El segundo experimento consistió en generar historias eligiendo aleatoriamente los personajes, temas y tipos de cuentos. Después de generar más de treinta cuentos, se observó una gran variedad en las historias, todas ellas alineadas con las instrucciones del prompt diseñado. La Figura 10 muestra gráficamente todos los índices de Jaccard entre los cuentos. El promedio de

los índices de Jaccard fue de 0.0359 con una desviación estándar de 0.0427. El valor máximo encontrado fue de 0.2.

Al revisar los cuentos generados, se notó que cada uno de ellos contiene un mensaje que fortalece valores y respeto hacia los personajes de la historia que tienen algún tipo de discapacidad.

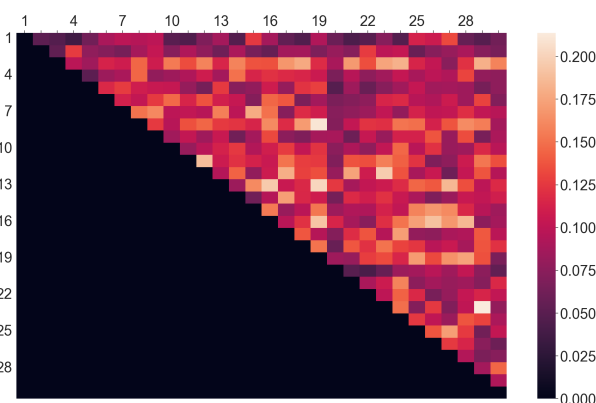


Figura 9. Índices de Jaccard entre cuentos con personajes, tipo y tema fijos

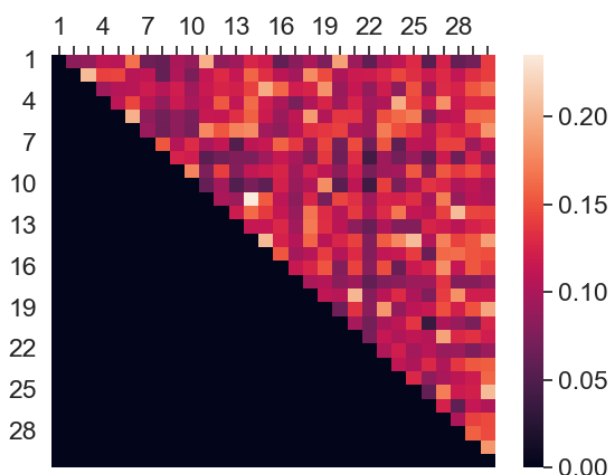


Figura 10. Índices de Jaccard entre cuentos con tipo, personajes y temas elegidos aleatoriamente

3.3. Análisis de las voces en la reproducción de cuentos

Para comparar las diversas voces proporcionadas por OpenAI, resultó esencial analizar el tiempo de generación del cuento, el tono de voz, la variación de entonación, la velocidad del habla y la claridad de pronunciación. El objetivo principal fue seleccionar la voz más adecuada para garantizar una experiencia auditiva clara, natural y emocionalmente atractiva para el público infantil.

3.3.1. Tiempos de generación

Se solicitó al sistema la generación de treinta cuentos, en los cuales se eligieron aleatoriamente el tipo, los personajes y los temas para cada historia. En cada solicitud, se midió el tiempo en que ChatGPT tarda en generar el archivo de audio correspondiente. En total, se obtuvieron ocho archivos de audio para historias de tipo microcuento, once para cuento flash y once para cuento corto. La Tabla 1 muestra un resumen de los tiempos de creación y duración por cada tipo de cuento.

Tabla 1. Comparación de tiempos de creación y duración de los cuentos

	Microcuento	Cuento flash	Cuento corto
Creación (prom)	9.31 s	11.82 s	12.49 s
Creación (std)	1.03 s	2.41 s	1.82 s
Duración (prom)	58 s	66 s	74 s
Duración (std)	13 s	10 s	14 s

Como era de esperarse, el promedio de los tiempos para la creación de los archivos de audio para la narración aumenta conforme la longitud del cuento crece. Sin embargo, se observa una diferencia menor entre los promedios de tiempo para generación de audio entre cuento flash y cuento corto en comparación con los microcuentos. Además, se observa que la generación de archivos de audio para cuentos de tipo flash tienen una desviación estándar más alta que en los demás tipos de cuentos.

Se confirma que la duración del audio de la narración concuerda con el tipo de cuento. La duración de los cuentos cortos presenta una desviación estándar más grande que los demás tipos de cuentos.

3.3.2. Evaluación de tono de voz

El tono de voz en un audio, nos permite evaluar la experiencia auditiva del usuario final, ya que influye en la comprensión, empatía y persuasión de los cuentos. Al analizar estos tonos en los audios generados, se observó que tres (Alloy, Nova y Shimmer) de las seis voces presentan un tono amigable y agradable durante la lectura de los cuentos (ver Tabla 2).

Tabla 2. Comparación de tonos de voz en la reproducción de cuentos

Voz	Descripción
Alloy	Emite un tono amigable
Fable	Se caracteriza por una tonalidad seria, sin generar un sentimiento en particular.
Echo	Presenta una tonalidad seria con un enfoque narrativo.
Onyx	Su tono de voz es grave y pausado, ideal para la narración de cuentos.
Nova	Aunque posee una voz amigable, se percibe poco natural.
Shimmer	Presenta una voz amigable y natural, ideal para la narración de cuentos.

Además, se notó que la voz de Onyx, a pesar de ser una voz con tonalidad seria, está particularmente enfocada hacia la narración de cuentos o historias, ya que posee una formalidad que se adapta a este tipo de narrativa.

3.3.3. Variación de entonación

Evaluar la variación de entonación en los audios, puede incidir en el tono emocional y persuasivo de la narrativa; específicamente en estos cuentos, repercute en la transmisión efectiva de los valores y el mensaje que se busca inculcar en los infantes. La Tabla 3 muestra las variaciones de entonación para los tipos de voz de la TTS de OpenAI.

Una entonación adecuada puede captar la atención del oyente, generar emociones y facilitar la comprensión de los temas tratados. Analizando este aspecto en los audios, es evidente que aunque la mayoría de las voces exhiben una variación de entonación constante, destaca la voz de Onyx, por su notable variación de entonación. Esta voz realiza pausas adecuadas, lo que enriquece la narrativa del cuento. En contraste, las demás voces presentan pausas muy cortas; y en el caso de la voz Nova, realiza una entonación menos eficiente, lo que resulta una narración lineal y sin matices. Este factor podría afectar el interés de los niños al escuchar el audio.

Tabla 3. Variación de entonación en la reproducción de cuentos

Voz	Descripción
Alloy	Presenta una entonación constante y precisa, respetando los puntos y comas; por lo que, contribuye a una lectura agradable y fluida.
Fable	Mantiene una entonación constante y adecuada en cuanto a la puntuación.
Echo	Se presenta una entonación constante y adecuada en cuanto a la puntuación, sin embargo, las pausas no son muy notorias, lo que afecta la claridad y la narrativa del cuento.
Onyx	Realiza una buena entonación, ya que realiza pausas correctamente, lo que mejora la narrativa del cuento.
Nova	No tiene una buena entonación, realiza una narración lineal.
Shimmer	Proporciona una buena entonación en los párrafos, a pesar de no tener buenas pausas en la narración.

3.3.4. Velocidad del habla

La velocidad del habla es un aspecto que influye directamente en la comprensión de un cuento y la experiencia auditiva del público infantil. En el análisis realizado (ver Tabla 4), se observó que la voz Nova resulta ineficiente debido a su ritmo variable, lo que dificulta la comprensión del cuento por parte del infante. En cuanto a las voces Fable y Echo mantienen una velocidad constante, pero su estilo de narración

tiende a ser demasiado simple y no se ajusta adecuadamente al formato de un cuento. En contraste, la voz Onyx se destaca por su velocidad de habla, la cual está perfectamente adaptada para la narración de cuentos, proporcionando una experiencia auditiva más envolvente y atractiva.

Tabla 4. Comparación de la velocidad del habla en la reproducción de cuentos

Voz	Descripción
Alloy	Gracias a que tiene una velocidad constante, mantiene una audición clara y comprensible.
Fable	Se caracteriza por tener una velocidad rápida, a pesar de contar con pausas durante la narración, la rapidez le resta expresividad narrativa al audio.
Echo	La velocidad es constante, solo que no realiza pausas tan largas que parece una simple lectura, mas no un cuento.
Onyx	La velocidad es constante, y tranquila, lo que se plantea que es la voz más adecuada para la narración de cuentos e historias.
Nova	Muestra un ritmo variable, con momentos de rápida pronunciación seguido de momentos más lentos.
Shimmer	Mantiene una velocidad constante a lo largo del audio.

3.3.5. Calidad de pronunciación

De acuerdo con la documentación de OpenAI, el modelo TTS soporta voces en diversos idiomas, incluido el español. Tras analizar los treinta audios, se detectaron palabras mal pronunciadas en las narraciones. Como se detalla en la Tabla 5, la voz Nova mostró una ineficiencia notable en la pronunciación de las palabras, además de que cambió de idioma en algunas ocasiones; por lo que evidencia una falta de estabilidad para mantener el español como idioma predeterminado. Se observó que en todas las voces, en ocasiones, los nombres de los personajes no se pronunciaban correctamente. Por otro lado, la voz con una mejor pronunciación resultó ser Onyx, a pesar de que presentó dificultades al pronunciar los nombres de los personajes.

4. Conclusiones

La IAG está siendo usada actualmente como una herramienta valiosa para atender una plétora de problemáticas de diversos tipos. Entre estos desafíos, la discapacidad es una de las problemáticas más significativas en América Latina y el Caribe, afectando a más de 85 millones de personas en la región.

En este artículo, se propuso el diseño de un sistema de generación de cuentos (cuentacuentos) para niños de habla hispana basado en IAG. El sistema permite la creación de cuentos personalizados en los que participan personajes infantiles con algún tipo de discapacidad.

La inclusión de personajes con discapacidad en las historias es un factor crucial que contribuye significativamente a promover la diversidad y la igualdad desde una edad temprana. Aprovechando la IAG sobre la que se basa el sistema, se generan cuentos únicos en cada solicitud, incluso con los mismos parámetros, lo que proporciona una experiencia variada y enriquecedora en cada uso.

Tabla 5. Comparación de la claridad de pronunciación en la reproducción de cuentos

Voz	Descripción
Alloy	La pronunciación de las palabras contiene un tono extranjero, arrastrando ciertos sonidos. Específicamente en palabras como "Respetar", "perspectiva" y "Ximena", que no se pronuncian correctamente en español.
Fable	Se detectaron palabras que no se pronuncian correctamente en español, como "Isabella" y "respeto", e incluso hubo casos en los que no se terminaron de decir algunas palabras, como "igualdad".
Echo	Se observaron errores de pronunciación en palabras en español como "hábil", "Ximena", "rumoreaba", "baille", "barrera" y "Sofía". A pesar de estos errores, esta voz no suena tan extranjera como otras.
Onyx	La pronunciación de las palabras es clara y precisa, aunque, presenta dificultades con algunos nombres de personajes como "Isabella" y "Ximena".
Nova	La pronunciación no es precisa, con errores notables en palabras, especialmente en los nombres de los personajes. Además, de los cinco cuentos analizados con esta voz, cuatro cambiaron de idioma durante la reproducción.
Shimmer	Esta voz en español tiene una pronunciación clara y precisa, aunque presenta dificultades con algunos nombres de personajes como "Isabella" y "Ximena".

En las diferentes pruebas realizadas al sistema, se realizó una comparación cuantitativa de la diversidad de las historias generadas, aplicando para ello el criterio del índice de Jaccard. Los valores encontrados confirman la poca similitud entre los cuentos analizados.

Además, se evaluó la entonación, velocidad y calidad de pronunciación de las voces sintéticas, encontrándose que todavía existen áreas de oportunidad en la tecnología del estado del arte para la generación de audio en la narrativa de las historias.

A pesar de los desafíos presentes, como el consumo de recursos durante el servicio de conversión de texto a voz, la falta de naturalidad en la voz, los errores en la pronunciación y la latencia del sistema, se puede afirmar que la propuesta presentada es novedosa y podría ser útil para los educadores que buscan instalar herramientas de educación inclusiva en sus aulas.

Actualmente, se continúa trabajando en el desarrollo de otros sistemas que ayuden a cerrar las brechas y mejorar la accesibilidad y la calidad de vida para las personas con discapacidad.

En cuanto a las futuras líneas de investigación, se contempla la colaboración de expertos de diversas disci-

plinas, como la psicología y la educación. El objetivo de esta colaboración será evaluar tanto el contenido como los mensajes transmitidos en los cuentos generados. Además, se analizará si estos cuentos son adecuados y comprensibles para los niños de Latinoamérica.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma del Estado de México, por el apoyo recibido a través del proyecto 7018/2024CIB.

Referencias

- [1] J. R. Casar Corredera, “Inteligencia artificial generativa,” *Anales de la Real Academia de Doctores*, vol. 8, no. 3, pp. 475–489, 2023. [Online]. Available: <https://is.gd/3kMGMX>
- [2] J. Sanabria-Navarro, Y. Silveira-Pérez, D. Pérez-Bravo, and M. de Jesús-Cortina-Núñez, “Incidences of artificial intelligence in contemporary education,” *Comunicar*, vol. 77, pp. 97–107, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3916/C77-2023-08>
- [3] S. Droubi, A. Galamba, F. L. Fernandes, A. A. de Mendonça, and R. J. Heffron, “Transforming education for the just transition,” *Energy Research & Social Science*, vol. 100, p. 103090, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103090>
- [4] S. Iruri Quispillo and C. A. Villafuerte Álvarez, “Importancia de la narración de cuentos en la educación,” *Comuni@cción: Revista de Investigación en Comunicación y Desarrollo*, vol. 13, no. 3, pp. 233–244, Sep. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.33595/2226-1478.13.3.720>
- [5] M. Pozas, C. J. G. Trujillo, and V. Letzel-Alt, “Mexican school students’ perceptions of inclusion: A brief report on students’ social inclusion, emotional well-being, and academic self-concept at school,” *Frontiers in Education*, vol. 8, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3389/feduc.2023.1069193>
- [6] Banco Mundial, “Rompiendo barreras - inclusión de las personas con discapacidad en América Latina y el Caribe.” [Online]. Available: <https://is.gd/diWoks>
- [7] K. Ramírez. (2023) Cuentacuentos. GitHub, Inc. [Online]. Available: <https://n9.cl/pt3ls>
- [8] T. Bratitsis and P. Ziannas, “From early childhood to special education: Interactive digital storytelling as a coaching approach for fostering social empathy,” *Procedia Computer Science*, vol. 67, pp. 231–240, 2015, proceedings of the 6th International Conference on Software Development and Technologies for Enhancing Accessibility and Fighting Info-exclusion. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.09.267>
- [9] P. Juppi, “Engagement and empowerment. Digital storytelling as a participatory media practice,” *Nordicom Review*, vol. 39, 12 2017. [Online]. Available: <https://is.gd/Wo91Bc>
- [10] T. Tseng, Y. Murai, N. Freed, D. Gelosi, T. D. Ta, and Y. Kawahara, “Plushpal: Storytelling with interactive plush toys and machine learning,” in *Proceedings of the 20th Annual ACM Interaction Design and Children Conference*, ser. IDC ’21. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2021, pp. 236–245. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3459990.3460694>
- [11] J. Haase and P. H. Hanel, “Artificial muses: Generative artificial intelligence chatbots have risen to human-level creativity,” *Journal of Creativity*, vol. 33, no. 3, p. 100066, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.yjoc.2023.100066>
- [12] R. Li, “A “dance of storytelling”: Dissonances between substance and style in collaborative storytelling with AI,” *Computers and Composition*, vol. 71, p. 102825, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compcom.2024.102825>
- [13] S. Habib, T. Vogel, X. Anli, and E. Thorne, “How does generative artificial intelligence impact student creativity?” *Journal of Creativity*, vol. 34, no. 1, p. 100072, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.yjoc.2023.100072>
- [14] S. Kalantari, E. Rubegni, L. Benton, and A. Vasalou, “When I’m writing a story, I am really good Exploring the use of digital storytelling technology at home,” *International Journal of Child-Computer Interaction*, vol. 38, p. 100613, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijcci.2023.100613>
- [15] J. Su and W. Yang, “Artificial intelligence in early childhood education: A scoping review,” *Computers and Education: Artificial Intelligence*, vol. 3, p. 100049, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2022.100049>
- [16] S. Z. Salas-Pilco, K. Xiao, and J. Os-hima, “Artificial intelligence and new technologies in inclusive education for minority students: A systematic review,” *Sustainability*, vol. 14, no. 20, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su142013572>

- [17] H. Yu, “The application and challenges of chatgpt in educational transformation: New demands for teachers’ roles,” *Heliyon*, vol. 10, no. 2, January 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24289>
- [18] L. Sijing and W. Lan, “Artificial intelligence education ethical problems and solutions,” in *2018 13th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE)*, 2018, pp. 1–5. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICCSE.2018.8468773>
- [19] E. Valverde and P. Hernández, *TypeScript*, 2023. [Online]. Available: <https://is.gd/WICHuR>
- [20] J. Collell and A. Ferry, *CSS3 y Javascript avanzado*. Universitat Oberta de Catalunya, 2023. [Online]. Available: <https://is.gd/JrhbAi>
- [21] A. Nazir and Z. Wang, “A comprehensive survey of ChatGPT: Advancements, applications, prospects, and challenges,” *Meta-Radiology*, vol. 1, no. 2, p. 100022, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.metrad.2023.100022>
- [22] M. Vicente-Yagüe-Jara, O. López-Martínez, V. Navarro-Navarro, and F. Cuéllar-Santiago, “Writing, creativity, and artificial intelligence. chatgpt in the university context,” *Comunicar*, vol. 77, pp. 47–57, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3916/C77-2023-04>
- [23] J. J. López. ¿Cuántas palabra tiene un cuento o relato corto? [Online]. Available: <https://n9.cl/rdyxx>
- [24] OpenAI. (2023) Text generation models. OpenAI Platform. [Online]. Available: <https://is.gd/fkWCFZ>
- [25] ——. (2023) Text to speech. OpenAI Platform. [Online]. Available: <https://is.gd/XskwW5>

NORMAS PARA PUBLICAR EN LA REVISTA INGENIUS

1. Información General

INGENIUS es una publicación científica de la Universidad Politécnica Salesiana de Ecuador, editada desde enero de 2007, con periodicidad fija semestral, especializada en Ingeniería Mecánica, Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Ciencias de la Computación y su integración en lo que actualmente se conoce como Mecatrónica; estas líneas de acción fortalecen áreas como automatización, control, robótica entre otras.

Es una revista científica arbitrada, que utiliza el sistema de evaluación externa por expertos (*peer-review*), bajo metodología de pares ciegos (*double-blind review*), conforme a las normas de publicación del Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). El cumplimiento de este sistema permite garantizar a los autores un proceso de revisión objetivo, imparcial y transparente, lo que facilita a la publicación su inclusión en bases de datos, repositorios e indexaciones internacionales de referencia.

INGENIUS se encuentra indexada en la Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal – REDALYC, en Emerging Sources Citation Index, ESCI de Clarivate Analytics, en SciELO Ecuador, en el directorio y catálogo selectivo del Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal – Latindex, en el Directorio de Revistas de Acceso Abierto – DOAJ, en la Matriz de Información para el Análisis de Revistas – MIAR, en la Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico – REDIB y en repositorios, bibliotecas y catálogos especializados de Iberoamérica.

La revista se edita en doble versión: impresa (ISSN: 1390-650X) y electrónica (e-ISSN: 1390-860X), en idioma español, siendo identificado además cada trabajo con un DOI (Digital Object Identifier System).

2. Alcance y Política

2.1. Temática

Contribuciones originales en materia de Ingeniería Mecánica, Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Ciencias de la computación y su integración en lo que actualmente se conoce como Mecatrónica, así como áreas afines: Automatización, Control, Domótica, Robótica en sus diferentes ámbitos de acción y todas aquellas disciplinas conexas interdisciplinariamente con la línea temática central.

Podrán ser publicados todos los trabajos realizados por investigadores nacionales o extranjeros, una vez que cumplan los criterios de calidad científica requeridos.

2.2. Aportaciones

La revista INGENIUS publica preferentemente artículos relacionados con investigaciones empíricas, siendo también admisibles informes de desarrollo tecnológico, propuestas de modelos e innovaciones, productos de la elaboración de tesis de grado y posgrado siempre que sean un aporte para el campo de la ciencia y tecnología, así como selectas revisiones del estado del arte (*state-of-the-art*).

- **Investigaciones:** 4.000 a 6.500 palabras de texto, incluyendo título, resúmenes, palabras clave, tablas y referencias.
- **Informes, propuestas y productos:** 5.000 a 6.500 palabras de texto, incluyendo título, resúmenes, tablas y referencias.

- **Revisiones:** 6.000 a 7.000 palabras de texto, incluidas tablas y referencias. Se valora especialmente las referencias justificadas, actuales y selectivas de alrededor de unas 40 obras.

La revista INGENIUS publica trabajos originales e inéditos redactados en español e inglés, no pueden haber sido publicados a través de ningún medio impreso ni electrónico, ni estar en proceso de arbitraje o publicación.

Todo artículo será sometido a un riguroso proceso de arbitraje; la evaluación del artículo se hará conforme a criterios de originalidad, pertinencia, actualidad, aportes, rigurosidad científica y cumplimiento de las normas editoriales establecidas.

Por tratarse de una publicación arbitrada, el Consejo Editorial aprueba su publicación en base al concepto de pares especializados. La recepción de un documento no implica compromiso de publicación.

Es indispensable presentar una carta de presentación y cover letter que se puede descargar de: <https://goo.gl/xB0wE1>.

Las contribuciones deben ser enviadas única y exclusivamente a través del OJS (Open Journal System) <https://goo.gl/4xxjuo>, en el cual todos los autores deben registrarse como usuario previamente. Para cualquier consulta del procedimiento se debe contactar a:

revistaingenius@ups.edu.ec,
jcalles@ups.edu.ec ó
mquinde@ups.edu.ec.

Para favorecer la diversidad de las publicaciones, el/los autor(es) no podrán publicar más de un(1) artículo por cada número, ni tampoco en números consecutivos, para que el/los autor(es) puedan enviar nuevamente a Ingenius sus investigaciones, deberán haber transcurrido como mínimo 3 números publicados.

3. Presentación y estructura de los manuscritos

Para aquellos trabajos que se traten de investigaciones de carácter empírico, los manuscritos seguirán la estructura IMRDC (Introducción, Materiales y Métodos, Resultados y Discusión y Conclusiones), siendo opcionales los epígrafes de Notas y Apoyos. Aquellos trabajos que por el contrario se traten de informes, estudios, propuestas y revisiones podrán ser más flexibles en sus epígrafes, especialmente en Materiales y métodos, Resultados, y Discusión y Conclusiones. En todas las tipologías de trabajos son obligatorias las Referencias.

Los artículos pueden estar escritos sobre Microsoft Word (.doc o .docx) o L^AT_EX(.tex). La plantilla a ser utilizada puede ser descargada del sitio web de la revista, en formato de Microsoft Word en: <https://goo.gl/ZA2XAk>, mientras que para L^AT_EX en: <https://goo.gl/Mwv8IC>, es necesario que el archivo esté anonimizado en Propiedades de Archivo, de forma que no aparezca la identificación de autor/es.

Las Figuras, Gráficos y/o Ilustraciones, así como las Tablas deberán estar numeradas secuencialmente incluyendo una descripción explicativa para cada una. Las ecuaciones incluidas en el artículo deberán también estar numeradas; tanto las figuras, tablas y ecuaciones deben estar citadas en el texto.

Use espacio después de punto, comas y signos de interrogación.

Use “enter” al final de cada párrafo, título encabezamiento. No use “enter” en ningún otro lugar, deje al programa procesador de palabras romper automáticamente las líneas.

No centre encabezamientos o subencabezamientos ya que deben estar alineados a la izquierda.

Las Tablas deben estar creadas en el mismo programa usado para el cuerpo del documento.

to. Use tabuladores, no espacios, para crear columnas. Recuerde que el tamaño final de las páginas impresas será de 21 x 28 cm, por lo tanto las tablas deben estar diseñadas para ajustarse al espacio de la impresión final.

3.1. Estructura de los manuscritos

3.1.1. Presentación y Cover Letter

1. **Título (español) / Title (inglés):** Conciso pero informativo, en castellano en primera línea y en inglés en segunda, cuando el artículo sea escrito en español y viceversa si está escrito en inglés.
2. **Autores y adscripción:** Nombre y Apellidos completo de cada autor, organizados por orden de prelación y su adscripción institucional con referencia al final de la primera hoja, donde tiene que incluir: Dependencia e Institución a la que pertenece, país, ORCID. Se aceptarán como máximo 5 autores, aunque pudieran existir excepciones justificadas por la complejidad y extensión del tema.
3. **Resumen (español) / Abstract (inglés):** Tendrá como extensión máxima 230 palabras, en español y en inglés. En el resumen se describirá de forma concisa y en este orden: 1) Justificación del tema; 2) Objetivos; 3) Metodología y muestra; 4) Principales resultados; 5) Principales conclusiones.
4. **Palabras clave (español) / Keywords (inglés):** Se deben exponer 6 palabras clave por cada versión idiomática relacionados directamente con el tema del trabajo. Será valorado positivamente el uso de las palabras claves expuestas en el Thesaurus de la UNESCO.
5. **Presentación (Cover Letter):** Una declaración de que el manuscrito se trata de una aportación original, no enviada ni en proceso de evaluación en otra revista, con la confirmación de las autorías firman-

tes, aceptación (si procede) de cambios formales en el manuscrito conforme a las normas y cesión parcial de derechos a la editorial, según el formato establecido en: <https://goo.gl/XAc9a3>.

3.1.2. Manuscrito

1. **Título (español) / Title (inglés):** Conciso pero informativo, en castellano en primera línea y en inglés en segunda, cuando el artículo sea escrito en español y viceversa si está escrito en inglés.
2. **Autores y adscripción:** Nombre y Apellidos completo de cada autor, organizados por orden de prelación y su adscripción institucional con referencia al final de la primera hoja, donde tiene que incluir: Dependencia a la que pertenece, Institución a la que pertenece, país, ORCID. Se aceptarán como máximo 5 autores, aunque pudieran existir excepciones justificadas por la complejidad y extensión del tema.
3. **Resumen (español) / Abstract (inglés):** Tendrá como extensión máxima 230 palabras, en español y en inglés. En el resumen se describirá de forma concisa y en este orden: 1) Justificación del tema; 2) Objetivos; 3) Metodología y muestra; 4) Principales resultados; 5) Principales conclusiones.
4. **Palabras clave (español) / Keywords (inglés):** Se deben exponer 6 palabras clave por cada versión idiomática relacionados directamente con el tema del trabajo. Será valorado positivamente el uso de las palabras claves expuestas en el Thesaurus de la UNESCO.
5. **Introducción:** Debe incluir el planteamiento del problema, el contexto de la problemática, la justificación, fundamentos y propósito del estudio, utilizando citas bibliográficas, así como la literatu-

ra más significativa y actual del tema a escala nacional e internacional.

6. **Materiales y métodos:** Debe ser redactado de forma que el lector pueda comprender con facilidad el desarrollo de la investigación. En su caso, describirá la metodología, la muestra y la forma de muestreo, así como se hará referencia al tipo de análisis estadístico empleado. Si se trata de una metodología original, es necesario exponer las razones que han conducido a su empleo y describir sus posibles limitaciones.
7. **Análisis y resultados:** Se procurará resaltar las observaciones más importantes, describiéndose, sin hacer juicios de valor, el material y métodos empleados. Deberán aparecer en una secuencia lógica en el texto y las tablas y figuras imprescindibles evitando la duplicidad de datos.
8. **Discusión y Conclusiones:** Resumirá los hallazgos más importantes, relacionando las propias observaciones con estudios de interés, señalando aportaciones y limitaciones, sin redundar datos ya comentados en otros apartados. Asimismo, debe incluir las deducciones y líneas para futuras investigaciones.
9. **Apoyos y agradecimientos (opcionales):** El Council Science Editors recomienda al autor/es especificar la fuente de financiación de la investigación. Se considerarán prioritarios los trabajos con aval de proyectos competitivos nacionales e internacionales.
10. **Las notas (opcionales):** Se deberán incluir solo en caso necesario, al final del artículo (antes de las referencias). Deben anotarse manualmente, ya que el sistema de notas al pie o al final de Word no es reconocido por los sistemas de maquetación. Los números de notas se colocan en

superíndice, tanto en el texto como en la nota final. No se permiten notas que recojan citas bibliográficas simples (sin comentarios), pues éstas deben ir en las referencias.

11. **Referencias Bibliográficas:** Las citas bibliográficas deben reseñarse en forma de referencias al texto. Bajo ningún caso deben incluirse referencias no citadas en el texto. Su número debe ser suficiente para contextualizar el marco teórico con criterios de actualidad e importancia. Se presentarán secuencialmente en orden de aparición, según corresponda siguiendo el formato de la IEEE.

3.2. Normas para las referencias Bibliográficas

Artículos de revistas:

- [1] J. Riess, J. J. Abbas, "Adaptive control of cyclic movements as muscles fatigue using functional neuromuscular stimulation". IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng vol. 9, pp.326–330, 2001. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/7333.948462>

Libros:

- [1] G. O. Young, "Synthetic structure of industrial plastics" in *Plastics*, 2nd ed., vol. 3, J. Peters, Ed. New York: McGraw-Hill, 1964, pp. 15–64.

Reportes Técnicos:

- [1] M. A. Brusberg and E. N. Clark, "Installation, operation, and data evaluation of an oblique-incidence ionosphere sounder system," in "Radio Propagation Characteristics of the Washington-Honolulu Path," Stanford Res. Inst., Stanford, CA, Contract NOBSR-87615, Final Rep., Feb. 1995, vol. 1

Artículos presentados en conferencias (No publicados):

- [1] Vázquez, Rolando, Presentación curso

“Realidad Virtual”. National Instruments. Colombia, 2009.

Artículos de Memorias de Conferencias (Publicados):

- [1] L. I. Ruiz, A. García, J. García, G. Taboada. “Criterios para la optimización de sistemas eléctricos en refinerías de la industria petrolera: influencia y análisis en el equipo eléctrico,” IEEE CONCAPAN XXVIII, Guatemala 2008.

Tesis:

- [1] L.M. Moreno, “Computación paralela y entornos heterogéneos,” Tesis doctoral, Dep. Estadística, Investigación Operativa y Computación, Universidad de La Laguna, La Laguna, 2005.

Estándares:

- [1] IEEE Guide for Application of Power Apparatus Bushings, IEEE Standard C57.19.100–1995, Aug. 1995.

Patentes:

- [1] J. P. Wilkinson, “Nonlinear resonant circuit devices,” U.S. Patent 3 624 125, July 16, 1990.

Manuales:

- [1] Motorola Semiconductor Data Manual, Motorola Semiconductor Products Inc., Phoenix, AZ, 1989.

Recursos de internet:

- [1] E. H. Miller, “A note on reflector arrays” [Online]. Available: <https://goo.gl/4cJkCF>

3.3. Epígrafes, tablas y figuras

Los epígrafes del cuerpo del artículo se deben numerar en arábigo. Irán sin caja completa de mayúsculas, ni subrayados, ni negritas. La numeración ha de ser como máximo de tres niveles: 1. / 1.1. / 1.1.1. Al final de cada epígrafe numerado se dará un enter para continuar con el párrafo correspondiente.

Las tablas deben presentarse incluidas en el texto según orden de aparición, numeradas

en arábigo y tituladas con la descripción del contenido, el subtítulo debe ir en la parte superior de la tabla justificado a la izquierda.

Las figuras pueden ser dibujos lineales, mapas o fotografías de medios tonos en blanco y negro o a color en resolución de 300 dpi. No combine fotografías y dibujos lineales en la misma figura.

Diseñe las figuras para que se ajusten eventualmente al tamaño final de la revista 21 x 28 cm. Asegúrese de que las inscripciones o detalles, así como las líneas, tengan tamaños y grosores adecuados de tal manera que no queden ilegibles cuando sean reducidos a su tamaño final (números, letras y símbolos deben ser reducidos al menos a 2,5 mm de altura después que las ilustraciones han sido reducidas para ajustarse a la página impresa). Idealmente, las ilustraciones lineales deben ser preparadas a aproximadamente un cuarto de su tamaño final de publicación. Diferentes elementos en la misma figura deben ser deletreados a, b, c, etc.

Las fotografías deben grabarse con alto contraste y en alta resolución. Recuerde que las fotografías frecuentemente pierden contraste en el proceso de impresión.

Dibujos lineales y mapas deben ser preparados en color negro.

El texto de las figuras y mapas debe escribirse con letras fácilmente legibles.

Si las figuras han sido previamente usadas, es de responsabilidad del autor obtener el permiso correspondiente para evitar problemas posteriores relacionados con los derechos de autor.

Cada figura debe ser entregada en un archivo aparte, ya sea como mapa de bits (.jpg, .bmp, .gif, o .png) o como gráfico vectorial (.ps, .eps, .pdf).

4. Proceso de envío

El envío será a través de la plataforma OJS de la revista, <<https://goo.gl/4xxjuo>>, si

el envío se lo realiza en formato Word, se deberá cargar, como archivo original el manuscrito en .doc o .docx, con los datos del autor/es y su adscripción institucional; si el envío se lo realiza en formato latex deberá cargar como archivo original el pdf; además de la presentación y cover letter de acuerdo a lo antes descrito; también se deben cargar las figuras numeradas de acuerdo a lo correspondiente en el manuscrito (como mapa de bits .jpg, .bmp, .gif, o .png o como gráfico vectorial .ps, .eps, .pdf), en calidad como mínima de 300 dpi y para el caso del formato latex un archivo comprimido con el código fuente del mismo.

Es obligatorio que todos los autores ingresen la información requerida en la plataforma OJS al momento de enviar un manuscrito y uno solo de los autores será el responsable de correspondencia.

Una vez enviada la contribución el sistema automáticamente enviará al autor para correspondencia un mail de confirmación de recepción de la contribución.

5. Proceso Editorial

Una vez que el manuscrito ha sido receptado en OJS se realiza una primera comprobación de los siguientes puntos:

- La temática se encuentre en concordancia con los criterios de la revista.
- Debe tener la estructura IMRDC, y seguir el formato de INGENIUS.
- Debe utilizar la forma de citación de la IEEE.
- Todas las referencias bibliográficas deben estar citadas en el texto del manuscrito al igual que las tablas, figuras y ecuaciones.
- El manuscrito es original, para esto se utiliza un software para determinar plagio.

Si alguno de los puntos anteriores no está completo o existe inconsistencia, se solicitará al autor las correcciones correspondientes, una vez que el autor modifique el artículo deberá re-

mitir a través de la plataforma OJS. El equipo editorial verificará que las correcciones solicitadas han sido incorporadas, si cumple, el manuscrito iniciará la segunda parte del proceso y podrá ser seguido por el autor a través de OJS, caso contrario se notificará al autor y se archivará el manuscrito.

La segunda fase del proceso consiste en la evaluación bajo la metodología de pares ciegos (doble-blind review), en los que se incluyen expertos nacionales y extranjeros considerando los siguientes pasos:

- El editor asigna dos o más revisores para el artículo.
- Una vez revisado el artículo, los revisores remitirán el informe de la evaluación, con uno de los siguientes resultados.

- Publicable
- Publicable con cambios sugeridos
- Publicable con cambios obligatorios
- No Publicable

- El editor una vez recibida la evaluación por parte de los revisores analizará los resultados y determinará si el artículo es aceptado o negado.
- Si el artículo es aceptado se notificará al autor para que realice las correcciones en caso de ser requeridas.
- Si el artículo es negado se notificará al autor y se archivará el manuscrito.
- En los dos casos anteriores se enviará el resultado de la evaluación de los revisores y sus respectivas recomendaciones.

La segunda fase del proceso dura 4 semanas como mínimo, luego de transcurridas las mismas se notificará al autor dando instrucciones para continuar con el proceso.

6. Publicación

La revista INGENIUS publica dos números por año, el 1º de enero y el 1º de julio por lo tanto es importante considerar las fechas para el envío de los artículos y su correspondiente publicación. Los artículos recibidos hasta el mes de octubre serán considerados para la publicación de enero y aquellos que se reciban hasta abril para la publicación de julio.

7. Información sobre el uso de Inteligencia Artificial

En caso de que se utilice inteligencia artificial en cualquier etapa de la investigación presentada en el artículo, se requerirá a los/as autores/as destacarlo claramente en la carta de

presentación/coverletter asociado al artículo, manifestando la sección o secciones específicas donde se ha hecho uso de la inteligencia artificial. Esta indicación tiene como objetivo informar a los lectores sobre las secciones en las que se ha empleado esta tecnología, proporcionando una mayor transparencia y comprensión sobre su aplicación en la investigación presentada.

INGENUS, Revista de Ciencia y Tecnología, reconoce la importancia de mantener altos estándares éticos en la investigación científica, particularmente en el empleo de inteligencia artificial (IA).

Queda a discreción del equipo editorial, la aceptación de la publicación que haya utilizado inteligencia artificial.

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA DEL ECUADOR

Juan Cárdenas Tapia, sdb
Rector

©Universidad Politécnica Salesiana
Turuhuayco 3-69 y Calle Vieja
Casilla postal 2074
Cuenca, Ecuador
Teléfono: (+593 7) 205 00 00
Fax: (+593 7) 408 89 58
Correo electrónico: srector@ups.edu.ec

CANJE

Se acepta canje con otras publicaciones periódicas.

Dirigirse a:
Secretaría Técnica de Comunicación
Universidad Politécnica Salesiana
Turuhuayco 3-69 y Calle Vieja
Casilla postal 2074
Cuenca, Ecuador
Teléfono: (+593 7) 205 00 00 Ext. 1182
Fax: (+593 7) 408 89 58
Correo electrónico: rpublicas@ups.edu.ec
www.ups.edu.ec
Cuenca – Ecuador

INGENIUS, Revista de Ciencia y Tecnología,
Número 32
julio/diciembre 2024
John Calle Sigüencia, PhD, Editor Jefe
revistaingenius@ups.edu.ec

Impresión

Centro Gráfico Salesiano: Antonio Vega Muñoz 10-68 y General Torres.
Teléfono: (+593 7) 283 17 45
Cuenca – Ecuador
Correo electrónico: centrograficosalesiano@lms.com.ec

OTRAS PUBLICACIONES PERIÓDICAS DE LA UNIVERSIDAD

UNIVERSITAS, Revista de Ciencias Sociales y Humanas.

LA GRANJA, Revista de Ciencias de la Vida.

ALTERIDAD, Revista de Educación.

RETOS, Revista de Ciencias de la Administración y Economía.

UTOPIA, Revista de Pastoral Juvenil Universitaria.

SOPHIA, Colección de Filosofía de la Educación.

