

Número Especial: 27

Redalyc 3.0

ESCI Web of science

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR

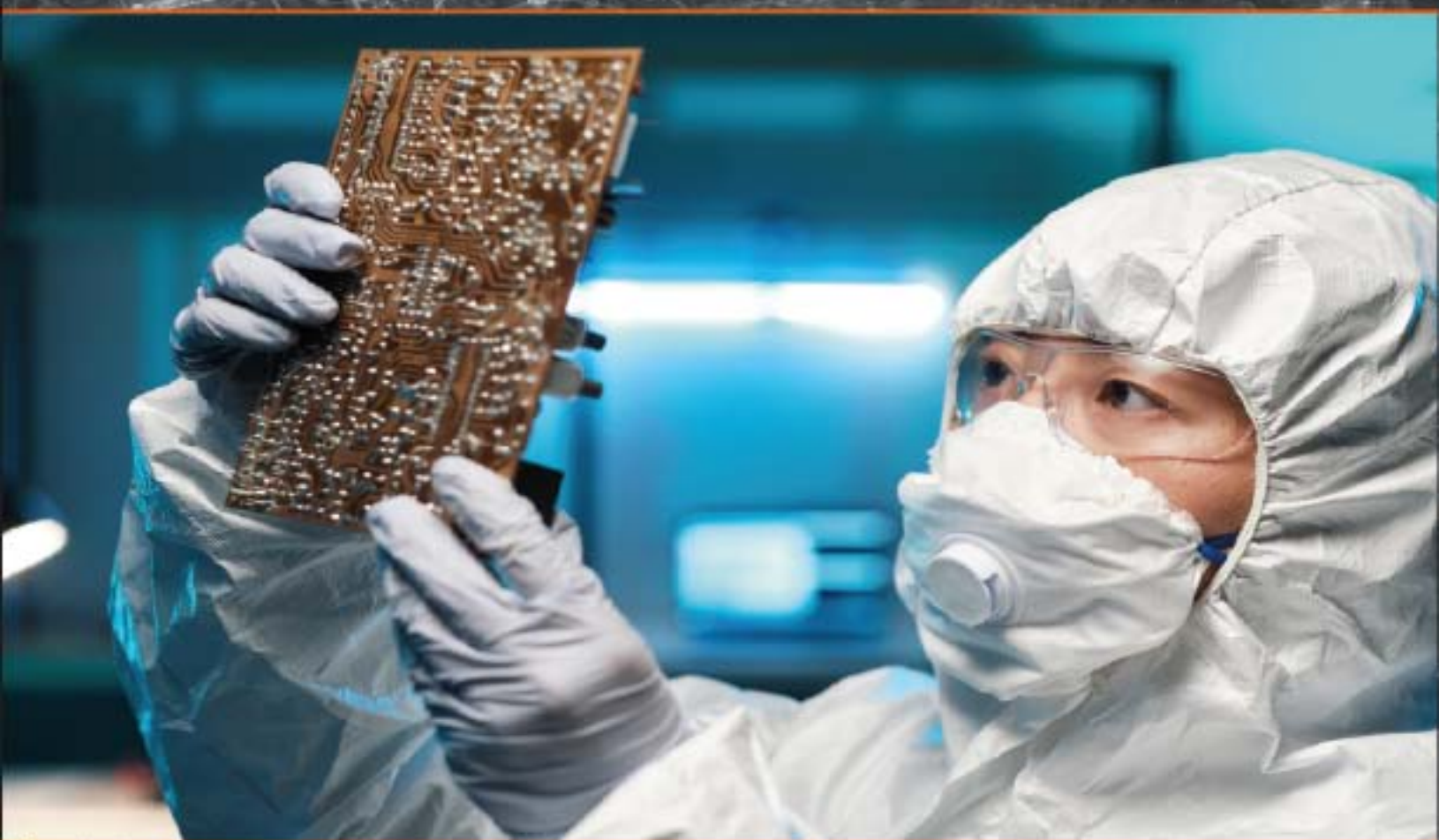
pISSN: 1390-650X

eISSN: 1390-860X

enero/ junio 2022

INGENIUS

Revista de Ciencia y Tecnología



Distanciamiento social ante la COVID-19:
Simulación de aforo máximo de personas
mediante PHP

Pag. 9



Caracterización de DELUX: Dispositivos de
esterilización por luz ultravioleta para
máscaras PFF2/N95 contra COVID-19

Pag. 23



Una revisión de los últimos de los colectores
solares térmicos aplicados a la industria

Pag. 59



Un enfoque de aprendizaje profundo para
estimar la frecuencia respiratoria del
fotoplestímetro

Pag. 96

Editores Temáticos : Ph.D. Teodiano Bastos-Filho, Ph.D. Sridhar Krishnan

INGENIUS

INGENIUS • Número Especial 27 • enero/junio 2022. 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.

GERMÁN ZAPATA, PhD, Universidad Nacio-

nal 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.

EDUARDO MATALLANAS, PhD, Universidad Politécnica de Madrid, España.

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.

ALBERTO SORIA, PhD, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México.

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

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.

FREDDY LEONARDO BUENO PALOMEQUE, MSc, 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, 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 TUFIÑO 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
JAVIER HERRÁN GÓMEZ, SDB, PhD
JOSÉ JUNCOSA BLASCO, PhD
JUAN PABLO SALGADO GUERRERO, 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
LUIS ÁLVAREZ RODAS, PhD

Editor General

LUIS ÁLVAREZ-RODAS, PhD

Consejo Técnico

ÁNGEL TORRES-TOUKOUMIDIS, PhD
DRA. MARCIA PEÑA, Revisora de Estilo,
Centro Gráfico Salesiano - Editorial Don Bosco
MARLON QUINDE ABRIL, MSc, Diagramación y Maquetación
JOEL MONTERO GALÁN

Servicio de Publicaciones

HERNÁN HERMOSA (Coordinación General)
MARCO GUTIÉRREZ (Soporte OJS)
PAULINA TORRES (Edición)
RAYSA ANDRADE (Maquetación)
MARTHA VINUEZA (Maquetación)
ADRIANA CURIEL AVILA, (Traducción)

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 Especial 27: Uso de técnicas de ingeniería para combatir COVID-19

enero – junio 2022

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

<http://revistas.ups.edu.ec/index.php/ingenius>



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



PLATAFORMAS DE EVALUACIÓN DE REVISTAS



DIRECTORIOS SELECTIVOS



HEMEROTECAS SELECTIVAS



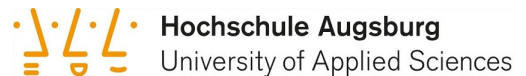
BUSCADORES DE LITERATURA CIENTÍFICA OPEN ACCESS



OTRAS BASES DE DATOS BIBLIOGRÁFICAS



CATÁLOGO DE BIBLIOTECAS INTERNACIONALES UNIVERSITARIAS



UNIVERSITÄT BAMBERG



Estimadas y estimados lectores:

Más de 280 millones de personas se han contagiado de COVID-19, y sobre los 5,4 millones han muerto en todo el mundo desde el primer caso reportado de SARS-CoV-2 en Wuhan-China en 2019, seguido de sus variantes, como la del Reino Unido (B.1.1.7), las brasileñas (P.1, P.2 y N.9), la de Sudáfrica (B.1.325) y la de reciente aparición, la ómicron (B.1.1.529), detectada por primera vez en África. La COVID-19 sigue afectando fuertemente a algunos países, como es el caso de Rusia con más de mil muertes diarias en la actualidad.

Este número temático trae artículos sobre técnicas multidisciplinarias de Ingeniería para combatir esta pandemia, abordando todos sus aspectos, incluyendo tecnologías de generación y detección para el estudio, tratamiento y prevención de la COVID-19; diseño y fabricación de sensores biomédicos, rendimiento, enfoques de procesamiento y aplicaciones; nuevos desarrollos y mejoras recientes en los diseños; y la electrónica, el procesamiento de datos y los materiales de los sensores biomédicos.

Para esta edición se han aceptado cinco contribuciones, las cuales fueron revisadas a través del correspondiente proceso editorial realizado por expertos en la materia. Los aportes aquí publicados corresponden a treinta y tres investigadores de diferentes países (Brasil, Ecuador, El Salvador y Perú). El primer trabajo «Distanciamiento social ante COVID-19: Simulación del aforo máximo de personas a través de PHP» hace uso de técnicas de programación, utilizando el lenguaje PHP, para el desarrollo de una aplicación web que simule la capacidad máxima de ocupación de espacios físicos determinando la cantidad de personas que pueden ingresar a un lugar en un área interna o externa, cumpliendo con el distanciamiento social de 2 m requerido en este momento por la COVID-19. El trabajo «Diseño y construcción de equipo de ventilación mecánica automatizada para asistir insuficiencia respiratoria» que presenta los requisitos para el diseño, construcción y validación de un sistema de ventilación mecánica, para ser utilizado en pacientes

con insuficiencia respiratoria, seguida de mediciones de las condiciones del aire suministrado, realizadas con la ayuda de profesionales dedicados al mantenimiento de equipos médicos y con la aprobación de médicos internistas.

El siguiente artículo, titulado «Caracterización de DELUX: Dispositivo de esterilización con luz ultravioleta para máscaras PFF2 / N95 contra COVID-19», presenta una caracterización del dispositivo de esterilización, llamado DELUX, empleando UVC (espectro de luz ultravioleta C), para la esterilización de PFF2 / Máscaras N95, lo que permite extender el tiempo de uso seguro de estos cubrebocas en condiciones de emergencia. El siguiente trabajo aborda el hecho de que la población mundial aún se ve obligada a usar mascarillas en público, ya que siguen siendo el protocolo más efectivo para evitar y prevenir la propagación de la COVID-19. Así, «Evaluación del desempeño de AIoT en modelos computacionales en la nube y en el borde aplicado a la detección de mascarillas», describe un sistema automático de detección de tapabocas, utilizando conceptos de inteligencia artificial de las cosas (AIoT), para recordar a las personas la importancia de utilizarlos adecuadamente. El sistema permite detectar el uso correcto, inadecuado y sin máscara, basado en dos modelos computacionales: Cloud y Edge.

Finalmente se presenta lado «Prototipo de un dispositivo para la medición automática de señales fisiológicas para asistir al diagnóstico y seguimiento de pacientes con COVID-19» describe el diseño, construcción y resultados preliminares de un dispositivo para automatizar la medición de señales fisiológicas (temperatura, saturación de oxígeno, presión y frecuencia cardíaca) para ayudar en el diagnóstico y monitoreo de COVID-19. El sistema incluye también una aplicación móvil que recibe datos de medidas en tiempo real y crea una base de datos para evaluación médica.

También se publican cinco artículos más relacionados con las líneas temáticas generales de la revista. ¡Disfruten de todos estos trabajos! ¡Esperamos estar libres de esta pandemia en el 2022!

Teodiano Bastos-Filho, PhD

EDITOR ASOCIADO

ÍNDICE

Distanciamiento social ante la COVID-19: Simulación del aforo máximo de personas mediante PHP	9
Social distancing in the face of COVID-19: simulation of the maximum capacity of people through PHP Oscar J. M. Peña Cáceres, Manuel A. More More, Ruth E. Cornejo Sojo, Elvis R. Garay Silupu	
Diseño y construcción de equipo de ventilación mecánica automatizada para asistir insuficiencia respiratoria	17
Design and construction of automated mechanical ventilation equipment to assist respiratory failure Gilberto Carrillo, Mauricio Gómez, Jaime Rodas, Rafael Pimentel	
Caracterización de DELUX: Dispositivo de esterilización por luz ultravioleta para máscaras PFF2/N95 contra COVID-19	23
Characterization of DELUX: Ultraviolet light sterilization device for PFF2 / N95 masks against COVID-19 Christiane Bertachini Lombello, Nasser Ali Daghestanli, Hermann Windisch Neto, Fernando Luiz Affonso Fonseca, Felipe Nogueira Ambrosio, Raquel Arbex, Isabella Kobb Fernando, Victor Allisson da Silva, Luisa Pataquini dos Santos, Patricia Aparecida da Ana	
Evaluación de AIoT en modelos computacionales en la nube y en el borde aplicado a la detección de mascarillas	32
Evaluation of AIoT performance in Cloud and Edge computational models for mask detection Felipe Quiñonez-Cuenca, Cristian Maza-Merchán, Nilvar Cuenca-Maldonado, Manuel Quiñones-Cuenca, Rommel Torres, Francisco Sandoval, Patricia Ludeña-González	
Prototipo de un dispositivo para la medición automática de señales fisiológicas para asistir al diagnóstico y seguimiento de pacientes con COVID-19	49
Prototype of a Device for the Automatic Measurement of Physiological Signals to Assist the Diagnosis and Monitoring of patients with COVID-19 Karla Llanos, Christian Landi, Fernando Yupa, Paola Vasquez, Ismael Criollo, John Calle-Siguencia, Fernando Urgilés-Ortiz, Ana Cecilia Villa-Parra	
Una revisión de los últimos avances de los colectores solares térmicos aplicados en la industria	59
A review of the state-of-the-art of solar thermal collectors applied in the industry Willian Carrión-Chamba, Wilson Murillo-Torres, Andrés Montero-Izquierdo	
Diseño y construcción de un equipo de soldadura por fricción con asistencia láser para la unión de ejes de acero AISI 1045 y aluminio 2017-T4	74
Design and construction of a friction welding equipment with laser assistance for the joint of AISI 1045 steel and aluminum 2017-T4 shafts José Luis Mullo, Jorge Andrés Ramos-Grez, Germán Omar Barrionuevo	
Detección de peatones en el día y en la noche usando YOLO-v5	85
Pedestrian detection at daytime and nighttime conditions based on YOLO-v5 Bryan Montenegro, Marco Flores-Calero	
Un enfoque de aprendizaje profundo para estimar la frecuencia respiratoria del fotopletismograma	96
A Deep Learning Approach to Estimate the Respiratory Rate from Photoplethysmogram Lucas C. Lampier, Yves L. Coelho, Eliete M. O. Caldeira, Teodiano F. Bastos-Filho	
Análisis del Rendimiento de D-BLAST MIMO sobre SDR-USRP	105
Numerical analysis of flow pattern map of R600a in a collector/evaporator of a solar-assisted heat pump Freddy Cárdenas, Jairo Otáñez, Juan Inga, Esteban Inga, Andrés Ortega	
Normas editoriales	117
Guidelines	



DISTANCIAMIENTO SOCIAL ANTE LA COVID-19: SIMULACIÓN DEL AFORO MÁXIMO DE PERSONAS MEDIANTE PHP

SOCIAL DISTANCING IN THE FACE OF COVID-19: SIMULATION OF THE MAXIMUM CAPACITY OF PEOPLE THROUGH PHP

Oscar J. M. Peña Cáceres^{1,*} , Manuel A. More More²

Ruth E. Cornejo Sojo¹ , Elvis R. Garay Silupu³

Recibido: 03-11-2021, Recibido tras revisión: 06-12-2021, Aceptado: 13-12-2021, Publicado: 01-01-2022

Resumen

La confluencia poblacional en áreas internas o externas incrementa considerablemente la transmisión de la COVID-19, por no respetar el distanciamiento social que establece el sistema de salud. El objetivo de este trabajo fue hacer uso de técnicas de programación, empleando el lenguaje PHP (preprocesador de hipertexto), para el desarrollo de una aplicación que simule el aforo máximo de personas que pueden ingresar a un área interna o externa. La metodología permitió el reconocimiento de áreas internas y externas comunes, configuración al entorno de desarrollo, codificación, propuesta de simulación y ejecución del simulador donde se ha evaluado un caso práctico y diez lugares para determinar su confiabilidad. El simulador brindó el aforo máximo de personas que pueden ingresar a un lugar de área interna o externa cumpliendo el distanciamiento social de 2 m. Los resultados permitieron conocer que el uso de las tecnologías de información a través de las técnicas de programación y el lenguaje PHP contribuyó en ser una alternativa tecnológica para la lucha contra la propagación del virus.

Palabras clave: distanciamiento social, PHP, técnicas de programación

Abstract

Population confluence in internal or external areas considerably increases transmission of COVID-19, due to not respecting the social distancing established by the health system. The objective of this work was to make use of programming techniques, using the PHP language (hypertext preprocessor), for the development of an application that simulates the maximum capacity of people who can enter an internal or external area. The methodology allowed recognizing common internal and external areas, configuring to the development environment, coding, simulation proposing and executing of the simulator where a practical case and ten places were evaluated to determine its reliability. The simulator provided the maximum capacity of people who can enter an internal or external area, complying with the social distancing of 2 m. The results made it possible to know that the use of information technologies through programming techniques and the PHP language contributed to being a technological alternative for the fight against the spread of the virus.

Keywords: social distancing, PHP, programming techniques

^{1,*}Escuela de Posgrado, Universidad Nacional de Piura – Perú.

Autor para correspondencia ✉: openac@posgrado.unp.edu.pe

^{2,*}Departamento de Física, Universidad Nacional de Piura – Perú.

³Área de Tecnologías de la Información, Centro de Reposo San Juan de Dios – Perú.

Forma sugerida de citación: Peña Cáceres, O. J. M.; More More, M. A.; Cornejo Sojo, R. E. y Garay Silupu, E. R. "Distanciamiento social ante la COVID-19: Simulación del aforo máximo de personas mediante PHP," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 27, pp. 9-16, 2022. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n27.2022.01>.

1. Introducción

Ante la presencia de la COVID-19, el mundo asume diferentes medidas de control, entre ellas el distanciamiento social en espacios públicos y privados, lo que ha conllevado a nuevas formas y características de comunicación en la que el ser humano no puede interrelacionarse hasta la convergencia de una nueva normalidad [1]. Establecimientos comerciales, entidades financieras, zonas de esparcimiento e instituciones del Estado, después de haber cerrado sus puertas, han vuelto a retomar sus actividades laborales y comerciales, donde uno de los criterios fundamentales para su reapertura es determinar el aforo máximo. Dicha medida de control converge con el uso adecuado de las mascarillas y el lavado racional de las manos con agua y jabón o alcohol [2]. Ante este escenario es importante la dosificación de áreas de intercambio, así como conocer el número de personas que pueden ingresar a un establecimiento público o privado de acuerdo con el diámetro de cada infraestructura teniendo en consideración las normas de bioseguridad que se encuentran asociadas al distanciamiento social entre una y otra persona.

Esta información puede conocerse a través de una simulación que brinde el aforo máximo de personas a interrelacionarse y acceder a espacios abiertos o cerrados cumpliendo las normas de bioseguridad. La presente investigación pretendió demostrar que las técnicas de programación son uno de los medios disponibles para evaluar y simular el aforo máximo de personas en establecimientos de baja, media y alta confluencia poblacional. Este ejercicio favoreció de una forma más ágil y óptima a los sectores públicos y privados, en el cumplimiento de las normas de bioseguridad y en la reducción de posibles contagios de la COVID-19 que puedan propagarse en función de las actividades propias del ser humano. Dicha actividad contribuye al sector socioeconómico y una transformación gobierno-ciudadanía, creando mejores nexos de proximidad y confianza, principalmente en el ámbito económico y en la atención de los servicios esenciales que la población recurre de forma permanente [3].

Para abordar este estudio se analizó el desarrollo de investigaciones con respecto al distanciamiento social entre una y otra persona para evitar el contagio de la COVID-19. Se revisó la detección de personas e identificación de objetos y la distancia entre ellos, con la finalidad de desarrollar una aplicación que involucre la detección y estimación de la población que estaría más expuesta a ser contagiada por este virus [4]. Sin embargo, esto no puede ser posible si no se analiza desde un contexto amplio, dinámico y con un enfoque socioeconómico donde el uso de los recursos disponibles y la cosmovisión de la ingeniería se involucre en la resolución de problemas coloquiales que contribuyan y fortalezcan los sectores productivos y económicos.

Es por ello por lo que el uso de las tecnologías de la información (TI) se han convertido en un medio cotidiano donde las personas tienen un papel fundamental en las organizaciones que les permite adaptarse a los nuevos cambios, generar propuestas y brindar soluciones inmediatas [5].

El ser humano puede desarrollar una visión transversal de la realidad del mundo, donde existan soluciones para afrontar la COVID-19, con características y horizontes resilientes, impulsando nuevas propuestas, contextos, formas y técnicas colaborativas que salvaguarden la integridad de la población. Las TIC pueden dar soluciones a este nuevo escenario [6]. A pesar de que la pandemia de la COVID-19 paralizó el acceso a los sistemas globales, se centró en el cuidado de la salud a través de bloqueos sin precedentes y distanciamiento físico forzado, acelerando rápidamente el desarrollo de estas tecnologías digitales para cumplir diversas necesidades de atención de la salud en todo el mundo [7]. Por esta razón se pretende hacer uso de tecnología emergente para prevenir su propagación [8]. El control y mitigación de COVID-19 requiere la participación de muchos sectores, incluido el público en general. Por otro lado, las tecnologías de aplicación proporcionan los medios por los cuales estos diversos sectores pueden innovar, comunicarse y actuar rápidamente [9].

Si no se aplican medidas de control para reducir el número de contactos en determinados lugares, esto puede influir en la evolución de la pandemia. Por ello, fue importante identificar cuáles son los lugares de mayor contacto y determinar el peso de propagación que influye para disponer y hacer uso adecuado de los recursos. En ese sentido, el uso de modelos de simulación, como se detalla en la presente investigación, puede contribuir en la toma de decisiones [10]. Hallazgos de una revisión sistemática de 172 estudios (44 estudios comparativos; $n = 25,697$ pacientes) sobre COVID-19, síndrome respiratorio agudo grave (SARS) y síndrome respiratorio de Oriente Medio (MERS) proporcionan la mejor evidencia disponible de que las políticas actuales de al menos 1 m de distancia física están asociadas con una gran reducción en caso de infección, pero las distancias de 2 m pueden ser más eficaces [11].

Por lo mencionado, este estudio de investigación tiene como objetivo general hacer uso de las técnicas de programación a través del lenguaje PHP, mediante el ingreso de variables referenciales, como el largo y ancho de un área interna o externa que permita simular y conocer el número de personas que pueden ingresar respetando el distanciamiento social.

2. Materiales y métodos

La Figura 1 indica la metodología que se considera para el desarrollo de la aplicación web, permitiendo

conocer el aforo máximo de personas que pueden ingresar a áreas internas o externas cumpliendo con el distanciamiento social.

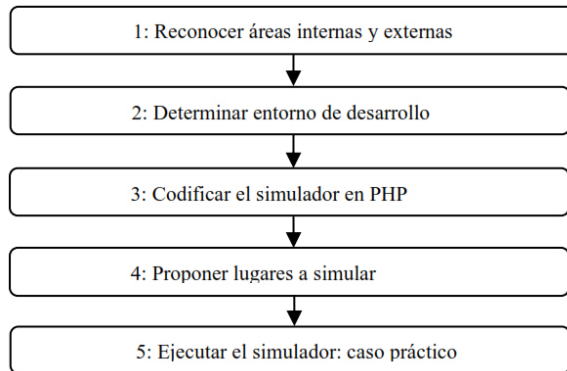


Figura 1. Metodología

2.1. Reconocer áreas internas y externas

Las áreas internas son espacios cerrados o de superficie reducida limitada, mientras que las áreas externas disponen de mayores dimensiones y acceso poblacional. Esos espacios son conocidos como ambientes interiores o exteriores. El acceso a este tipo de áreas o ambientes en la actualidad se encuentra sujeto a recomendaciones para la mitigación de la propagación de la COVID-19. Estas se basan en el distanciamiento social, que significa no entrar en contacto cercano con otra persona con una distancia recomendada entre 1 y 2 m, según se define en diferentes países [12].

El ser humano, a lo largo de las diversas actividades que realiza, visita lugares de tipología interna como restaurantes, centros comerciales [13], terminales de transporte, instituciones académicas, instituciones públicas-privadas, bares, cafeterías, biblioteca, museos o centros culturales, un cine o un teatro, una iglesia o centro espiritual, su casa (o una sala de la misma), el hogar de otra persona (o una habitación de ella o él), una instalación deportiva cubierta y tipologías de lugares al aire libre (externas) como una plaza, un bosque urbano, un mirador, un campo deportivo, una calle o un tramo de una calle, un parque, un barrio y la terraza de un bar / cafetería / restaurante [14].

La dispersión de la población que converge en los lugares antes mencionados se encuentra vinculada por el tipo de área geográfica. Tanto así que los residentes de las comunidades rurales muestran mayores niveles de identidad de lugar que los habitantes de las ciudades [15], comportamiento que se ve reflejado en un elevado tráfico de acceso a centros comerciales, restaurantes e instituciones públicas. Escenario que se ve notablemente afectado por una débil y no moderada determinación del aforo máximo de personas, situación que representa carencia en la identificación y evalua-

ción de los espacios disponibles que cumplan con las normas de bioseguridad.

En lo local, el Gobierno debe establecer controles que prevean y contribuyan en la orientación de los lugares públicos y privados, fortaleciendo la gestión de sus operaciones que le permita asegurar el distanciamiento social e instrumentar medidas de limpieza, desinfección y protección personal [16].

2.2. Entorno de desarrollo

Hoy en día, PHP es uno de los lenguajes de programación más populares y se usa comúnmente en la comunidad de código abierto por ser una industria para la construcción de grandes aplicaciones web [17]. Es un lenguaje de programación compatible, escalable, seguro y multidisciplinario que permite el desarrollo de aplicaciones ágiles, óptimas e inmediatas en función de los requerimientos de la sociedad.

Como medio intérprete se hace uso de Appserv 8.5.0, herramienta de código abierto para el sistema operativo de Windows que integra Apache, MySQL y PHP, teniendo en cuenta la versión 5.6.26 de PHP. Para su codificación, el editor de texto SublimeText [18] permite el desarrollo de la aplicación web para simular y conocer el aforo máximo de personas para el ingreso a un área interna o externa cumpliendo el distanciamiento social obligatorio.

2.3. Codificación del simulador en PHP

En la etapa de codificación, se recurre a las técnicas de programación, por su expresión, orden y secuencia al momento de escribir instrucciones y sentencias. También son conocidas como reglas de prioridad [19], por lograr resultados óptimos y resolver problemas comunes [20], lo que contribuye en el desarrollo de una aplicación web para simular el aforo máximo de personas que pueden ingresar a áreas internas o externas, cumpliendo las normas de bioseguridad.

En la Tabla 1 se ha descrito el uso de las cinco variables creadas, así como la operacionalización en la que interactúa cada una de ellas para detallar las entradas y salidas en el que permite definir el comportamiento del simulador en función de las dimensiones ingresadas, tal como se visualiza en la Figura 2.

Tabla 1. Descripción de las variables utilizadas en la codificación del simulador

N.º	Variables	Descripción
1	\$area_lg	Ancho de la superficie/área.
2	\$area_an	Largo de la superficie/área.
3	\$area_m2	Operacionalización entre las variables 1 y 2 (multiplicación).
4	\$distanciamiento	Variable que tiene asignado el valor de "2" m.
5	\$operacion	Operacionalización de las variables 3 y 4, donde la variable 4 es dividida entre "2".

```

1: <?php
2: $area_lg=20;
3: $area_an=8;
4: $area_m2=$area_lg*$area_an;
5: $distanciamiento=2;
6: $operacion=0;
7: $operacion=$area_m2/($distanciamiento*2);
8: ?>
9: <h2> Simular el Aforo Máximo de Personas</h2>
10: <h2>El aforo para un Área de
11: <?php echo $area_m2; ?> m2 es de
12: <?php echo $operacion; ?> Personas.</h2>
10: <table border="1" cellpadding="0"
11: cellspacing="0" width="60%">
12: <?php for ($j=0; $j <$area_lg ; $j++) {
13: if($j%2==0){
14: ?>
15: <tr>
16: <?php for ($x=0; $x <$area_an ; $x++) { ?>
17: <?php if($x%2==0){ ?>
18: <td align="center"></td>
20: <?php
21: }else{ ?>
22: <td align="center">&nbsp;</td>
23: <?php } } ?>
24: </tr>
25: <?php
26: }else{
27: ?>
28: <tr>
29: <?php for ($i=0; $i <$area_an ; $i++) {
30: if($i%2==0){
31: ?>
32: <td align="center"></td>
34: <?php
35: }else{
36: ?>
37: <td align="center"></td>

```

Figura 2. Codificación del simulador en PHP

En la Tabla 2 se explican las instrucciones, sentencias y etiquetas predominantes para la codificación del simulador.

Tabla 2. Instrucciones (I), sentencias (S) y etiquetas (E) predominantes para la codificación del simulador

Índice	Tipo	Descripción
for	I	Bucle que autogenera los resultados de la operacionalización de las variables definidas
if	S	Sentencia que condiciona el resultado
else	S	Sentencia que se ejecuta cuando no se cumple una o más condiciones
table	E	Etiqueta para muestra de una tabla
img	E	Etiqueta que muestra una imagen

Para el funcionamiento de la etiqueta *img*, se realiza el uso de las imágenes que se visualizan en la Figura 3, *distance90*, *distance* y *person*.

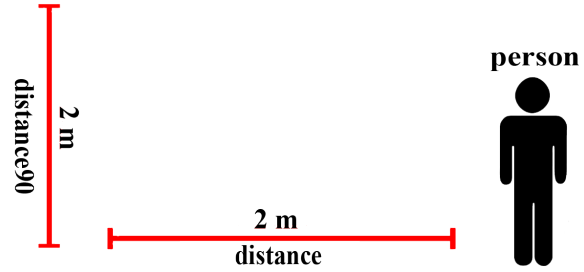


Figura 3. Imágenes utilizadas en la codificación

2.4. Lugares propuestos a simular

La simulación es una representación artificial de un proceso real [21], donde es simulación y no realidad y se busca lograr un objetivo especial [22]. En este contexto se identificaron diez lugares con áreas internas y externas más comunes y recurrentes por la población residente de la región, provincia y distrito de Piura – Perú, para conocer el aforo máximo de personas que pueden ingresar cumpliendo las normas de bioseguridad a cada uno de los lugares que se visualizan en la Tabla 3.

Tabla 3. Lugares con áreas internas y externas simuladas

Nº	Lugar	Área	Ancho m ²	Largo m ²
1	Restaurante	Interna	8	15
2	Iglesia	Interna	10	100
3	Cafetería	Interna	5	20
4	Bar	Interna	6	20
5	Tienda comercial	Interna	4	8
6	Plaza	Externa	85	82
7	Parque	Externa	72	225
8	Campo deportivo	Externa	26	34
9	Centro recreativo	Externa	50	400
10	Avenida	Externa	12	100

2.5. Ejecución del simulador: caso práctico

En esta etapa se realizaron las pruebas iniciales sobre la ejecución del simulador; se planteó conocer el aforo máximo de personas que pueden ingresar al área de espera de vacunación contra la COVID-19 en la Universidad de Piura, donde se identificó ser un área externa de 12 m de largo y 10 de ancho.

La simulación para este primer caso de prueba dio como resultados que se dispone de un área de 120 m² y que el aforo máximo es de 30 personas cumpliendo el distanciamiento social de 2 m, tal como se visualiza en la Figura 4.

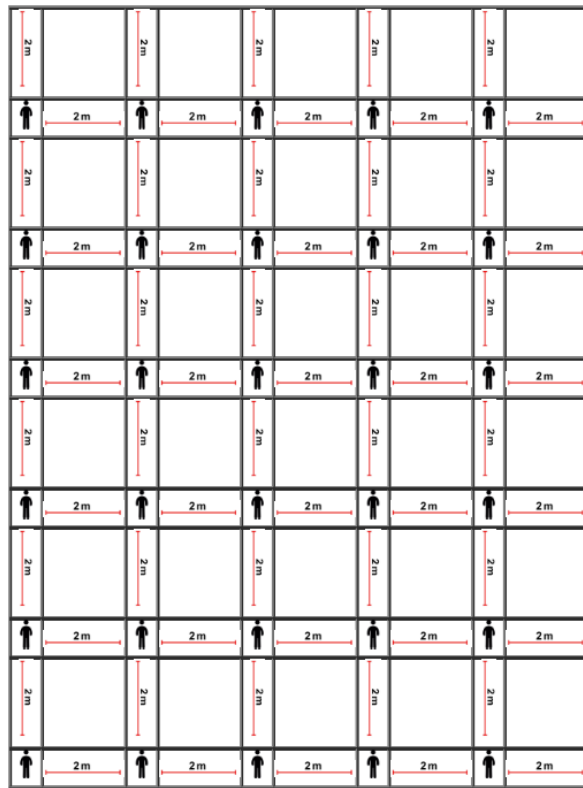


Figura 4. Resultados de la simulación

Se puede ver que la parametrización de las variables de ingreso no es absoluta, así como el diámetro para el cumplimiento del distanciamiento social; su composición y forma de los resultados recaerá en los datos de ingreso.

3. Resultados y discusión

En la Tabla 4 se reflejan los resultados de los diez lugares identificados y se puede observar en la columna de nombre *Aforo máximo disponible* que los resultados son favorables, tomando en consideración el porcentaje del área disponible, el cual nos permite obtener resultados reales y conocer la confiabilidad de la aplicación web, siempre y cuando tengamos claro que las áreas internas o externas no siempre disponen de un 100 % de espacio disponible de acceso libre a la población.

De acuerdo con los resultados de la Tabla 4 también se puede manifestar que los lugares de área externa representan mejor predominancia en el uso del simulador que permite determinar el aforo máximo de personas cumpliendo el distanciamiento social, sin embargo, para los lugares de áreas internas se ha podido observar que existen algunas limitaciones por disponer de objetos, accesorios y otros, donde se debe obtener primero el área ocupada y disponible para conseguir resultados más confiables.

Tabla 4. Resultados del aforo máximo de personas en lugares de área interna y externa

Nº	Lugar	Tipo de área	Ancho m ²	Largo m ²	Área m ²	Aforo máximo simulado	Área disponible	Aforo máximo disponible
1	Restaurante	Interna	8	15	120	30	50 %	15
2	Iglesia	Interna	10	100	1000	250	80 %	200
3	Cafetería	Interna	5	20	100	25	65 %	16
4	Bar	Interna	6	20	120	30	60 %	18
5	Tienda comercial	Interna	4	8	32	8	60 %	5
6	Plaza	Externa	85	82	6970	1742	85 %	1481
7	Parque	Externa	72	225	16 200	4050	85 %	3443
8	Campo deportivo	Externa	26	34	884	221	90 %	199
9	Centro recreativo	Externa	50	400	20 000	5000	90 %	4500
10	Avenida	Externa	12	100	120	30	95 %	29

En lugares como restaurantes, cafeterías, bares y tiendas comerciales existen espacios donde las personas deben esperar para acceder al servicio o pedido que realizan. En este contexto el simulador representa una contribución apta de uso para conocer el aforo máximo de personas que pueden ingresar a lugares de áreas internas o externas. Con lo cual se brinda facilidades al empresariado y sector público a través del uso de herramientas tecnológicas que impulsen el cumplimiento de los protocolos de bioseguridad articulado con el

sector socioeconómico del cual depende la población como medio de vida.

Se deduce que el uso y aplicación del simulador coadyuvará e impulsará en la identificación de lugares con áreas internas por la carencia y tuberización que se tiene muchas veces en lugares de recurrencia poblacional.

Los resultados obtenidos en mérito al aforo máximo simulado y el aforo máximo disponible reflejan una variación producto del área disponible que depende de

cada lugar en el que se desea hacer uso del simulador para conocer el aforo máximo, tal como se observa en la Figura 5.

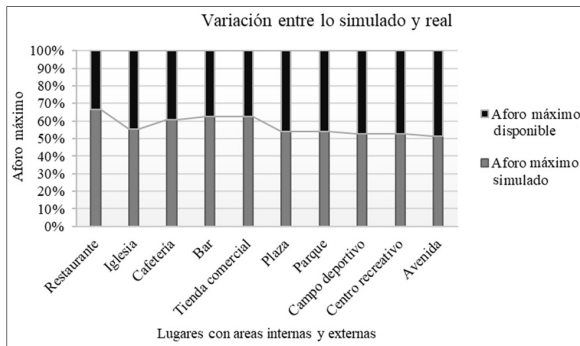


Figura 5. Resultados de la simulación

En ese sentido, para disponer de resultados confiables, es predominante conocer el área disponible, retirando los factores que limitan el acceso a las personas que buscan interactuar al interior o exterior de un establecimiento, con la finalidad de respetar el distanciamiento social de acuerdo con las normas de bioseguridad.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos por el simulador de acuerdo con el caso práctico planteado y los diez lugares evaluados dieron a conocer el aforo máximo de personas que pueden ingresar a un lugar de área interna o externa, cumpliendo el distanciamiento social de 2 m. Para el uso efectivo del simulador, es necesario conocer el área ocupada por objetos, accesorios y otros que hayan sido considerados en el lugar que se pretende evaluar y conocer el aforo máximo de personas.

El simulador muestra de forma visual la certeza, orden y seguridad de darnos a conocer cómo se debe realizar el cálculo sobre el aforo máximo de personas para que puedan ingresar a lugares de áreas externas o internas, teniendo en cuenta que los lugares de áreas externas son los más adecuados para convergencia poblacional por disponer de mayor área y menor cantidad de obstáculos que reduzca el número máximo de personas que puede estar en un ambiente.

La presente investigación puede fortalecerse integrando un sistema de videocámaras al interior o exterior de los lugares de mayor recurrencia poblacional que le permita conocer la cantidad de personas que han ingresado o salido y que actualmente se encuentran en el lugar. Este producto puede ser desarrollado haciendo uso del lenguaje de programación PHP y, como alternativa, Python, con técnicas de visión artificial.

Por lo tanto, se demuestra que las técnicas y el uso del lenguaje de programación PHP aplicado provee una ruta prometedora por la lucha contra la COVID-19,

mediante el fácil manejo, estabilidad, compatibilidad y confiabilidad de los resultados.

Referencias

- [1] B. L. Valle Canales and J. C. Chavarría Hernández, "Communicative habitus and social distancing. Effects on the modes of sign production during the COVID-19 pandemic," *Comunicación y Sociedad*, vol. 18, pp. 1–27, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.32870/cys.v2021.7953>
- [2] C. Maguiña Vargas, "El COVID-19 en el Perú," *Revista de la Sociedad Peruana de Medicina Interna*, vol. 33, no. 4, pp. 129–131, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.36393/spmi.v33i4.558>
- [3] A. Ziccardi and D. Figueroa, "Mexico City: Housing conditions and social distancing imposed, COVID-19," *Revista mexicana de sociología*, vol. 83, pp. 31–60, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22201/iis.01882503p.2021.0.60068>
- [4] C. V. Niño Rondón, S. A. Castro Casadiego, B. Medina Delgado, D. Guevara Ibarra, and J. Gómez Rojas, "Procesamiento a imágenes de video para verificación de distanciamiento social durante la pandemia de la COVID-19," *Revista Logos Ciencia & Tecnología*, vol. 13, pp. 116–127, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22335/rclct.v13i1.1305>
- [5] C. L. Vidal-Silva, A. Sánchez-Ortiz, J. Serrano, and J. M. Rubio, "Experiencia académica en desarrollo rápido de sistemas de información web con Python y Django," *Formación universitaria*, vol. 14, pp. 85–94, 2021. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50062021000500085>
- [6] M. Guisado-Clavero, S. Ares-Blanco, and L. D. Ben Abdellah, "Using mobile applications and websites for the diagnosis of COVID-19 in Spain," *Enfermedades infecciosas y microbiología clínica (English ed.)*, vol. 39, no. 9, pp. 454–457, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.eimce.2021.08.003>
- [7] W. Y. Ng, T.-E. Tan, P. V. H. Movva, A. H. S. Fang, K.-K. Yeo, D. Ho, F. S. S. Foo, Z. Xiao, K. Sun, T. Y. Wong, A. T.-H. Sia, and D. S. W. Ting, "Blockchain applications in health care for COVID-19 and beyond: a systematic review," *The Lancet Digital Health*, vol. 3, no. 12, pp. e819–e829, 2021. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S2589-7500\(21\)00210-7](https://doi.org/10.1016/S2589-7500(21)00210-7)
- [8] M. Adil and M. K. Khan, "Emerging IoT Applications in Sustainable Smart Cities for COVID-19:

- Network Security and Data Preservation Challenges with Future Directions,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 75, pp. 1–12, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103311>
- [9] K. Intawong, D. Olson, and S. Chariyalertsak, “Application technology to fight the COVID-19 pandemic: Lessons learned in Thailand,” *Biochemical and Biophysical Research Communications*, vol. 538, pp. 231–237, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2021.01.093>
- [10] N. Morando, M. Sanfilippo, F. Herrero, M. Iturburu, A. Torti, D. Gutson, M. A. Pando, and R. D. Rabinovich, “Evaluación de intervenciones durante la pandemia COVID-19: desarrollo de un modelo basado en subpoblaciones con distintas tasas de contacto,” *Revista Argentina de Microbiología*, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ram.2021.04.004>
- [11] D. K. Chu, E. A. Akl, S. Duda, K. Solo, S. Yaacoub, H. J. Schunemann, D. K. Chu, E. A. Akl, A. El-harakeh, A. Bognanni, T. Lotfi, M. Loeb, A. Hajizadeh, A. Bak, A. Izcovich, C. A. Cuello-Garcia, C. Chen, D. J. Harris, E. Borowiack, F. Chamseddine, F. Schnemann, G. P. Morgano, G. E. U. Muti Schunemann, G. Chen, H. Zhao, I. Neumann, J. Chan, J. Khabsa, L. Hneiny, L. Harrison, M. Smith, N. Rizk, P. Giorgi Rossi, P. AbiHanna, R. Elkhoury, R. Stalteri, T. Baldeh, T. Piggott, Y. Zhang, Z. Saad, A. Khamis, M. Reinap, S. Duda, K. Solo, S. Yaacoub, and H. J. Schunemann, “Physical distancing, face masks, and eye protection to prevent person-to-person transmission of SARS-CoV-2 and COVID-19: a systematic review and meta-analysis,” *The Lancet*, vol. 395, no. 10242, pp. 1973–1987, 2020. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)31142-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)31142-9)
- [12] B. R. Rowe, A. Canosa, J. M. Drouffe, and J. B. A. Mitchell, “Simple quantitative assessment of the outdoor versus indoor airborne transmission of viruses and COVID-19,” *Environmental Research*, vol. 198, p. 111189, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111189>
- [13] F. Zhang, J. Zu, M. Hu, D. Zhu, Y. Kang, S. Gao, Y. Zhang, and Z. Huang, “Uncovering inconspicuous places using social media check-ins and street view images,” *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 81, p. 101478, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compenurbsys.2020.101478>
- [14] M. Subiza-Pérez, T. Pasanen, E. Ratcliffe, K. Lee, A. Bornioli, J. de Bloom, and K. Korpela, “Exploring psychological restoration in favorite indoor and outdoor urban places using a top-down perspective,” *Journal of Environmental Psychology*, vol. 78, p. 101706, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2021.101706>
- [15] D. Belanche, L. V. Casalo, and M. A. Rubio, “Local place identity: A comparison between residents of rural and urban communities,” *Journal of Rural Studies*, vol. 82, pp. 242–252, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2021.01.003>
- [16] L. Pan, J. Wang, X. Wang, J. S. Ji, D. Ye, J. Shen, L. Li, H. Liu, L. Zhang, X. Shi, and L. Wang, “Prevention and control of coronavirus disease 2019 (COVID-19) in public places,” *Environmental Pollution*, vol. 292, p. 118273, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118273>
- [17] M. Hills, P. Klint, and J. J. Vinju, “Enabling PHP software engineering research in Rascal,” *Science of Computer Programming*, vol. 134, pp. 37–46, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.scico.2016.05.003>
- [18] K. Alrashedy, D. Dharmaretnam, D. M. German, V. Srinivasan, and T. Aaron Gulliver, “Sc++: Predicting the programming language of questions and snippets of stack overflow,” *Journal of Systems and Software*, vol. 162, p. 110505, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2019.110505>
- [19] O. D. Castrillón, W. Sarache, and S. Ruiz, “Desempeño de técnicas tradicionales de programación de la producción frente a un algoritmo evolutivo,” *Información tecnológica*, vol. 29, pp. 141–154, 2018. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000200141>
- [20] W. Aucahuasi, G. Bernardo, M. Bernardo, D. Vega, R. Urbano, and E. Oré, “Herramienta interactiva en línea como instrumento para el aprendizaje de las matemáticas mediante las técnicas de programación, dirigido a alumnos de educación secundaria,” in *16th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: Innovation in Education and Inclusion*, 2018, pp. 19–21. [Online]. Available: <https://doi.org/10.18687/LACCEI2018.1.1.573>
- [21] L. Gómez-López, B. Tena-Blanco, R. Bergé-Ramos, M. Coca-Martínez, C. Forero-Cortés, and C. Gomar-Sancho, “Nueva plantilla para diseñar escenarios de simulación: interrelación de elementos en un vistazo,” *Educación Médica*, vol. 19, pp. 350–359, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.edumed.2017.12.001>

- [22] M. L. Alfonso-Mora, A. L. Castellanos-Garrido, A. del Pilar Villarraga Nieto, M. L. Acosta-Otálora, C. Sandoval-Cuellar, R. del Pilar Castellanos-Vega, R. L. Goyeneche-Ortegón, and E. A. Cobo-Mejía, “Aprendizaje basado en simulación: estrategia pedagógica en fisioterapia. revisión integrativa,” *Educación Médica*, vol. 21, no. 6, pp. 357–363, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.edumed.2018.11.001>



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE EQUIPO DE VENTILACIÓN MECÁNICA AUTOMATIZADA PARA ASISTIR INSUFICIENCIA RESPIRATORIA

DESIGN AND CONSTRUCTION OF AUTOMATED MECHANICAL VENTILATION EQUIPMENT TO ASSIST RESPIRATORY FAILURE

Gilberto Carrillo¹ , Mauricio Gómez^{2,*}

Jaime Rodas¹ , Rafael Pimentel¹

Recibido: 11-10-2021, Recibido tras revisión: 06-12-2021, Aceptado: 15-12-2021, Publicado: 01-01-2022

Resumen

Este documento presenta los requerimientos cumplidos para el diseño, construcción y primera validación de un sistema de ventilación mecánica para ser utilizado en pacientes con insuficiencia respiratoria, que en el contexto inicial fuera a causa de la pandemia de COVID-19. El diseño requirió el uso de *software* de dibujo asistido por computadora (*Computer Aided Design*) CAD y la construcción necesitó el uso de las capacidades instaladas en manufactura mecánica, electropneumática, electrónica, biomédica y automatización de los institutos y centros de la Universidad Don Bosco (El Salvador). Los trabajos de ajuste, configuración y programación estuvieron a cargo de docentes investigadores especialistas en dichas disciplinas. Los elementos empleados para su construcción estaban disponibles en el mercado salvadoreño, considerando el cierre de las fronteras como medida gubernamental ante la expansión de la pandemia. Luego de la etapa de diseño, fabricación y puesta en funcionamiento, se realizaron mediciones de las condiciones del aire suministrado con la ayuda de profesionales dedicados al mantenimiento de equipo médico y con el visto bueno de doctores internistas. Los resultados conseguidos son los que se obtienen con equipos paramédicos y con equipos de primera asistencia, por lo cual se ha previsto que el equipo pueda ser probado en una siguiente instancia con el gremio médico certificado.

Palabras clave: ventilación mecánica, respiración asistida, COVID-19, insuficiencia respiratoria

Abstract

This document presents the requirements met for the design, construction and first validation of a mechanical ventilation system to be used in patients with respiratory failure, which in the initial context was due to the COVID-19 pandemic. The design required the use of computer aided drawing software (*Computer Aided Design*) CAD and the construction required the use of installed capabilities in mechanical, electropneumatic, electronic, biomedical and automation manufacturing of Don Bosco University (El Salvador) institutes and centers. The adjustment, configuration and programming works were in charge of research professors specialized in these disciplines. The elements used for its construction were available in the Salvadoran market, considering the closure of the borders as a government measure in face of the expansion of the pandemic. After the design, manufacture and commissioning stage, measurements of the conditions of the supplied air were made with the help of professionals dedicated to the maintenance of medical equipment and with the approval of internist doctors. The results achieved are those obtained with paramedical equipment and with first aid equipment, for which it has been foreseen that the equipment can be tested in a subsequent instance with the certified medical union.

Keywords: Mechanical ventilation, assisted respiration, COVID-19, respiratory insufficiency

¹Centro de Innovación en Diseño Industrial y Manufactura, Universidad Don Bosco, El Salvador.

^{2,*}Instituto de Investigación e Innovación en Electrónica, Universidad Don Bosco, El Salvador.

Autor para correspondencia ✉: mauricio.gomez@udb.edu.sv

Forma sugerida de citación: Carrillo, G.; Gómez, M.; Rodas, J. y Pimentel, R. "Diseño y construcción de equipo de ventilación mecánica automatizada para asistir insuficiencia respiratoria," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 27, pp. 17-22, 2022. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n27.2022.02>.

1. Introducción

A inicios del año 2020, América se convierte en el epicentro de la pandemia de SARS-CoV-2 (*Severe acute respiratory syndrome coronavirus-2*) [1, 2], y en marzo es declarada pandemia mundial debido a su facilidad de propagación como efecto de la globalización que se vive [3]. En El Salvador, en ese mismo mes, se registra su primer caso confirmado. Para ese momento se habían activado en el país diferentes protocolos para evitar los contagios masivos en la población. Sin embargo, ya se preparaban hospitales para la atención de futuros pacientes.

En la línea de visualizar el posible impacto de la pandemia en el país, se contemplaron escenarios como la construcción de un hospital especializado para la atención de pacientes con COVID-19 (del inglés, *Corona Virus Disease - 2019*), fortalecimiento de la capacidad instalada de los hospitales existentes, abastecimiento de oxígeno, posibles medicamentos para el tratamiento de pacientes, entrenamiento y contratación de personal médico para atención de pacientes, entre más acciones. En este último caso, es evidente que cuando un paciente requiere atención personalizada con un equipo de asistencia manual para la respiración, el médico o el auxiliar que lo asiste no puede atender a otro paciente y se convierte en un recurso menos para la atención de las personas, cuyo impacto puede reducirse si se provee de un equipo automatizado que sea fácil de instalar y de usar durante las emergencias.

Las previsiones por posible carencia de equipos para asistencia respiratoria motivaron a los investigadores a proponer sistemas alternativos de ventilación mecánica [4, 5] a partir de las unidades de respiración manual auxiliar AMBU (del acrónimo en inglés *Auxiliary manual breathing unit*) [6, 7]. Con esta iniciativa se buscó la colaboración entre el Centro de Innovación en Diseño Industrial y Manufactura (CIDIM) y el Instituto de Investigación e Innovación en Electrónica (IIIE), con la gestión de recursos especiales del Instituto de Investigación en Energía (IIE) y el apoyo de la cooperación de la Embajada de Estados Unidos en El Salvador.

Para determinar el mejor diseño del sistema, y considerando las fortalezas y capacidad de los centros e institutos, se planteó que cumpliera con los siguientes requisitos:

- Aprovechar la existencia de un resucitador manual [8] que usan los paramédicos y los médicos internistas.
- Operar el resucitador por dos sistemas, uno electroneumático y otro electrónico.
- Que los accesorios estructurales fueran de fácil fabricación en talleres de metal mecánica.

- Los sensores de monitoreo especializados serían gestionados a través del American Space UDB del IIE [9], debido a la cuarentena nacional que dificultaba las importaciones de la industria local.

2. Materiales y métodos

En su fundamento básico el sistema diseñado consta de un control electroneumático que acciona un equipo de resucitación manual. Las señales de operación son dadas por un controlador lógico programable, que recibe señales eléctricas de sensores que monitorean el ritmo cardíaco y el nivel de concentración de oxígeno en el aire que se suministra.

La primera etapa del diseño consistió en reuniones entre los investigadores técnicos con médicos intensivistas del Hospital San Rafael. En estas reuniones se determinaron las variables de control que deben ser monitoreadas en los pacientes, como son el volumen de aire según la consistencia del paciente, la cantidad de ciclos por minutos que requieren los pacientes de acuerdo con su cuadro clínico, la presión de ventilación, la presión de fin de espiración positiva (PEEP, en inglés *positive end-expiratory pressure*) [4], [10], el caudal de aire y la relación inspiratoria/espiratoria (I/E). Otro requerimiento importante es que el sistema debería trabajar en tres tipos de ciclos: ciclado por volumen, ciclado por presión y ciclado por combinación de presión y volumen. Sin embargo, con el visto bueno del médico intensivista se optó por el ciclado por volumen, que es una forma simple y efectiva de operación, siempre tomando en cuenta que es una medida emergente [11].

El diseño debería suministrar una ventilación adecuada para los pacientes previo a la liberación de un respirador específico [12], por lo cual se consideró el volumen corriente y la frecuencia respiratoria que mantuviera estable a los pacientes [13]. El volumen corriente se determinó bajo una relación con el peso ideal de los pacientes y se calcula tomando como referencia el peso de las personas:

PCI (peso corporal ideal, kilogramos) hombres [14]:
 $50 + 2,3 \cdot (\text{talla en pulgadas} - 60)$ o
 $50 + 0,9 \cdot (\text{talla en cm} - 152,4)$

PCI (peso corporal ideal, kilogramos) mujeres:
 $45,5 + 2,3 \cdot (\text{talla en pulgadas} - 60)$ o
 $45,5 + 0,9 \cdot (\text{talla en cm} - 152,4)$

En cuanto a la frecuencia respiratoria, el ciclo de inspiración y espiración tiene relación con la edad de los pacientes, siguiendo el comportamiento mostrado por la curva de la Figura 1.

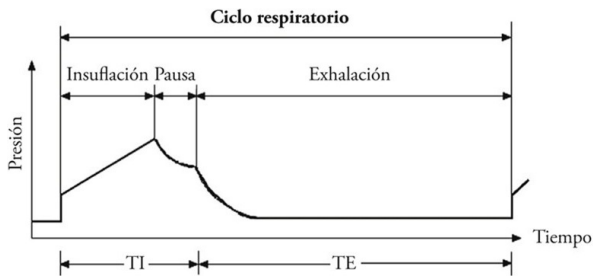


Figura 1. Ciclo respiratorio

La Figura 1 muestra la relación I/E [15], inspiración [16] (insuflación) y espiración (exhalación), el cual se puede ajustar a valores 1:3. Pero si la condición de los pacientes es preexistencia de asma [17] o exacerbaciones de enfermedad pulmonar obstructiva crónica se pueden realizar ajustes de 1:4.

Luego de obtener los requerimientos de operación se elaboró el diseño estructural con ayuda de *software* CAD [18] y manufactura liviana de impresión 3D [19] con el resultado que se presenta en la Figura 2.

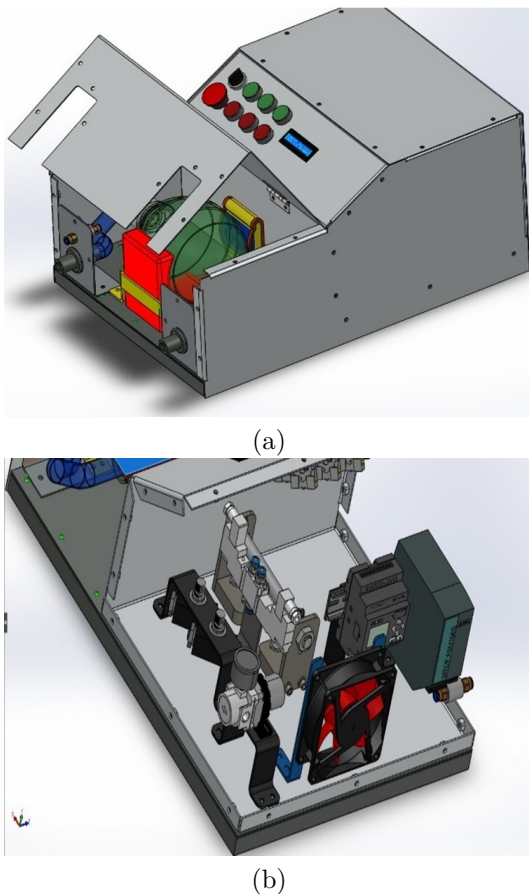


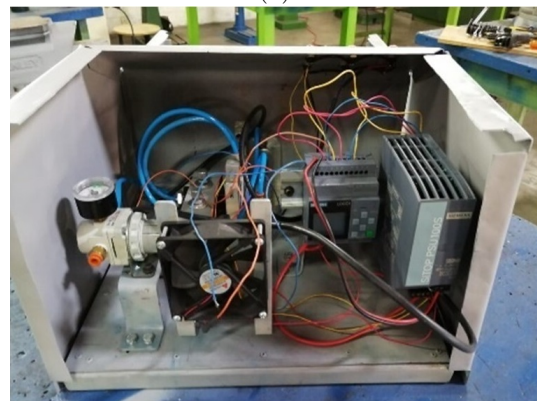
Figura 2. Diseño del sistema con ayuda del *software* CAD

La Figura 2 muestra el diseño obtenido del estructural y el sistema electroneumático. En (a) se muestra la distribución estructural para sostener el resucitador, la colocación de los accesos a las conexiones de aire

de entrada y salida, junto con las válvulas reguladoras de presión del resucitador, la compuerta móvil, la cubierta con el juego de botoneras y pantalla de información. En (b) se muestra la distribución del sistema de control electroneumático constituido por la electroválvula neumática 5/3 biestable, reguladores de flujo unidireccionales, regulador de presión, controlador lógico programable PLC (del acrónimo en inglés Programmable Logic Controller), ventilador, adaptadores eléctricos y neumáticos, soportes y configuración de la base estructural.



(a)



(b)

Figura 3. Construcción del sistema electroneumático

La Figura 3 muestra el sistema estructural (a) y electroneumático (b) ya finalizado, listo para realizar las pruebas y mediciones. Es importante destacar que todos los elementos instalados de los sistemas de control estaban en plaza, porque debido al encierro a causa de la pandemia de COVID-19 no se podían realizar importaciones en El Salvador. Y al necesitar replicar el sistema, se haría sin dificultad.

Para el control del proceso se utilizó un micro PLC de la familia SIEMENS. Este es un LOGO en su versión 8.0, el cual puede manejar 4 salidas digitales o mejor conocidas como salidas a relés, las cuales se encargarán de gobernar las válvulas y electroválvulas que

el sistema requiere. De igual manera, por medio de la botonera se podrá controlar la cantidad de repeticiones por minuto que el paciente demande y a criterio del médico tratante.

Para el desarrollo del sistema de control se tomó en cuenta la gráfica de la Figura 1, donde se puede ver el proceso de respiración, y donde el especialista pueda determinar si el paciente requiere de 12, 14, 16 o más repeticiones por minuto para su tratamiento. Cabe mencionar que el programa es versátil para ser modificado en cualquier momento, para configurarlo en las cadencias que requieran los médicos internistas.

El PLC cuenta con una pantalla que le permitirá al especialista ver la selección de los valores de las repeticiones que ha seleccionado y los botones están señalizados para evitar confusiones en un momento determinado. El sistema electroneumático está preparado para recibir aire comprimido de la infraestructura del hospital, por lo cual se ha previsto que se utilice en la alimentación neumática de las electroválvulas de control.

El diseño del sistema se preparó para colocar procesos de control programados en el autómata que le permitan a los especialistas tener la certeza de cuantas repeticiones están seleccionando para el paciente. De momento, el sistema es de lazo abierto, ya que no se cuentan con los sensores adecuados que nos permitan hacer los lazos de control respectivos. Sin embargo, en una siguiente versión pueden instalarse sensores adecuados para que el sistema se autorregule de acuerdo con la información suministrada por los sensores y convertirlo a un sistema de lazo cerrado.

En la Figura 4 se aprecia las conexiones que se tienen entre el autómata y las diferentes partes del respirador.

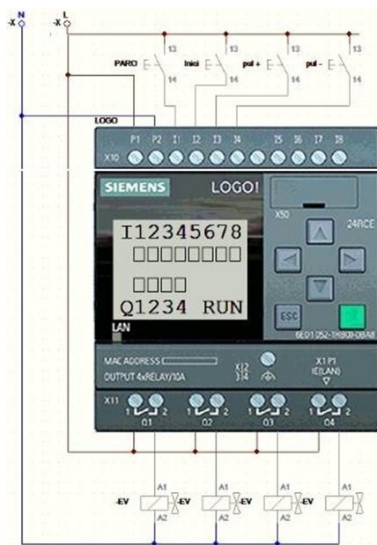


Figura 4. Configuración del autómata

3. Resultados y discusión

Debido a la concordancia entre los planos y el equipo final, se considera que el prototipo conceptual es de fácil reproducción en su componente estructural y electroneumático.

Para realizar pruebas de funcionamiento y verificar que cumple los parámetros indicados por el médico internista, se realizaron mediciones por parte de personal de INFRA de El Salvador, que se dedica al mantenimiento de equipo de ventilación mecánica asistida, con el uso de equipo especializado.



(a)



(b)

Figura 5. Equipo para medición de parámetros de operación

La Figura 5 presenta el equipo para medición: (a) hace constar que es un Certifier FA TSI High Flow Module [20] y (b) presenta el valor detectado de 0,301 litros de aire y 15,2 insuflaciones por minuto (BPM, Blow per minute). Los valores mostrados coinciden con los indicados por médicos internistas para pacientes con edades entre 25 y 40 años, con 15 a 19 inspiraciones por minuto, valores que se pueden regular programando el autómata y variando el regulador de flujo, estableciendo pulsadores predefinidos para dichos parámetros y para condiciones médicas de los pacientes. Adicionalmente se realizaron mediciones con equipo NI ELVIS [21] del laboratorio de Biomédica de la Universidad, con el que se construyó un gráfico a partir de las señales detectadas por los sensores, y que

coincide con los datos obtenidos con los especialistas de INFRASAL.

La Tabla 1 muestra los datos medidos con el equipo TSI, indicando las respiraciones por minuto (RPM), el volumen de aire mínimo y máximo en mililitros, el flujo de aire mínimo y máximo en litros por segundo, la presión de aire mínima y máxima en centímetros de agua. El equipo fue configurado para 15 y 19 RPM a solicitud de los especialistas. Cuando se configuró para 15 RPM se tuvo la transferencia de volumen desde 290 hasta 330 ml, el flujo varió desde 2,5 hasta 3 l/s y la presión alcanzada fue de 42 cm H₂O. Al configurar el equipo para 19 RPM se tuvo la transferencia de volumen desde 270 hasta 320 ml, el flujo varió desde 2,5 hasta 3 l/s y la presión alcanzada fue de 40 cm H₂O [22,23]. En ambos casos se consideran los valores alcanzados como adecuados.

Tabla 1. Mediciones realizadas con equipo TSI

	RPM	Volumen (ml)		Flujo (l/s)		Presión (cm H ₂ O)	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
1	15	290	330	2,5	3	-	42
2	19	270	320	2,5	3	-	40

4. Conclusiones

Algunas de las competencias fuertes de la Universidad Don Bosco residen en las áreas de electrónica, automatización y manufactura, por lo cual se propone el diseño del sistema de ventilación mecánica, asistido por sistemas de control automático. El apoyo brindado por American Space UDB es clave para obtener elementos electrónicos que no se disponían a mano en ese momento por el cierre de las fronteras a causa de la pandemia, pero que son necesarios para el desarrollo de equipos automáticos y médicos, lo cual nos permite dar respuesta ágil frente a desafíos de nivel mundial.

A partir del diseño y prototipo se pueden implementar mejoras, que lo vuelve más complejo, eficiente, preciso, pero que permite aplicarlo en mayor número de casos que se presentan a nivel médico.

Los sistemas diseñados y construidos son versátiles, porque pueden configurarse de acuerdo con los requerimientos de médicos y pacientes, en tiempos breves, tanto presencialmente como de manera remota. En el programa del PLC pueden cargarse diferentes programas simultáneamente, de forma que con pulsar diferentes botones o con cambiar la posición de una perilla, se puedan llamar diferentes programas para el funcionamiento del cilindro neumático (ciclos, longitud de carrera) acorde con el requerimiento de cada paciente.

Otra ventaja del PLC es que se le pueden conectar diferentes sensores clínicos y con la interpretación de

dichas señales se activan cambios automáticamente en las condiciones de operación del sistema de control neumático.

El sistema construido puede ser usado para estudios en medicina, en manufactura, en electrónica, en automatización, tanto en formación continua de especialistas, posgrado como en estudios de pregrado. Siempre con el objetivo de facilitar la ayuda humanitaria.

El modelo físico construido puede servir como referencia para el desarrollo futuro de modelos matemáticos y de simulación, en las áreas médica, ingeniería, etc.

Referencias

- [1] M. Ciotti, M. Ciccozzi, A. Terrinoni, W.-C. Jiang, C.-B. Wang, and S. Bernardini, "The COVID-19 pandemic," *Critical Reviews in Clinical Laboratory Sciences*, vol. 57, no. 6, pp. 365–388, 2020, pMID: 32645276. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/10408363.2020.1783198>
- [2] S. A. Lone and A. Ahmad, "COVID-19 pandemic an African perspective," *Emerging Microbes & Infections*, vol. 9, no. 1, pp. 1300–1308, 2020, pMID: 32458760. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/22221751.2020.1775132>
- [3] J. Watkins, "Preventing a COVID-19 pandemic," *BMJ*, vol. 368, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1136/bmj.m810>
- [4] M. Mittermaier, P. Pickerodt, F. Kurth, L. B. de Jarcy, A. Uhrig, C. Garcia, F. Machleidt, P. Pergantis, S. Weber, Y. Li, A. Breitbart, F. Bremer, P. Knape, M. Dewey, F. Doellinger, S. Weber-Carstens, A. S. Slutsky, W. M. Kuebler, N. Suttrop, and H. Müller-Redetzky, "Evaluation of PEEP and prone positioning in early COVID-19 ARDS," *EClinicalMedicine*, vol. 28, p. 100579, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.eclinm.2020.100579>
- [5] P. d. F. Chambergro Ruiz, "Diseño, simulación y control de un resucitador para respiratoria," 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/3IWbTBO>
- [6] L. Fiorineschi, F. S. Frillici, and F. Rotini, "Challenging COVID-19 with Creativity: Supporting Design Space Exploration for Emergency Ventilators," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 14, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app10144955>
- [7] A. Jumlongkul, "Automated AMBU Ventilator With Negative Pressure Headbox and Transporting Capsule for COVID-19 Patient Transfer," *Frontiers in Robotics and AI*,

- vol. 7, p. 221, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3389/frobt.2020.621580>
- [8] F. Pasquevich, A. Patanella, G. Garaventa, and M. Actis, “Respirador mecánico de emergencia,” *Innovación y Desarrollo Tecnológico y Social*, vol. 2, no. 2, pp. 134–166, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.24215/26838559e020>
- [9] IUS. (2020) Embajada de Estados Unidos dona a la UDB equipo tecnológico para el impulso de proyectos formativos. Instituciones Salesianas de Educación Superior. [Online]. Available: <https://bit.ly/3mmDqCG>
- [10] O. Heredia, X. Chunga, L. De la Cruz, and M. Zimic, “Diseño y evaluación de un ventilador mecánico,” *SciELO*, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3dZdWqu>
- [11] F. Aranda, J. Aliste, F. Altermatt, F. Alvarez, JP Bernucci, A. Bruhn, M. C. Cabrera, E. Carrasco, R. Castillo, R. De la Fuente, R. Díaz, J. I. Egaña, R. González, T. Honorato, H. J. Lacassie, M. López, W. Merino, A. Penna, F. Pizarro, D. Torres, R. Cristián, A. Bruhn, D. Acuña, and T. Regueira, “Recomendaciones para el manejo de pacientes con COVID-19 con indicación terapéutica de ventilación mecánica que eventualmente son conectados a máquinas de anestesia,” *Revista Chilena de Anestesia*, vol. 49, no. 3, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.25237/revchilanestv49n03.09>
- [12] G. Tusman, M. Campos, and E. Gogniat, “COVID-19: Cómo transformar un ventilador de no invasiva en un ventilador de críticos,” *Revista Española de Anestesiología y Reanimación*, vol. 67, no. 7, pp. 367–373, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.redar.2020.05.002>
- [13] W. Mazzotti, “Prácticas de enseñanza mediadas por la tecnología. Cómo enseñan los docentes en los foros de discusión de cursos que se desarrollan en modalidad a distancia,” *Cuadernos de Investigación Educativa*, vol. 2, no. 16, pp. 25–45, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.18861/cied.2009.2.16.2721>
- [14] F. Gutiérrez Muñoz, “Ventilación mecánica,” *Acta Médica Peruana*, vol. 28, pp. 87–104, 2011. [Online]. Available: <https://bit.ly/3mbefTB>
- [15] B. A. Rozas, J. V. Urrea, and J. G. Garzón, “Características de la ventilación mecánica invasiva en COVID-19 para médicos no especialistas,” *Revista Chilena de Anestesia*, vol. 49, no. 4, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.25237/revchilanestv49n04-06>
- [16] T. H. Barnes and M. Singer, “Low cost devices to help in COVID-19,” *Trends in Anaesthesia and Critical Care*, vol. 38, pp. 21–23, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.tacc.2021.03.011>
- [17] H. Kitazawa, N. Hizawa, Y. Nishimura, T. Fujisawa, T. Iwanaga, A. Sano, H. Nagase, H. Matsumoto, T. Horiguchi, S. Konno, and K. Asano, “The impact of the COVID-19 pandemic on asthma treatment in Japan: Perspectives based on doctors’ views,” *Respiratory Investigation*, vol. 59, no. 5, pp. 670–674, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.resinv.2021.06.004>
- [18] R. Prabhu, J. S. Masia, J. T. Berthel, N. A. Meisel, and T. W. Simpson, “Design and manufacturability data on additively manufactured solutions for COVID-19,” *Data in Brief*, vol. 36, p. 107012, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107012>
- [19] M. Larriba, D. Rodríguez-Llorente, A. C. nada Barcala, E. Sanz-Santos, P. Gutiérrez-Sánchez, G. P.-M. noz, S. Álvarez-Torrellas, V. I. Águeda, J. A. Delgado, and J. García, “Lab at home: 3D printed and low-cost experiments for thermal engineering and separation processes in COVID-19 time,” *Education for Chemical Engineers*, vol. 36, pp. 24–37, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ece.2021.02.001>
- [20] TSI. (2021) Certifier flow analyzer plus high flow module kit 4081. TSI Incorporated. [Online]. Available: <https://bit.ly/32k6a82>
- [21] NI. (2021) NI Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite (NI ELVIS). National Instruments. [Online]. Available: <https://bit.ly/3spEIAQ>
- [22] F. Ruza Tarrío, *Tratado de cuidados intensivos pediátricos*. Capitel Editores, 2002. [Online]. Available: <https://bit.ly/3p0DXvH>
- [23] S. H. Ochoa, M. I. Martínez, and G. E. J. Díaz, “Ventilación mecánica en pacientes con COVID-19 de acuerdo a los fenotipos de gatinoni,” *Acta Médica Grupo Ángeles*, vol. 18, no. 3, pp. 336–340, 2020. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.35366/95421>



CARACTERIZACIÓN DE DELUX: DISPOSITIVO DE ESTERILIZACIÓN POR LUZ ULTRAVIOLETA PARA MÁSCARAS PFF2/N95 CONTRA COVID-19

CHARACTERIZATION OF DELUX: ULTRAVIOLET LIGHT STERILIZATION DEVICE FOR PFF2 / N95 MASKS AGAINST COVID-19

Christiane Bertachini Lombello^{1,*} , Nasser Ali Daghashtanli¹ ,
 Hermann Windisch Neto¹ , Fernando Luiz Affonso Fonseca² ,
 Felipe Nogueira Ambrosio¹ , Raquel Arbex¹ ,
 Isabella Kobb Fernando¹ , Victor Allisson da Silva¹ ,
 Luisa Pataquini dos Santos¹ , Patricia Aparecida da Ana¹

Recibido: 15-11-2021, Recibido tras revisión: 20-12-2021, Aceptado: 26-12-2021, Publicado: 01-01-2022

Resumen

La Organización Mundial de la Salud (OMS) declaró un estado pandémico de salud pública debido a la transmisión del nuevo coronavirus el 11 de marzo de 2020. La COVID-19, causada por el SARS-CoV-2, tiene un espectro clínico muy amplio, con predominio de desarrollos sintomáticos respiratorios. El papel de los profesionales de salud en la lucha contra la pandemia requiere un equipo de protección personal (EPP). Las máscaras PFF2 / N95 son EPP adecuados para este propósito. Debido a la gran demanda de máscaras PFF2 / N95 para combatir la pandemia, hubo escasez en el mercado. Este trabajo tiene como objetivo caracterizar un dispositivo denominado DELUX para la esterilización por UVC (espectros de luz ultravioleta C) de mascarillas PFF2 / N95, ampliando su tiempo de uso seguro en condiciones de emergencia. La validación fotométrica del dispositivo permitió la verificación del espectro de emisión de las lámparas empleadas en el dispositivo y la medición de la potencia óptica, demostrando la idoneidad de la irradiación con luz UVC, en ciclos de 15 minutos, de forma segura. La validación biológica mostró que DELUX es capaz de desactivar el SARS-CoV-2 presente en la superficie de las mascarillas PFF2 / N95, siendo así eficiente para su esterilización extendiendo el tiempo de utilización de estas mascarillas.

Palabras clave: COVID-19, equipo, esterilización, protección, radiación, ultravioleta

Abstract

The World Health Organization (WHO) has declared a public health pandemic state due to the transmission of the new coronavirus on March 11th, 2020. COVID-19, that is caused by SARS-CoV-2, has a very broad clinical spectrum, with predominantly respiratory symptoms developments. The role of the health professionals in fighting the pandemic requires the use of Personal Protective Equipment (PPE). PFF2 / N95 masks are suitable PPEs for this purpose. Due to the high demand for PFF2 / N95 masks to fight the pandemic, there was a shortage of this PPE worldwide. This work aims to present a characterization of the device called DELUX, utilized for UVC (ultraviolet C light spectra) sterilization of PFF2 / N95 masks, and allowing to extend the time of safe use of this PPE in emergency conditions. The photometric validation of the device resulted in the verification of the emission spectrum of the lamps used in the device, and the measurement of the optical power, demonstrating the adequacy of irradiation with UVC light, with a 15-minute cycle, and safely. Biological validation showed that DELUX is capable of inactivating SARS-CoV-2 present on the surface of PFF2 / N95 masks, thus being efficient for their sterilization. The safety offered by the sterilization cycle allows to extend the safe use of those masks.

Keywords: COVID-19, equipment, protective, radiation, sterilization, ultraviolet

^{1,*}CECS, Federal University of ABC, UFABC, Brazil. Autor para correspondencia ✉: christiane.lombello@ufabc.edu.br.
²ABC Medical School, FMABC, Brazil

Forma sugerida de citación: Lombello, C. B.; Ali Daghashtanli, N.; Windisch Neto, H.; Affonso Fonseca, F. L.; Nogueira Ambrosio, F.; Arbex, R.; Kobb Fernando, I.; Da Silva, V. A.; Pataquini dos Santos, L. y Aparecida da Ana, P. "Caracterización de DELUX: Dispositivo de esterilización por luz ultravioleta para máscaras PFF2/N95 contra COVID-19," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 27, pp. 23-31, 2022. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n27.2022.03>.

1. Introducción

Los virus conocidos como coronavirus pertenecen al orden Nidovirales, familia Coronaviridae, subfamilia Coronavirinae, género Coronavirus (CoVs) [1]. Fueron identificados inicialmente durante la década de 1930 en aves, y muchos de ellos han sido asociados con enfermedades respiratorias, gastrointestinales, hepáticas y neurológicas en animales. Se conoce que algunos coronavirus causan enfermedades en humanos [2], de los cuales cuatro especies (229E, OC43, NL63 y HUK1) usualmente presentan síntomas de un resfriado común en humanos, y solo en raras ocasiones pueden resultar en una infección severa del tracto respiratorio inferior, como neumonía. Estos casos son particularmente importantes en niños, ancianos y pacientes inmunodeprimidos [3–5].

Sin embargo, otras tres especies consideradas zoonosis (SARS-CoV, MERS-CoV y SARS-CoV-2) están asociadas con infecciones respiratorias más graves en humanos, y pueden ser fatales [3, 4]. SARS-CoV fue identificado en 2002 como la causa del síndrome respiratorio agudo grave (SARS, *Severe Acute Respiratory Syndrome*), mientras que MERS-CoV fue identificado en 2012 como la causa del síndrome respiratorio de Oriente Medio (MERS, *Middle Eastern Respiratory Syndrome*) [4]. Más recientemente, SARS-CoV-2 (Figura 1), conocido como el nuevo coronavirus, fue detectado por primera vez en diciembre de 2019 en la ciudad de Wuhan (China), e identificado como el agente etiológico de la enfermedad capaz de agravar el sistema respiratorio [3], [6], con un impacto importante en la salud pública mundial debido a la consecuente morbilidad y mortalidad global [7, 8]. La Organización Mundial de la Salud (OMS) decidió llamar COVID-19 a la enfermedad por coronavirus (acrónimo del inglés coronavirus disease). El 11 de marzo de 2020, la OMS declaró el estado de pandemia en la salud pública, debido a la transmisión del nuevo coronavirus [9, 10].

La enfermedad COVID-19, causada por el SARS-CoV-2, tiene un espectro clínico muy amplio. Existen variaciones asintomáticas o distintos síntomas clínicos, tales como garganta irritada, diarrea, anosmia o hiposmia, mialgia, cansancio, fatiga; también se reportaron manifestaciones en la piel, como dermatosis y urticaria [8], [11, 12]. Sin embargo, principalmente los síntomas respiratorios como tos seca y dificultad para respirar, asociados con fiebre, y otros síntomas mencionados están directamente relacionados con las altas tasas de hospitalización y muerte resultantes de la enfermedad [8], [12].

El trabajo de los profesionales de la salud es fundamental para el combate contra la infección, en la prevención, detección, tratamiento y recuperación del paciente, y estos esfuerzos profesionales son reconocidos mundialmente [13]. Durante las actividades profesionales, el uso de equipo de protección personal (EPP)

puede proporcionar seguridad, previniendo accidentes o enfermedades ocupacionales. La Agencia Nacional de Vigilancia Sanitaria (*Agência Nacional de Vigilância Sanitária*, Anvisa) de Brasil ha establecido que el EPP requerido durante las actividades realizadas por profesionales de la salud con posible exposición al SARS-CoV-2 incluye gorro, lentes protectores o protector facial, máscara de protección quirúrgica o respiratoria, bata manga larga y guantes [14].

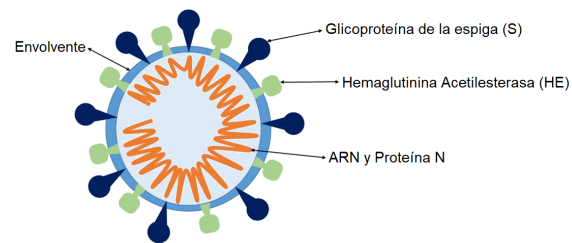


Figura 1. Estructura del coronavirus. Se representan la envoltorio, las proteínas de la cubierta (S y HE), la proteína N y el ARN viral

Dado que esta enfermedad es transmitida principalmente a través del aire, las máscaras son un EPP esencial para controlar su propagación. Estos dispositivos también se denominan equipos de protección respiratoria (EPR). Las máscaras quirúrgicas están indicadas para prevenir la contaminación de las vías respiratorias de los profesionales con gotitas respiratorias (partículas mayores a 5 μm) cuando están a menos de un metro del paciente. Sin embargo, no todas las máscaras protegen contra los aerosoles [14, 15]. A pesar de que estos cubrebocas, al igual que los de tela, no son consideradas EPP por Anvisa, su uso por parte de la población era obligatorio en muchos países, como Brasil, para contener la transmisión del COVID-19. En los servicios de salud, las mascarillas deben ser utilizadas por pacientes asintomáticos, visitantes, compañeros y profesionales en las áreas administrativas, quienes no tienen contacto con pacientes a distancias menores a un metro [14], [16].

Las máscaras conocidas como piezas de filtrado facial de media cara (PFF) son EPP con una eficiencia mínima de 95 % en el filtrado de partículas de hasta 0,3 μm . En Brasil los tapabocas se clasifican de acuerdo con el nivel de penetración y la resistencia a la respiración, en PFF1, PFF2 y PFF3. Para obtener protección contra aerosoles (esto es, partículas más pequeñas que las gotitas) que contengan agentes biológicos se requieren máscaras PFF2, equivalentes a la máscara N95 adoptada en los Estados Unidos [14], [16–18].

Estos EPR deben ser empleados por profesionales de la salud que trabajen en procedimientos donde exista el riesgo de generación de aerosoles, tales como recolección de secreciones nasotraqueales, broncoscopias, ventilación no invasiva, ventilación manual antes de la intubación, intubación o aspiración traqueal,

y resucitación cardiopulmonar. Adicionalmente, también se recomiendan estos EPP para profesionales de apoyo que llevan a cabo sus actividades en áreas donde se realizan procedimientos que generan aerosoles [14], [16]. Sin embargo, en casos de uso prolongado, es importante que este equipo permanezca ajustado a la cara, y funcional. En este contexto, el Instituto Brasileño para la Seguridad del Paciente (IBSP) advierte que estas máscaras se mantienen efectivas cuando se utilizan hasta ocho horas consecutivas [19]. Las máscaras PFF2/N95 están formadas por capas superpuestas de polipropileno de tela no tejida (TNT), que filtran el aire y atrapan partículas en el orden de 0,3 μm , incluyendo microorganismos tales como el virus SARS-CoV-2 [20].

El impacto de la pandemia de COVID-19 en los servicios de salud incluyó la alta demanda de los EPP utilizados por profesionales de la salud en el combate del coronavirus, lo que trajo como consecuencia una escasez en el suministro de este equipo. A pesar de que no es lo ideal, la falta de disponibilidad de máscaras PFF2/N95 en los mercados hacen necesario su reúso. Anvisa establece que los cubrebocas de protección respiratoria pueden servir más de lo previsto por el fabricante, en situaciones excepcionales. Sin embargo, el reúso de estos EPP por un período de tiempo más allá del considerado como seguro, expone a los profesionales de la salud a la contaminación por el virus, debido a las condiciones de uso, manejo y almacenamiento prolongado. La Nota Técnica GVIMS/GGTES/ANVISA N. 04/2020 [16] describe algunas recomendaciones de la Anvisa para emplear apropiadamente este EPP. El reprocesado de un EPP, que está regularizado por la Anvisa como desechable, debe garantizar que es seguro como un EPP nuevo, además de no afectar sus características de desempeño. Posibles protocolos de reprocesamiento deben ser validados para garantizar la esterilización del producto, así como también su integridad y funcionalidad [16].

Entre las alternativas desarrolladas para garantizar la seguridad en la extensión de la vida útil y la reutilización de estas máscaras, la esterilización de estos EPP con radiación UVC ha mostrado ser prometedora. Esta técnica, además de rehabilitar su empleo rápidamente, no requiere una gran infraestructura ni espacios elaborados, así como tampoco el reemplazo frecuente de suministros. Por lo tanto, la utilización de un dispositivo de esterilización con tal funcionalidad garantiza una posibilidad versátil de que, en principio, los trabajadores de la salud puedan esterilizar su EPP de manera segura y rápidamente [21].

Este artículo tiene como objetivo caracterizar un equipo de bajo costo y producción rápida, desarrollada en la región ABC de São Paulo, para la esterilización de máscaras PFF2/N95, con el propósito de extender el tiempo de uso de este EPP en condiciones de emergencia de escasez en el mercado debido a la pandemia actual de COVID-19.

2. Materiales y métodos

2.1. Emisión de lámparas UVC

La caracterización del espectro de emisión de las lámparas UVC (PURITEC 15W, Osram, Brasil) utilizadas en el dispositivo DELUX fue realizada empleando tres dispositivos diferentes.

2.1.1. Espectrofotómetro ultravioleta (UV-Vis) (Cary 50, Varian)

Se hicieron mediciones para obtener el espectro de emisión de las lámparas UVC (PURITEC 15W, Osram, Brasil).

2.1.2. Espectrómetro OCEAN OPTICS (UV-VIS-NIR spectrometer)

Este espectrómetro está acoplado a una fibra óptica ($\varphi = 400 \text{ nm}$) para medir la emisión de la lámpara UVC *in situ*, esto es, dentro del equipo de esterilización y medición del ambiente interno de la cámara de irradiación.

2.1.3. Medidor de potencia óptica FieldMaxII-TO (Coherent-USA)

El medidor de potencia se acopló al sensor PM-10 (Coherent-USA) para establecer los valores de potencia por área (mW/cm^2) a través del sensor semiconductor PM10 en la región espectral deseada.

2.2. Pruebas biológicas

La validación de la eficacia fue realizada juntamente con la Facultad de Medicina ABC (FMABC). Para asegurar la correcta esterilización de la máscara PFF2/N95 a través del sistema DELUX, se propuso una metodología para evaluar la efectividad contra la presencia de virus luego del ciclo de esterilización. Para este estudio, los virus fueron detectados utilizando RT-PCR (reacción en cadena de la polimerasa) [22, 23].

Se usaron tres máscaras N95 del mismo tipo de las empleadas por profesionales de la salud durante sus actividades diarias (en particular el respirador para riesgos biológicos 8801H 9 PFF-2, marca 3M®, Brasil). Una muestra de control con el virus SARS-CoV-2 fue considerada para imitar la contaminación frontal de la máscara, siguiendo procedimientos experimentales. Inicialmente, un hisopo que contenía una muestra viral sirvió para dispersar el contenido de abajo arriba y de izquierda a derecha. El hisopo se utilizó seis veces para dispersar el contenido en las direcciones anteriores en cada una de las máscaras, que luego se dejaron reposar a temperatura ambiente durante tres minutos, en un gabinete de bioseguridad. Posteriormente, las máscaras fueron colocadas en el dispositivo DELUX

para maximizar su iluminación completa con luz UVC. La irradiación se hizo en un único ciclo de 15 minutos.

Luego de la irradiación, se recolectaron las muestras. Para este propósito, las máscaras se mantuvieron durante un minuto en un gabinete de bioseguridad, y se tomó un hisopo estéril para frotar la superficie de la máscara en la región anterior de abajo a arriba y de izquierda a derecha; este proceso fue repetido seis veces. El hisopo fue colocado en una solución de extracción para obtener el ARN viral. La extracción y amplificación del ARN se hizo siguiendo el protocolo de los Centros para el Control y Prevención de Enfermedades (CDC, Centers for Disease Control and Prevention).

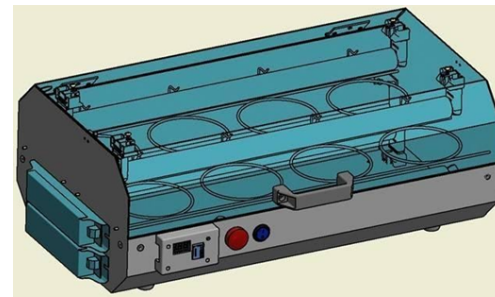
3. Resultados y discusión

Una de las posibles medidas adoptadas mundialmente para la esterilización de máscaras PFF2/N95 es la esterilización con radiación UVC, un agente físico. La luz ultravioleta está en el espectro electromagnético, y la radiación UVC comprende longitudes de onda entre 190 y 280 nm, ubicadas dentro del espectro de la luz UV (espectro electromagnético entre 100 y 390 nm). Sin embargo, las longitudes de onda por debajo de 200 nm no tienen importancia biológica, ya que son absorbidas intensamente por el aire [24].

Las lámparas de radiación UVC utilizadas para acciones germicidas usualmente tienen su emisión pico a una longitud de onda de 254 nm. Este parámetro es adecuado para la desactivación de varios microorganismos, incluyendo coronavirus, tal como se estableció en estudios previos con SARS-CoV y MERS-CoV [25, 26]. El efecto fotolítico de la radiación UVC es capaz de destruir o inactivar los microorganismos, evitando que se multipliquen. Este efecto es absorbido intensamente por ácidos nucleicos y proteínas, causando la disrupción de bases de ácidos nucleicos y la desactivación de enzimas. A diferencia de otras técnicas, su acción fotolítica raramente produce subproductos potencialmente peligrosos [27–29].

El dispositivo denominado DELUX (Figura 2) fue desarrollado en alianza con la Facultad de Medicina ABC, FMABC, y con la compañía con sede en la región ABC de São Paulo (llamada Ecosan). Este dispositivo fue fabricado con materiales compatibles con su propósito y uso; principalmente se utilizaron 304 láminas de acero inoxidable, asa de transporte, sistema eléctrico para alimentar cuatro lámparas ultravioletas (PURITEC 15W, Osram, Brasil), sistema automatizado de temporización, indicador LED de activación de la lámpara y sistema de seguridad para evitar la activación de las lámparas con el equipo abierto. El dispositivo permite la ubicación simultánea de hasta 16 máscaras, en nichos que permiten la identificación de cada una. Se validó la eficacia fotométrica del dis-

positivo y la verificación de la eficacia biológica contra el coronavirus.



(a)



(b)

Figura 2. DELUX. (a) prototipo, (b) dispositivo

3.1. Medidas fotométricas

La luz ultravioleta (UV) es la parte del espectro electromagnético caracterizada por longitudes de onda (λ) más pequeñas que las del espectro de la luz visible (VIS), que varía entre 400 nm y 800 nm. El rango espectral de la luz UV está entre 100 y 400 nm, y dividido en tres regiones diferentes: UVA (onda larga) entre 315 y 400 nm; UVB (onda media) entre 280 y 315 nm, y UVC (onda corta) entre 100 y 280 nm [24]. La luz UVC tiene un efecto germicida en comparación con la luz visible [24], [28, 29].

Con respecto a la seguridad, la exposición a UVC puede causar varios efectos biológicos adversos, tales como inflamación aguda de tejidos humanos, conjuntivitis, eritema y, adicionalmente, está asociada a alteraciones cromosómicas que incluso pueden causar algunos tipos de cáncer [24]. Por lo tanto, la luz UV debe usarse cuidadosamente para prevenir posibles efectos adversos. Los efectos biológicos de la acción de la luz UV pueden evaluarse en función del daño a través del parámetro de efectividad espectral relativa, $S(\lambda)$, por lo que hay que ser cuidadosos cuando ocurre una exposición a luz UV [24], [26], [28, 29].

Las mediciones de la potencia óptica de las lámparas utilizadas en el prototipo DELUX se iniciaron con la caracterización fotométrica de las PURITEC 15W, (Osram, Brasil), midiendo el espectro de emisión en la región UV-VIS (espectrofotómetro Varian), como se muestra en la Figura 3. Se observaron los picos de emisión típicos a longitudes de onda específicas.

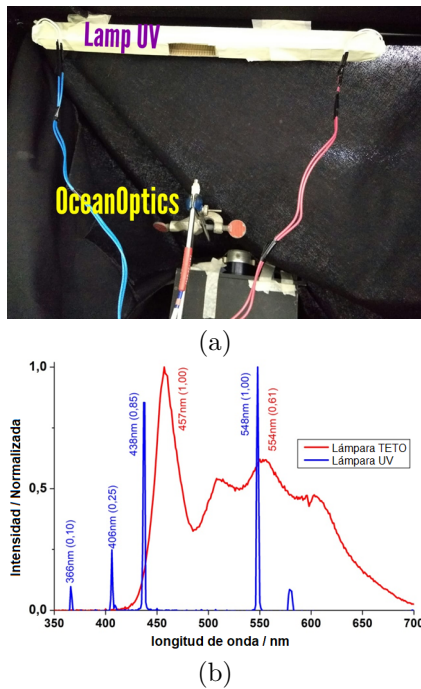


Figura 3. (a) Montaje experimental con la sonda de luz (Ocean Optics). (b) Espectro de emisión de una lámpara de luz blanca (lámpara TETO) y luz UVC (lámpara UV). Picos de emisión en la región de interés, por debajo de 400 nm

Las mediciones de las intensidades de las emisiones de potencia fueron complementadas con el medidor de potencia óptica. Las mediciones de la potencia emitida por la lámpara UVC se realizaron utilizando una emisión pico a $\lambda = 256 \text{ nm}$ y $\lambda = 438 \text{ nm}$, mostradas en la Figura 4. Estos datos permitieron evaluar la emisión de las lámparas UVC utilizadas en el DELUX a las longitudes de onda (λ) relevantes (Figura 4).

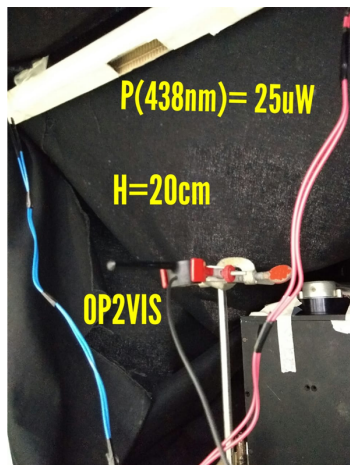


Figura 4. Montaje para medir la potencia de la luz UV emitida por las lámparas UV. Las mediciones fueron hechas con dos sondas de potencia diferentes (coherentes), OP2-VIS y PM10 (para UVC). altura (H), potencia óptica (P)

Se hicieron mediciones temporales de la emisión de luz UVC (a 256 nm) desde el momento en que se encendieron las lámparas, a intervalos de 800 s. La Figura 4 muestra la curva cinética de la emisión de la lámpara UV. Se observa que la eficiencia de emisión de potencia de la lámpara se incrementa desde un transitorio de tipo exponencial hasta una emisión constante (Figura 5).

Para las mediciones se utilizaron las lámparas UV en el interior del dispositivo, y se verificó una posible fuga de luz hacia el exterior del mismo. El equipo tiene instaladas mantas de caucho que fueron efectivas para bloquear completamente la luz. No se obtuvieron mediciones de potencia de luz fuera del dispositivo, cuando estaba cerrado y encendido, con las lámparas activadas, lo cual es un resultado importante para garantizar la seguridad de los usuarios.

Para que la esterilización sea efectiva, deben tomarse en cuenta algunos factores. La dosis (o intensidad) de luz entregada (J/cm^2) se determina como el producto de la irradiancia de la fuente de luz (mW/cm^2) y el tiempo de irradiación. La dosis de luz debe ser suficiente y adecuada para penetrar el material a ser esterilizado. La penetración de la radiación de luz es controlada por el coeficiente de absorción del material: a menor coeficiente, más exitosa es la aplicación [28, 29].

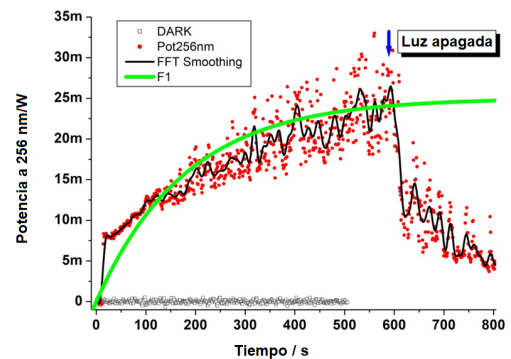


Figura 5. Curva cinética de la emisión de la lámpara UV. Mediciones temporales. Los puntos rojos son el ajuste monoexponencial de la emisión de luz a 256 nm (10 Hz). La línea negra suaviza los puntos (FFT). La línea verde continua es el ajuste monoexponencial de la data experimental, la emisión de la lámpara UVC alcanza un valor máximo de 25 mW luego de 400 s. Potencia mínima emitida $\sim 8 \text{ mW}$

La eficiencia de la esterilización también depende de la regularidad y el área expuesta en la superficie del material, ya que existe una dosis mínima de radiación UVC para desactivar los microorganismos [20, 21], [28, 29]. Por lo tanto, una esterilización exitosa ocurrirá solamente si toda la superficie del material está expuesta a la radiación UVC, porque cualquier sombra producida por las capas de tela de

las máscaras puede reducir la efectividad de la esterilización. Dado que la superficie requiere luz UV de alta intensidad, las lámparas deben estar cerca del material a ser esterilizado [30].

Según los modelos de mascarillas pueden tener diferentes resultados de esterilización [21]. Las capas extra de protección externa pueden hacer difícil o incluso evitar que la luz UVC penetre hacia las capas más internas. Existen más estudios que permiten la estandarización de este procedimiento, y se recomiendan pruebas individuales para cada tipo de cubrebocas que se utiliza en un lugar en particular [21], [31].

La dosis recomendada de radiación UVC para garantizar una esterilización efectiva es 1 J/cm^2 . La dosis entre $0,5$ y $1,8 \text{ J/cm}^2$ fue capaz de desactivar 99,9 % de los patógenos, tales como algunos tipos de Influenza A, MERS-CoV, SARS-CoV y el bacteriófago MS2. La capacidad de filtrado de la máscara se mantuvo aún con dosis altas de radiación UVC [20, 21], [28–31].

El uso de luz UVC es una solución posible para la esterilización de máscaras N95 para su reuso, ya que tiene efectos antimicrobianos y antivirales y no generan residuos tóxicos que pueden permanecer en los tapabocas. La radiación UVC puede promover la degradación del propileno que constituye las capas de filtrado, pero esto es un proceso lento, en el cual dosis menores a 950 J/cm^2 no representan ninguna pérdida significativa de eficiencia de filtrado [32, 33].

3.2. Pruebas biológicas

Tras analizar los resultados, todas las muestras fueron clasificadas como «no detectadas». Fue posible concluir que las muestras probadas luego del procedimiento de dispersión del SARS-CoV-2 y enviadas a DELUX presentaron un resultado «no detectado», mostrando que el ciclo de 15 minutos de luz UVC con el dispositivo DELUX fue suficiente para esterilizar las mascarillas.

Debido a la alta demanda asociada con dificultades de producción y logísticas, la cantidad de máscaras N95 mostró ser limitada e insuficiente para atender a los profesionales de la salud durante la situación de pandemia [34, 35]. Anvisa determina que, debido a las situaciones de emergencia de salud pública, estas máscaras pueden ser excepcionalmente utilizadas por períodos de tiempo más largos y por un número mayor de veces que los especificados por el fabricante, lo cual debe hacerse con ciertas precauciones. Estas deben incluir protección EPP, manejo e inspección apropiada antes de cada período de uso [36, 37]. El límite de reuso no está estipulado por Anvisa, por lo cual debe ser recomendado por cada instalación de salud, y se sugiere promover protocolos apropiados relacionados con la reutilización de estos EPP, así como el cuidado de los profesionales de la salud con los EPP.

Un estudio de revisión demostró que una dosis de irradiación de 4 J/cm^2 resultó en un 3-log (99,9 %)

de reducción en la presencia viral, lo cual representa una descontaminación total en modelos utilizando el virus de la influenza [31]. Además de la dosis de irradiación, el tiempo transcurrido después de la contaminación también resultó en un decrecimiento en la presencia de microorganismos, con una reducción de 1 log (90 %) después de 24 horas [31]. Algunos estudios consideran un período de 60 segundos de irradiación para la esterilización [38]. Para el virus MERS-CoV, el tiempo apropiado fue cinco minutos [26]. Por otra parte, para el virus H1N1, el tiempo apropiado fue quince minutos, y la distancia entre la lámpara UVC y las máscaras fue veinticinco centímetros [39]. El dispositivo DELUX se basa en un ciclo de esterilización de quince minutos, proponiendo un ciclo único por día por máscara.

En Brasil, debido a la falta de fondos, muchos centros no tienen espacio o equipos para implementar o desarrollar protocolos asociados a la esterilización con radiación ultravioleta (UVC), y la falta de estos EPP ha sido un problema persistente desde el inicio de la pandemia. Este estudio permitió la caracterización del dispositivo DELUX que puede ser utilizado para esterilizar máscaras PFF2/N95 con radiación UVC, de una forma estandarizada, asegurando la extensión del tiempo de uso de estos EPP de manera segura para profesionales de la salud, como lo muestran las caracterizaciones fotométrica y biológica.

Otra ventaja de esta esterilización de máscaras PFF2/N95 incluye la reducción de desechos potencialmente infecciosos generados por la eliminación de una gran cantidad de máscaras utilizadas en la pandemia de COVID-19 [40].

4. Conclusiones

El dispositivo DELUX se basa en una estrategia de esterilización por luz UVC para irradiar máscaras PFF2/N95 con un ciclo de quince minutos. Es un dispositivo de bajo costo, rápido y efectivo para esterilizar máscaras PFF2/N95, permitiendo su reuso apropiado y seguro para aliviar la escasez de EPP durante la pandemia de COVID-19. Las mediciones fotométricas muestran que el DELUX puede hacer una irradiación adecuada de luz UVC, lo cual resulta en una esterilización eficiente de los cubrebocas. Adicionalmente, las mediciones fotométricas garantizan que es un dispositivo seguro de manejar. La caracterización biológica resultó en una desactivación del virus SARS-CoV-2 en la superficie de las mascarillas.

Agradecimientos

A la UFBAC por el apoyo financiero, al Centro Multiusuario UFABC (CEM UFABC) por el apoyo con los equipos, a la Facultad de Medicina de la ABC

(FMABC) por la alianza y validación biológica, y a Ecosan por el desarrollo del dispositivo DELUX.

Referencias

- [1] S. Payne, "Family coronaviridae," *Elsevier Public Health Emergency Collection*, pp. 149–158, 2017. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-803109-4.00017-9>
- [2] J. S. M. Peiris, "Coronaviruses," *Elsevier Public Health Emergency Collection*, pp. 587–593. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.1016/B978-0-7020-4089-4.00072-X>
- [3] M. D. S. Cespedes and J. C. R. P. Souza, "Sars-cov-2: A clinical update - ii," *Revista da Associação Médica Brasileira*, vol. 66, no. 4, pp. 547–557. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1590/1806-9282.66.4.547>
- [4] M. Pal, G. Berhanu, C. Desalegn, and V. Kandi, "Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus-2 (SARS-CoV-2): An Update," *Pal M, Berhanu G, Desalegn C, Kandi V. Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus-2 (SARS-CoV-2): An Update. Cureus. 2020;12(3):e7423. Published 2020 Mar 26. doi:10.7759/cureus.7423*, vol. 12, no. 3, p. e7423, 2020. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.7759/cureus.7423>
- [5] D. X. Liu, J. Q. Liang, and T. S. Fung, "Human coronavirus-229E, -OC43, -NL63, and -HKU1 (*Coronaviridae*)," *Elsevier Public Health Emergency Collection*, pp. 428–440. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-809633-8.21501-X>
- [6] M. Wang, R. Cao, L. Zhang, X. Yang, J. Liu, M. Xu, Z. Shi, Z. Hu, W. Zhong, and G. Xiao, "Remdesivir and chloroquine effectively inhibit the recently emerged novel coronavirus (2019-nCoV) in vitro," *Cell research*, vol. 30, no. 3, pp. 269–271, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.34172/jrcm.2020.005>
- [7] S. H. Alfaraaj, J. A. Al-Tawfiq, A. Y. Asiri, N. A. Alzahrani, A. A. Alanazi, and Z. A. Memish, "Clinical predictors of mortality of Middle East Respiratory Syndrome Coronavirus (MERS-CoV) infection: A cohort study," *Travel Medicine and Infectious Disease*, vol. 29, pp. 48–50. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.tmaid.2019.03.004>
- [8] L. Piroth, J. Cottenet, A.-S. Mariet, P. Bonniaud, M. Blot, P. Tubert-Bitter, and C. Quantin, "Comparison of the characteristics, morbidity, and mortality of COVID-19 and seasonal influenza: a nationwide, population-based retrospective cohort study," *The Lancet Respiratory Medicine*, vol. 9, no. 3, pp. 251–259, 2021. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S2213-2600\(20\)30527-0](https://doi.org/10.1016/S2213-2600(20)30527-0)
- [9] FIOCRUZ. (2021) Por que a doença causada pelo novo coronavírus recebeu o nome de Covid-19? Fundação Oswaldo Cruz. [Online]. Available: <https://bit.ly/3pwoiEE>
- [10] J. Zhang, W. Wu, X. Zhao, and W. Zhang, "Recommended psychological crisis intervention response to the 2019 novel coronavirus pneumonia outbreak in China: a model of West China Hospital," *Precision Clinical Medicine*, vol. 3, no. 1, pp. 3–8, 02 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1093/pcmedi/pbaa006>
- [11] M. Relvas, J. Calvão, R. Oliveira, J. C. Cardoso, and M. Gonçalo, "Manifestações cutâneas associadas a COVID-19: Uma revisão narrativa," *Revista Científica da Ordem dos Médicos*, vol. 34, no. 2, pp. 128–136, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.20344/amp.14574>
- [12] M. C. Grant, L. Geoghegan, M. Arbyn, Z. Mohammed, L. McGuinness, E. L. Clarke, and R. G. Wade, "The prevalence of symptoms in 24,410 adults infected by the novel coronavirus (SARS-CoV-2; COVID-19): A systematic review and meta-analysis of 148 studies from 9 countries," *PLoS One*, vol. 15, no. 6, p. e0234765, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0234765>
- [13] E. A. S. Medeiros, "A luta dos profissionais de saúde no enfrentamento da COVID-19," *Acta Paul Enferm.*, p. 33, 2020. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.37689/acta-ape/2020EDT0003>
- [14] Secretaria de Vigilância em Saúde. (2021) Recomendações de proteção aos trabalhadores do serviço de saúde no contexto da pandemia da Covid-19. Ministério da Saúde, Brasil. [Online]. Available: <https://bit.ly/3pvZ3lX>
- [15] C. D. Cappa, S. B. Sima Asadi, A. S. Wexler, N. M. Bouvier, and W. D. Ristenpart, "Expiratory aerosol particle escape from surgical masks due to imperfect sealing," *Scientific Reports*, no. 11, p. 12110, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91487-7>
- [16] ANVISA, *Nota Técnica GVIMS/GGTES/ANVISA Nº 04/2020. Orientações para serviços de saúde: medidas de prevenção e controle que devem ser adotadas durante a assistência aos casos suspeitos ou confirmados de infecção pelo novo coronavírus (SARS-CoV-2)*. Agência Nacional de Vigilância Sanitária, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3z12T9X>

- [17] ABNT, *Equipamento de proteção respiratória – Filtros para partículas*. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2010. [Online]. Available: <https://bit.ly/3qwTiUF>
- [18] —, *Equipamento de proteção respiratória – Peça semifacial filtrante para partículas*. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). [Online]. Available: <https://bit.ly/3qqm09z>
- [19] IBSP. (2020) Máscaras n95 – recomendações para uso prolongado e reutilização. Instituto Brasileiro Para Segurança Do Paciente. [Online]. Available: <https://bit.ly/3Jpfd8D>
- [20] S. Duncan, P. Bodurtha, and S. Naqvi, “The protective performance of reusable cloth face masks, disposable procedure masks, KN95 masks and N95 respirators: Filtration and total inward leakage,” *PLoS One*, vol. 16, no. 10, p. e0258191, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0258191>
- [21] C. C. Ontiveros, D. C. Shoults, S. MacIsaac, K. D. Rauch, C. L. Sweeney, A. K. Stoddart, and G. A. Gagnon, “Specificity of UV-C LED disinfection efficacy for three N95 respirators,” *Scientific Reports*, no. 11, p. 15350, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94810-4>
- [22] D. B. Larremore, B. Wilder, E. Lester, S. Shehata, J. M. Burke, J. A. Hay, T. Milind, M. J. Mina, and R. Parker, “Test sensitivity is secondary to frequency and turnaround time for covid-19 surveillance,” *medRxiv: the preprint server for health sciences*, vol. 20, p. 20136309, Sep 2020. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.1101/2020.06.22.20136309>
- [23] CDC. (2020) Research Use Only 2019-Novel Coronavirus (2019-nCoV) Real-time RT-PCR Primers and Probes. Centers for Disease Control and Prevention. [Online]. Available: <https://bit.ly/3EBvJyF>
- [24] T. I. C. on Non-Ionizing Radiation Protection, “Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths between 180 nm and 400 nm (incoherent optical radiation),” *Health Physics*, vol. 87, no. 2, 2004. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1097/00004032-200408000-00006>
- [25] M. E. R. Darnell, K. Subbarao, S. M. Feinstone, and D. R. Taylor, “Inactivation of the coronavirus that induces severe acute respiratory syndrome, SARS-CoV,” *J Virol Methods*, vol. 121, no. 1, pp. 85–91, Oct. 2004. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jviromet.2004.06.006>
- [26] K. Bedell, A. H. Buchaklian, and S. Perlman, “Efficacy of an automated multiple emitter whole-room ultraviolet-C disinfection system against coronaviruses MHV and MERS-CoV,” *Infection Control & Hospital Epidemiology*, vol. 37, no. 5, pp. 598–599, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1017/ice.2015.348>
- [27] F. A. Alexandre, J. A. F. Faria, and C. F. Cardoso, “Avaliação da eficiência da radiação ultravioleta na esterilização de embalagens plásticas,” *Ciência e Agrotecnologia*, vol. 32, no. 5, pp. 1524–1530, 2008. [Online]. Available: <https://bit.ly/3mAbDie>
- [28] J. S. Smith, H. Hanseler, J. Welle, R. Rat-tray, M. Campbell, T. Brotherton, T. Moudgil, T. F. Pack, K. Wegmann, S. Jensen, J. Jin, C. B. Bifulco, S. A. Prah, B. A. Fox, and N. L. Stucky, “Effect of various decontamination procedures on disposable N95 mask integrity and SARS-CoV-2 infectivity,” *Journal of clinical and translational science*, vol. 5, no. 1, pp. e10–e10, Jun 2020. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.1017/cts.2020.494>
- [29] M. Biasin, A. Bianco, G. Pareschi, A. Cavalleri, C. Cavatorta, C. Fenizia, P. Galli, L. Lessio, M. Lualdi, E. Tombetti, A. Ambrosi, E. M. A. Redaelli, I. Saulle, D. Trabattoni, A. Zanutta, and M. Clerici, “UV-C irradiation is highly effective in inactivating SARS-CoV-2 replication,” *Scientific Reports*, vol. 11, no. 1, p. 6260, Mar 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85425-w>
- [30] CDC. Implementing Filtering Facepiece Respirator (FFR) Reuse, Including Reuse after Decontamination, When There Are Known Shortages of N95 Respirators. Centers for Disease Control and Prevention. [Online]. Available: <https://bit.ly/3sD9ypQ>
- [31] K. O’Hearn, S. Gertsman, M. Sampson, R. Webster, A. Tsampalieros, R. Ng, J. Gibson, A. T. Lobos, N. Acharya, A. Agarwal, S. Boggs, G. Chamberlain, E. Staykov, L. Sikora, and J. D. McNally, “Decontaminating N95 and SN95 masks with ultraviolet germicidal irradiation does not impair mask efficacy and safety,” vol. 106, no. 1, pp. 163–175. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2020.07.014>
- [32] L. Liao, W. Xiao, M. Zhao, X. Yu, H. Wang, Q. Wang, S. Chu, and Y. Cui, “Can N95 Respirators Be Reused after Disinfection? How Many Times?” *ACS nano*, vol. 14, no. 5, pp. 6348–6356, May 2020. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.1021/acsnano.0c03597>

- [33] W. G. Lindsley, S. B. Martin Jr., R. E. Thewlis, K. Sarkisian, J. O. Nwoko, K. R. Mead, and J. D. Noti, "Effects of ultraviolet germicidal irradiation (UVGI) on N95 respirator filtration performance and structural integrity," *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, vol. 12, no. 8, pp. 509–517, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/15459624.2015.1018518>
- [34] ABMT. 87 % das denúncias de falta de EPIs são sobre máscaras N95, diz AMB. Associação Brasileira de Medicina do Trabalho. [Online]. Available: <https://bit.ly/3JlBFj5>
- [35] J. Rose. (2020) Why can't america make enough N95 masks? 6 months into pandemic, shortages persist. NPR. SPECIAL SERIES The Coronavirus Crisis. [Online]. Available: <https://n.pr/3mBjImT>
- [36] K. Seresirikachorn, V. Phoophiboon, T. Chobarporn, K. Tiankanon, S. Aeumjaturapat, S. Chusakul, and K. Snidvongs, "Decontamination and reuse of surgical masks and N95 filtering facepiece respirators during the COVID-19 pandemic: A systematic review," *Infect Control Hosp Epidemiol*, vol. 42, no. 1, pp. 25–30, Jul. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1017/ice.2020.379>
- [37] E. C. Toomey, Y. Conway, C. Burton, S. Smith, M. Smalle, X.-H. S. Chan, A. Adisesh, S. Tanveer, L. Ross, I. Thomson, D. Devane, and T. Greenhalgh, "Extended use or reuse of single-use surgical masks and filtering face-piece respirators during the coronavirus disease 2019 (COVID-19) pandemic: A rapid systematic review," *Infect Control Hosp Epidemiol*, vol. 42, no. 1, pp. 75–83, Oct. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1017/ice.2020.1243>
- [38] NEVMS, *Descontaminação de máscaras de proteção respiratória modelo N95 (respirador particulado)*. Núcleo de Evidência de Mato Grosso do Sul, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/345EmW1>
- [39] B. K. Heimbuch, W. H. Wallace, K. Kinney, A. E. Lumley, C.-Y. Wu, M.-H. Woo, and J. Wander, "A pandemic influenza preparedness study: use of energetic methods to decontaminate filtering facepiece respirators contaminated with H1N1 aerosols and droplets," *American Journal of Infection Control*, vol. 39, no. 1, pp. e1–9, Dec. 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ajic.2010.07.004>
- [40] S. Sangkham, "Face mask and medical waste disposal during the novel COVID-19 pandemic in Asia," *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 2, p. 100052, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2020.100052>



EVALUACIÓN DE AIoT EN MODELOS COMPUTACIONALES EN LA NUBE Y EN EL BORDE APLICADO A LA DETECCIÓN DE MASCARILLAS

EVALUATION OF AIoT PERFORMANCE IN CLOUD AND EDGE COMPUTATIONAL MODELS FOR MASK DETECTION

Felipe Quiñonez-Cuenca^{1,*} , Cristian Maza-Merchán¹ ,
 Nilvar Cuenca-Maldonado¹ , Manuel Quiñones-Cuenca¹ , Rommel Torres¹ ,
 Francisco Sandoval¹ , Patricia Ludeña-González¹

Recibido: 15-11-2021, Recibido tras revisión: 20-12-2021, Aceptado: 27-12-2021, Publicado: 01-01-2022

Resumen

La COVID-19 ha provocado graves daños a la salud: centenas de millones de personas infectadas y varios millones de fallecidos en el mundo. Los programas de vacunación de cada Gobierno han influido en el decaimiento de estos índices, pero con la aparición de nuevas mutaciones del coronavirus más contagiosas, la preocupación sobre la efectividad de las vacunas se hace presente. Frente a esta situación el uso de mascarillas sigue siendo eficaz para prevenir la transmisión y contagio de la COVID-19. Lo que ha generado una creciente demanda de servicios de detección automática de mascarillas, que permita recordar a las personas la importancia del empleo de estas. En este trabajo se plantea un análisis del rendimiento de un sistema AIoT para la detección del uso correcto, incorrecto y sin mascarilla basado en dos modelos computacionales de Cloud y Edge, con la finalidad de determinar qué modelo se adecua mejor en un entorno real (interior y exterior) sobre la base de la confiabilidad del algoritmo, uso de recursos computacionales y tiempo de respuesta. Los resultados experimentales demuestran que el modelo computacional Edge presentó un mejor desempeño en comparación con el Cloud.

Palabras clave: AIoT, COVID-19, computación en la nube, computación de borde, detección de máscara facial, YOLO

Abstract

COVID-19 has caused serious health damage, infecting millions of people and unfortunately causing the death of several ones around the world. The vaccination programs of each government have influenced in declining those rates. Nevertheless, new coronavirus mutations have emerged in different countries, which are highly contagious, causing concern with vaccination effectiveness. So far, wearing facemasks in public continues being the most effective protocol to avoid and prevent COVID-19 spread. In this context, there is a demand of automatic facemask detection services to remind people the importance of wearing them appropriately. In this work, a performance evaluation of an AIoT system to detect correct, inappropriate, and non- facemask wearing, based on two computational models: Cloud and Edge, was conducted. Having as objective to determine which model better suites a real environment (indoor and outdoor), based on: reliability of the detector algorithm, use of computational resources, and response time. Experimental results show that Edge-implementation got better performance in comparison to Cloud-implementation.

Keywords: AIoT, COVID-19, Cloud Computing, Edge Computing, Face mask detection, YOLO

^{1,*}Departamento de Ciencias de la Computación y Electrónica, Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador.
 Autor para correspondencia ✉: fdquinones@utpl.edu.ec.

Forma sugerida de citación: Quiñonez-Cuenca, F.; Maza-Merchán, C.; Cuenca-Maldonado, N.; Quiñones-Cuenca, M.; Torres, R.; Sandoval, F. y Ludeña-González, P. "Evaluación de AIoT en modelos computacionales en la nube y en el borde aplicado a la detección de mascarillas," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 27, pp. 32-48, 2022. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n27.2022.04>.

1. Introducción

Actualmente, la humanidad está atravesando una crisis sanitaria debido a la pandemia COVID-19, provocada por la nueva cepa de coronavirus SARS-CoV-2 [1], la misma que ha afectado inesperada y drásticamente la salud, la economía y el estilo de vida de las personas a nivel mundial. El origen del virus fue identificado a finales del año 2019 en la ciudad de Wuhan, China. Posteriormente, el virus se expandió por todo el mundo y el 11 de marzo de 2020 la Organización Mundial de la Salud (OMS) declaró como pandemia global COVID-19 [2]. El SARS-CoV-2 ataca el sistema inmunológico de las personas. Aunque la mayor parte de personas que se infectan con el virus tienen síntomas leves y moderados, un grupo significativo de personas requieren de hospitalización, e incluso el uso de camas UCI (unidad de cuidados intensivos). Dicho virus se transmite principalmente a través de microscópicas gotas de plasma celular expulsado por la persona infectada al toser, estornudar o espirar [3].

Veinte meses de pandemia han dejado una huella en la historia de la salud de los seres humanos, lo que se evidencia a través de datos estadísticos oficiales. Hasta la fecha, 3 de diciembre de 2021, a nivel mundial, de acuerdo con las estadísticas de la OMS (2021), un poco más de doscientos sesenta y tres millones de casos han sido confirmados, de los cuales más de cinco millones fallecieron. A nivel continental, en América presenta el índice más alto de contagios en relación con los otros cinco continentes, cerca de 97 millones de casos confirmados se han reportado, de los cuales más de dos millones de personas fallecieron. Mientras que en el Ecuador, se registra más de 527 000 casos confirmados y más de 33 000 han perdido la vida [4].

Para neutralizar la pandemia COVID-19, los líderes de las naciones a nivel mundial tomaron cruciales decisiones, que desembocaron en problemas colaterales de los cuales la humanidad aún le cuesta trabajo recuperarse. Entre las medidas adoptadas están el confinamiento global, la implementación de protocolos de seguridad, e incluso la invención y distribución de vacunas.

En lo local, a mediados de marzo de 2020, el Gobierno ecuatoriano declaró el estado de emergencia, el cual involucró restricción a la movilidad, aislamiento y cierre de fronteras; medidas que afectaron gravemente la economía del país. Las empresas paralizaron su producción abruptamente, instituciones gubernamentales, educativas y financieras fueron forzadas a continuar sus actividades en línea.

Luego de cuatro meses y medio de confinamiento, la economía del país no podía continuar resistiendo y las restricciones fueron gradualmente eliminadas; pero para laborar presencialmente, protocolos de bioseguridad tenían que ser adoptados por la comunidad. Para prevenir el contagio y propagación del virus

SARS-CoV-2 se requiere de cada individuo: usar obligatoriamente mascarillas buconasales, evitar las aglomeraciones, guardar distancia, lavarse regularmente las manos con jabón y desinfectar continuamente las superficies de uso común con alcohol. El seguimiento estricto de los protocolos de bioseguridad ha sido la clave fundamental para prevenir el virus, puesto que inicialmente, debido a que el SARS-CoV-2 era nuevo, no existían medicamento especializado ni vacuna para proteger a las personas.

Hoy en día existen varias vacunas contra la COVID-19 disponibles. La Organización Panamericana de Salud (OPS) [5], en su sitio web oficial, ha puesto a disposición del público en general información relacionada con las vacunas contra la COVID-19, entre las cuales están Pfizer/BioNTech, Moderna, AstraZeneca, Janseen, Sinopharm, y Sinovac. Aunque hay varias vacunas, el proceso de vacunación no avanza de acuerdo con lo planificado. Según las estadísticas de Ritchie *et al.* [6], hasta la fecha (diciembre 2021) el 54,9 % de la población mundial ha recibido al menos una dosis de la vacuna COVID-19. Se han administrado más de ocho mil millones de dosis en todo el mundo, y cada día se administran treinta y cuatro millones.

Simultáneamente al proceso de vacunación mundial, nuevas variantes del virus COVID-19 han sido identificadas en diferentes regiones del planeta. El elevado número de infectados aumenta el riesgo de mutaciones del virus. Cuanto más se propague el virus, pequeños cambios ocurren en su código genético; lo que le permite sobrevivir y reproducirse. Múltiples variantes circulan globalmente, por ejemplo: la variante del Reino Unido, conocida como alpha; la variante de Sudáfrica, conocida como beta; la variante brasileña, conocida como gamma, la variante de la India, conocida como delta; y la última denominada ómicron, detectada en Sudáfrica. De acuerdo con los expertos, los virus mutan todo el tiempo y la mayoría de los cambios son intrascendentes. Pero otros pueden hacer que la enfermedad sea más infecciosa o amenazante, y estas mutaciones tienden a dominar [7].

El objetivo de la vacunación es lograr la inmunidad colectiva a nivel mundial para evitar que el SARS-CoV-2 continúe mutando, volviéndose más resistente a las vacunas actuales y provocando más períodos de mortalidad masiva. No obstante, la OPS, a finales de la primera semana de agosto, en vista de un alto índice de contagio de la «variante preocupante» (VOC, por su sigla en inglés) delta, en varios países, dentro y fuera de la región de las Américas, recomienda revisar los planes de contingencia y prepararse para un eventual aumento de casos y hospitalizaciones.

En este reporte se destaca que, el distanciamiento social, el uso de mascarillas buconasales y el uso de soluciones antisépticas continúan siendo las medidas más efectivas para reducir la transmisión de esta y todas las variantes.

A partir de los datos anteriormente mencionados, se puede deducir que la pandemia COVID-19 aún no se ha acabado, el futuro es incierto. Por ende, son necesarias la investigación e innovación para que den sus aportes tecnológicos a la sociedad en la lucha contra ella.

En este trabajo se describe el diseño, implementación y el análisis de desempeño de un sistema basado en dos modelos computacionales en la nube (Cloud) y en el borde (Edge), aplicado a la detección del uso de mascarilla en tiempo real mediante la aplicación de inteligencia artificial de las cosas (AIoT, por sus siglas en inglés). La importancia del desarrollo y evaluación del sistema radica en que se analiza el tiempo de respuesta, rendimiento del algoritmo de detección y recursos computacionales.

En la Sección II se describe el método propuesto, se detallan las arquitecturas computacionales y los componentes usados. En la Sección III se presentan los resultados del análisis de los modelos computacionales. Finalmente, en la Sección IV se evidencian las conclusiones y futuros trabajos.

2. Materiales y métodos

Mediante un diseño experimental y un enfoque cuantitativo el desarrollo de la investigación se dividió en cinco fases (ver Figura 1). A continuación, las actividades que se realizaron en cada una de las fases:

- **Análisis** del estado del arte de tecnologías habilitantes para AIoT, trabajos relacionados y algoritmos de detección, para detectar el uso de mascarillas en tiempo real.
- **Diseño** de una arquitectura y determinación de componentes de hardware y software, para el despliegue de los modelos computacionales en la nube y en el borde de la red.
- **Desarrollo** es la etapa en que se integran los componentes de software y hardware, y se implementa el algoritmo de detección y ejecución para detección de mascarillas en tiempo real, en los dos modelos computacionales.
- **Evaluación** es la etapa en que se determina un escenario controlado y escenarios reales, para realizar pruebas que permitan validar el rendimiento de los modelos computacionales.
- **Análisis** de los resultados para determinar el desempeño de los recursos utilizados en ambos modelos computacionales. Entre las métricas recopiladas se considera la demanda de recursos computacionales (CPU, RAM, memoria y almacenamiento), y el tiempo de respuesta del sistema.

Para analizar el desempeño del algoritmo de detección se evalúan la exactitud, la precisión, la revocación, la media armónica y la media de la precisión promedio.



Figura 1. Metodología

2.1. Arquitectura

Para el desarrollo del sistema se diseñó una estrategia de comparación que permita que los dos modelos computacionales sean dotados con las mismas o similares capacidades. Sin embargo, debido a que cada implementación tiene características intrínsecas que las diferencian una de la otra, la estrategia de comparación fue diseñada con dos estructuras, una común para ambos modelos computacionales y la específica de cada uno. En la Figura 2 se puede visualizar la disposición de cada uno de los componentes de hardware y software que forman parte de la arquitectura para el despliegue del sistema, segmentado en escenario, sensores y actuadores, modelos computacionales y actuadores.

La arquitectura del sistema integra una cámara IP para obtener el video del escenario de prueba, este se envía por medio del protocolo de transmisión en tiempo real (RTSP, por sus siglas en inglés) a los dos modelos computacionales, en estos se ejecuta el procesamiento del video aplicando el algoritmo de detección de objetos en tiempo real basado en YOLOv3 («You only look once v3») para determinar el uso correcto e incorrecto y sin mascarilla. El modelo computacional Edge realiza la inferencia en tiempo real y presenta los resultados en una pantalla marcando en un recuadro los rostros dependiendo del resultado con «Mask correct» (mascarilla correcta), «Mask incorrect» (mascarilla incorrecta) y «No mask» (sin mascarilla), se generan alarmas sonoras y visuales; luego se procede a enviar a una plataforma web en la nube para almacenar las imágenes procesadas. Mientras que en el modelo computacional Cloud se realiza el procesamiento y mediante un dispositivo se puede visualizar el resultado y se almacena la inferencia como se detalla en el modelo Edge.

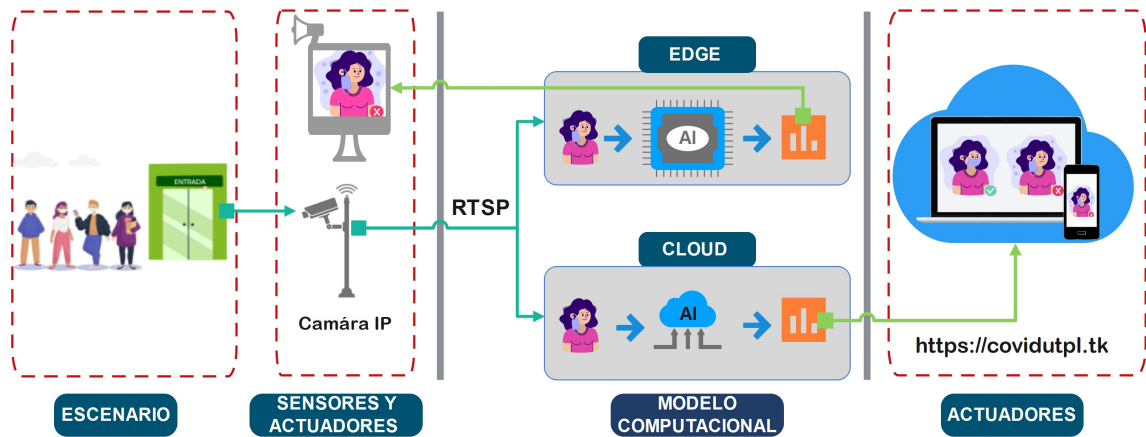


Figura 2. Arquitectura del sistema

2.1.1. Estructuración común para Cloud y Edge

De acuerdo con [8], el análisis comparativo se enfatiza en la explicación amplia de similitudes y diferencias de los fenómenos, para luego proporcionar razones válidas en un tema o área de interés. Consecuentemente, esta sección describe las «similitudes» de la estrategia de comparación entre los dos modelos computacionales Cloud y Edge. Para evaluar el desempeño del algoritmo AIoT, se planteó el uso del mismo protocolo de transmisión, códec de video, sensor visual (cámara IP), conjunto de datos (dataset) de entrenamiento, algoritmo de entrenamiento, dataset de evaluación, y algoritmo de ejecución para la detección de mascarillas en tiempo real, en ambos modelos.

2.1.2. Protocolo de transmisión

Actualmente, existen varios protocolos de transmisión como RTSP (Real Time Streaming Protocol), RTMP (Real-Time Messaging Protocol), SRT (Secure Reliable Transport), y WebRTC (RTC – Real Time Communication) [9]. Para seleccionar el protocolo de transmisión a utilizar en la estrategia comparativa de la presente investigación, se tomó en cuenta los resultados de investigaciones recientes y la compatibilidad del protocolo de transmisión con las cámaras de video de vigilancia disponibles en el mercado local. De acuerdo con Santos-González *et al.* [10], uno de los protocolos de transmisión más usados en video streaming es el RTSP, especialmente en ambientes con restricciones de ancho de banda, congestión de la red, eficiencia energética, costo, confiabilidad y conectividad. Mientras que, según Nurrohman y Abdurrohman [11], el protocolo RTMP ofrece un mejor desempeño en la transmisión de video en directo en comparación con el protocolo RTSP.

Al revisar la compatibilidad de los protocolos de transmisión con los sensores visuales (cámaras de video vigilancia) ofertados en el mercado local, se encontró cá-

maras que disponían de dos protocolos RTMP y RTSP. Para implementar el mecanismo de comunicación *push* del protocolo RTMP, es necesario añadir otro componente (un servidor streaming) a la red, alterando el flujo de los datos en la red y la arquitectura de comparación, e incidiría directamente en el resultado del análisis de tráfico. Por otro lado, el mecanismo *pull* del protocolo RTSP, constituye una opción conveniente de implementar puesto que ambos modelos computacionales Cloud y Edge pueden conectarse como clientes al mismo sensor visual (cámara IP de vigilancia). Por lo tanto, RTSP fue seleccionado como protocolo de transmisión para la estrategia comparativa debido a que se adapta mejor a la arquitectura de comparación planteada.

2.1.3. Códec de video

De acuerdo con Nurrohman y Abdurrohman [11], el códec de video H.264 es uno de los estándares de compresión más funcionales en aplicaciones de Internet de las cosas (IoT-Internet of Things, por sus siglas en inglés) debido a que ocupa menos capacidad cuando se almacena o se transmite. Asimismo, los estándares de compresión de video del códec H.264 están basados en compensación de movimiento; este códec es muy recomendable para la grabación, compresión y distribución de archivos de video en tiempo real [12]. También, el códec de video H.264 es compatible con el protocolo RTSP y está disponible en gran parte de los sensores visuales ofertados en el mercado local. Finalmente, en función de los antecedentes mencionados se determina que el códec H.264 es compatible con la arquitectura propuesta.

2.1.4. Algoritmo de detección de mascarillas

El AIoT combina dos enfoques, a saber el IoT y la Inteligencia Artificial (*AI-Artificial Intelligence*, por sus siglas en inglés) [13]. El enfoque IoT se refiere al

concepto de interconectar objetos a la red, de tal manera que la información pueda ser recolectada a través de sensores automáticamente, sin la intervención exclusiva de personas [14]. Mientras que la AI se refiere al enfoque de dotar a las máquinas inteligencia a través de algoritmos, para que puedan tomar decisiones según un entrenamiento previamente recibido [15]. Al unir ambos enfoques se intenta adherir una capa cognitiva a la red, para alcanzar la optimización de recursos a través de la autonomía que se logre dar a las máquinas para analizar situaciones y tomar decisiones.

El procesamiento de información multimedia es un gran desafío para los algoritmos AIoT debido a la gran cantidad de datos que esta actividad implica procesar y debido a los recursos limitados de IoT. Particularmente, en el presente caso de estudio «detección de uso de mascarilla en tiempo real», se pretende evaluar el rendimiento de los algoritmos AIoT en los modelos computacionales Cloud y Edge. Para lo cual, en el estado de arte se identificó que la solución técnica para este tipo de problemas de reconocimiento de objetos, es necesario el uso de algoritmos AIoT, basados en aprendizaje profundo (Deep Learning) con arquitecturas CNN (*Convolutional Neural Network*) [16].

En lo referente a la detección de objetos en tiempo real, el estado de arte resalta a los modelos detectores de una etapa por tener un mejor desempeño en comparación con los de dos etapas. El algoritmo YOLO, un modelo detector de una sola etapa, se caracteriza por una significativa diferencia de velocidad en comparación con los modelos de dos etapas R-CNN (*Region Based Convolutional Neural Networks*) y Fast-R-CNN. YOLO es mil veces más rápido que R-CNN y cien veces más rápido que Fast-R-CNN [16]. En contraste con el enfoque adoptado por los algoritmos de detección de objetos predecesores de YOLO, que reutilizan los clasificadores para realizar la detección, YOLO propone el uso de una red neuronal de extremo a extremo que hace predicciones de cuadros delimitadores y probabilidades de clase simultáneamente, en una sola iteración [14].

Para la presente estrategia de comparación del desempeño de algoritmos AIoT entre los modelos computacionales Cloud y Edge, se decidió seleccionar la versión reducida de YOLOv3, identificada como YOLOv3-tiny por dos razones. La primera es que dicha versión se trata de un modelo pequeño ideal para implementaciones donde los recursos computacionales son limitados; es decir, es compatible con la arquitectura de la implementación Edge, lo que es propicio para una comparación equitativa. Mientras que la segunda razón se debe al hecho que es la última versión reconocida como oficial, lo que significa que tiene acceso al soporte oficial de la comunidad de desarrollo.

El modelo YOLO es ampliamente implementado en soluciones que requieren la identificación de objetos en tiempo real, debido a su arquitectura y funcionamiento [16–19].

YOLOv3 fue propuesto como una solución que utiliza las CNN modernas, las cuales hacen uso de redes residuales y omiten conexiones. De acuerdo con Redmon y Farhadi [14], autores de YOLOv3, esta versión utiliza la red neuronal convolucional DarkNet-53 mucho más compleja como la columna vertebral del modelo, de 106 capas con bloques residuales y redes de muestreo superior. Dicha arquitectura faculta al modelo YOLOv3 a predecir en tres escalas diferentes; los mapas de características se extraen en las capas 82, 94 y 106 para estas predicciones.

2.1.5. Conjunto de datos

Para el proceso de preparación del algoritmo de detección se requiere de un conjunto de imágenes de entrenamiento y de validación. En este trabajo se requiere entrenar al algoritmo detector de objetos en tiempo real YOLOv3-tiny, para que aprenda y esté en la capacidad de detectar tres clases. Es decir, para la implementación del presente caso de estudio «detección de uso de mascarillas» se entrenará el algoritmo de detección de personas con 1) mascarilla correcta, 2) sin mascarilla y 3) mascarilla incorrecta. La Figura 3 ilustra el conjunto de datos con las tres clases requeridas.



Figura 3. Conjunto de datos con tres clases: mascarilla correcta, sin mascarilla, y mascarilla incorrecta

El conjunto de datos debe contener información relevante para el contexto, es decir, imágenes de personas usando mascarillas de diferentes colores y modelos para la primera clase; imágenes de personas de diferentes edades y etnia para la segunda clase; e imágenes de personas usando la mascarilla de manera incorrecta, por debajo de la nariz o boca, para la tercera clase.

Para el entrenamiento del algoritmo, se personalizó el conjunto de datos seleccionando aleatoriamente imágenes de dos conjuntos de datos públicos Kaggle Medical Mask Dataset [20] y Masked Face (MAFA) dataset [21]. Debido a que dichos conjuntos de datos contienen imágenes reales de personas circulando en diferentes escenarios, a diferencia de otros conjuntos de

datos que contienen las tres clases, pero corresponden únicamente a la parte del rostro de la persona. Lo cual, de acuerdo con Sethi *et al.* [17], la información en contexto es otro enfoque utilizado para mejorar la precisión o la velocidad de detección. Adicionalmente, para el entrenamiento del algoritmo detector se planea dividir el conjunto de datos personalizado de acuerdo con la técnica tipo hold-out, que consiste en dividir el conjunto de datos en dos subconjuntos del 80 % para el entrenamiento y el 20 % restante de los datos para las pruebas [22]. De esta manera, luego del entrenamiento se podrá evaluar el desempeño del algoritmo en datos no vistos [23]. Mientras que, en la fase de ejecución del entrenamiento de la red neuronal especializada en la detección de mascarillas, se utiliza la técnica «*transfer learning*», que consiste en transferir el conocimiento de un modelo preentrenado en un contexto general, a uno más específico [24]. Es decir, para la detección de las tres clases (con mascarilla, sin mascarilla y mascarilla incorrecta) se tomará el modelo base de YOLOv3-tiny preentrenado en la detección de ochenta clases de objetos.

2.2. Algoritmo de ejecución en tiempo real

En el algoritmo 1 se describe mediante pseudocódigo el proceso para la detección de las tres clases (mascarilla correcta, sin mascarilla y mascarilla incorrecta). Este algoritmo tiene como entrada el flujo de imágenes (video stream) capturado por el sensor visual de la red, mientras que la salida será la o las detecciones de las personas clasificadas en las tres opciones.

Previo al proceso de detección se requiere preparar cada fotograma (*frame*) del video stream, mediante el redimensionamiento del *frame* a múltiples escalas de acuerdo con la arquitectura de YOLOv3-tiny. Luego se convierte cada *frame* a los canales RGB (*red*, *green*, *blue*). Finalmente, se almacena el *frame* y su fecha de captura.

A continuación, se procede a almacenar en el arreglo «Faces» todas las detecciones utilizando YOLOv3-tiny. Seguidamente, es necesario evaluar si existe alguna detección en el *frame* actual; es decir, si el arreglo «Faces» contiene algún elemento (mayor a cero). En el caso de no existir alguna detección en el *frame* actual, el proceso culmina, y se procede a trabajar con el siguiente *frame* del video stream. Mientras que, si existe al menos una detección en el arreglo Faces, se requiere evaluar por cada detección la clase a la que pertenece para resaltar su cuadro delimitador y asignarle la etiqueta de clase (ID - identification) correspondiente. En el caso que: 1) Si el ID de la detección pertenece a la clase «con mascarilla», se resalta el cuadro delimitador de color verde; 2) si el ID de la detección pertenece a la clase «sin mascarilla», se resalta el cuadro delimitador de color rojo; y 3) si el id de la detección corresponde a la clase «masca-

rilla incorrecta», se resalta el cuadro delimitador de color naranja. En complemento, por cada detección se debe cortar y almacenar el cuadro delimitador de la detección en formato .jpg con la fecha y hora de detección.

Algoritmo 1 Detector de mascarillas a partir del video en tiempo real.

```
Stream RTSP Detección de mascarillas
foreach
<Frame in Stream> do
    Redimensionar Frame;
    Convertir Frame a RGB;
    Almacenar la fecha y hora;
    Indenticar Rostros en el Frame usando YOLOv3-tiny;
    if Rostros > 0 then
        foreach Rostro in Rostros do
            switch Rostro do
                case Mascarilla correcta do
                    └ Resaltar con VERDE en el Frame
                case No Mascarilla do
                    └ Resaltar con ROJO en el Frame
                case Mascarilla incorrecta do
                    └ Resaltar con NARANJA en el Frame
            Cortar Rostro del Frame y almacenar Rostro como archivo JPG;
            Almacenar en la base de datos Rostro y Fechayhoradedetección;
```

2.3. Diseño de arquitectura de Edge

En la Figura 4 se ilustra el diseño de la arquitectura del modelo computacional Edge. Esta tiene como unidad central de procesamiento el componente de Jetson Nano. La cual tiene como entrada el video stream capturado por el sensor visual de la red (cámara IP TpLink Tapo C310 V2).

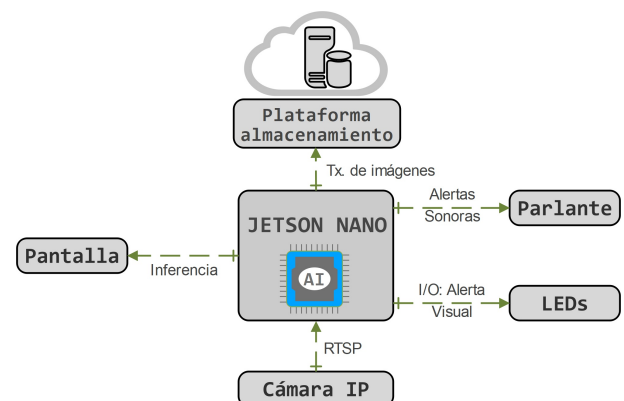


Figura 4. Arquitectura del modelo computacional Edge

En la unidad central de procesamiento se ejecuta el algoritmo AIoT para la detección de uso de mascarillas en tiempo real. Posteriormente, en el caso de

ocurrir una detección se producen cuatro salidas en los actuadores del sistema: 1) la transmisión de las imágenes correspondientes a las detecciones realizadas a un repositorio de la nube, 2) una alerta sonora que resalta la clase de la detección, 3) la activación de LED dependiendo de la clase detectada, y 4) la visualización de la detección en una pantalla. Finalmente, en la Figura 5, se evidencia los resultados de la inferencia en el modelo computacional Edge.



Figura 5. Resultados de la inferencia en el modelo computacional Edge

2.4. Diseño de arquitectura de Cloud

Existen plataformas Cloud que permiten a los usuarios finales desplegar sus soluciones AIoT basadas en transmisión y análisis de video en tiempo real, así como su almacenamiento, entre ellas *Amazon Web Service* (AWS), *Kinesis Video Stream* (KVS) y *SafetyRadar* [25]. Las primeras plataformas, se caracterizan por ofrecer diferentes tipos de detección de objetos, por ejemplo, casas, autos, animales, etc. Al permitir implementar la detección de diferentes objetos, se requiere de conocimientos técnicos para utilizar estas plataformas. Mientras que la plataforma *SafetyRadar*, es especializada en la detección de mascarillas y otros implementos de bioseguridad, por lo que ofrece la tecnología de *plug and play*, es decir, no se requiere de conocimientos técnicos para su despliegue. Sin embargo, las tres plataformas son de pago.

Para el presente trabajo se optó por el diseño de una arquitectura propia para el modelo computacional en la nube (Cloud); con esto se tiene el control sobre los diferentes componentes de red. Por lo general, las plataformas no permiten la extracción de métricas que se requieren para la comparación, propósito de la presente investigación.

En la Figura 6 se ilustra el diseño de la arquitectura del modelo computacional Cloud. Desde la red local se accede a través del protocolo de transmisión RTSP al video stream capturado por el sensor visual de la red. Mientras que, en la nube, se tienen dispuestos dos componentes usando una arquitectura de contenedores,

específicamente Docker [26]. Esto permite agilizar el proceso de despliegue y réplica de la implementación. El primer contenedor tiene la función de procesar el video stream, mientras que la función del segundo contenedor es publicar los resultados del procesamiento. En el contenedor 1, luego de la ingesta de datos multimedia se procesan los datos de entrada de acuerdo con la lógica del negocio; con la ejecución del algoritmo AIoT para la detección de uso de mascarillas en tiempo real. Posteriormente, los resultados de dicho procesamiento son almacenados; en este caso, las imágenes con las detecciones realizadas. Finalmente, se guardan los eventos realizados en un registro o «log». Mientras que, en el contenedor 2 se dispone de los resultados para que los usuarios finales puedan conectarse al servidor y consumir la información de interés, a través de un sitio web.

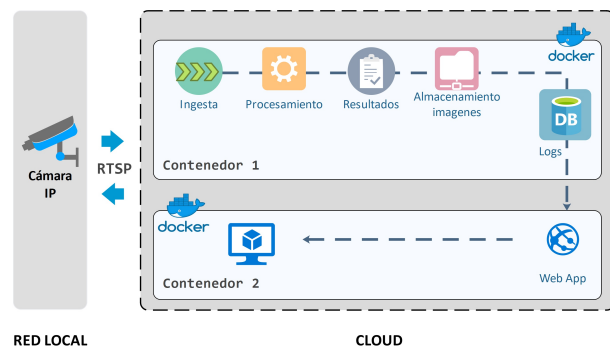


Figura 6. Arquitectura del modelo computacional Cloud

En la Figura 7 se evidencia los resultados de la inferencia en el modelo computacional Cloud.

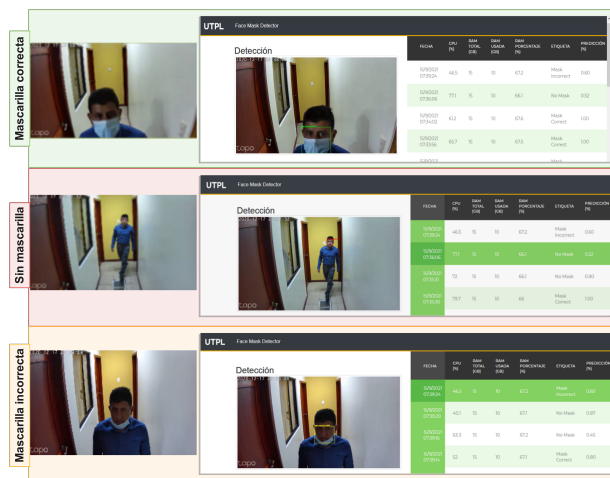


Figura 7. Resultados de la inferencia en el modelo computacional Cloud

2.5. Tecnologías utilizadas

La Tabla 1 muestra el resumen de las tecnologías consideradas en este trabajo. La primera columna identi-

fica la tecnología utilizada, la segunda columna corresponde al modelo computacional Cloud o Edge donde se aplica la tecnología; la tercera columna se señala en qué componente se va a usar. La última columna ofrece la justificación del uso de cada tecnología.

Tabla 1. Resumen de tecnologías usadas

Tecnología	Modelo	Componente	Justificación
JetPack SDK 4.5.1 [27]	Edge	Procesamiento	Incluye el paquete de controladores de la Jetson para Linux (L4T) con el sistema operativo Linux y las bibliotecas aceleradas por CUDA (TensorRT y cuDNN), para APIs de AI.
Python3 [28]	Edge Cloud	Procesamiento	Lenguaje base para el procesamiento de video, publicación de resultados, e integración con bibliotecas de visión e AI.
Deepstream SDK 5.1 [29]	Edge	Procesamiento	Este SDK de Nvidia proporciona un framework para construir aplicaciones de análisis de video aceleradas en la GPU que se ejecutan en la plataforma NVIDIA Jetson Nano.
Deepstream-services-library [30]	Edge	Procesamiento	Biblioteca de Python3 requerida para hacer uso de las funcionalidades del deepstream SDK.
MySQLdb [31]	Edge	Resultados	Proporciona la API de Python3 para acceder al servidor de bases de datos MySQL.
rcclone [32]	Edge	Resultados	Requerido para gestionar archivos en el almacenamiento en la nube.
Docker [33]	Cloud	Procesamiento	Permite automatizar el despliegue de la aplicación en los contenedores ubicados en la nube.
Camgear [34]	Cloud	Procesamiento	Es un marco de procesamiento de video de alto rendimiento, multiplataforma que permite procesar video en tiempo real.
OpenCV [35]	Cloud	Procesamiento	Biblioteca que permite procesar visión artificial en Python3. Esta facilita en primera instancia la lectura del modelo entrenado de YOLOv3-tiny, y luego en la detección por cada frame procesado.
Firebase [36]	Cloud	Procesamiento	Permite almacenar los resultados de las detecciones en tiempo real.
Flask [37]	Cloud	Resultados	Framework que se utiliza para la creación de la aplicación web.
Bootstrap [38]	Cloud	Resultados	Biblioteca para el diseño de la aplicación que permite publicar los resultados.

2.6. Configuración experimental

Los procesos de etiquetación de imágenes y división del conjunto de datos personalizados a emplear en el entrenamiento del algoritmo detector de mascarillas se realizan mediante el lenguaje de programación Python3.

El dataset fue dividido con una distribución de 80 % (716 imágenes) para entrenamiento y el 20 % (179 imágenes) restante para pruebas (ver Figura 8). Las imágenes del conjunto de datos personalizado, para el entrenamiento contienen la detección de una persona o varias personas dentro de la misma. Lo que representa para el entrenamiento 3070 personas con mascarilla correcta, 675 sin mascarilla y 113 con mascarilla incorrecta.

Entrenamiento 716 imágenes 80%	Validación 179 imágenes 20%
con mascarilla 3070	con mascarilla 162
sin mascarilla 675	sin mascarilla 42
mascarilla incorrecta 113	mascarilla incorrecta 10

Figura 8. Distribución del conjunto de datos para entrenamiento y validación

La herramienta Google Colab [39] fue utilizada para ejecutar el proceso de entrenamiento del algoritmo AIoT. A este proceso se le provee de tres entradas: el 80 % de las imágenes del conjunto de datos, el archivo de configuración YOLOv3-tiny (ver en la Tabla 2 los parámetros de configuración), y el archivo de pesos de YOLOv3-tiny preentrenado con el dataset COCO [40].

Tabla 2. Valores de configuración para el entrenamiento de la red neuronal

Detalle	Cálculo	Valor
Número de clases	Mascarilla correcta, sin mascarilla y mascarilla incorrecta	classes=3
Tamaño máximo de batch	30000 (10000 por cada clase)	max_batches = 30000
Dimensiones de la imagen de entrada	ancho × alto = 416 × 416	width=416 height=416
Número de filtros en la capa convolucional antes de la capa YOLOv3-tiny	(classes+5)*3 = 24	filters=24
Tamaño de batch y sus subdivisiones para el entrenamiento		batch=64 subdivisions=2

El proceso de entrenamiento duró 16 horas, obteniendo una media de la precisión promedio (mAP) de 75,95 %. Finalmente, se validó la red neuronal entrenada con el 20 % restante del dataset (79 imágenes), esto representa 162 personas con mascarilla correcta, 42 sin mascarilla y 10 con mascarilla incorrecta. En la Tabla 3 se muestra los resultados correspondientes a la validación.

Tabla 3. Resultados de la validación del algoritmo de detección

Clase	Precisión
Mascarilla correcta	85,97 %
Sin mascarilla	68,72 %
Mascarilla incorrecta	73,15 %
mAP	73,15 %

3. Resultados y discusión

En esta sección se presentan los resultados de los diferentes experimentos en dos escenarios reales para determinar el rendimiento de los dos modelos computacionales. En este contexto, dos ambientes fueron seleccionados. El primer escenario *indoor* corresponde al ingreso de personas a una iglesia de la localidad para participar en la eucaristía dominical. Para el segundo escenario *outdoor* se aplicó en una calle con un alto índice de circulación de peatones, por turismo religioso al Santuario de El Cisne entre agosto y septiembre, ubicado en la provincia de Loja, sur del Ecuador.

En los dos ambientes indoor y *outdoor* se monitoreó por el lapso de una hora, de los cuales para un análisis más detallado se toman los 15 primeros minutos para el análisis cuantitativo de los resultados. En este contexto, se observó el ingreso de 82 personas en *indoor* y la circulación de 229 en *outdoor*. En la Figura 9 ilustran el total de detecciones en los ambientes *indoor* y *outdoor*.

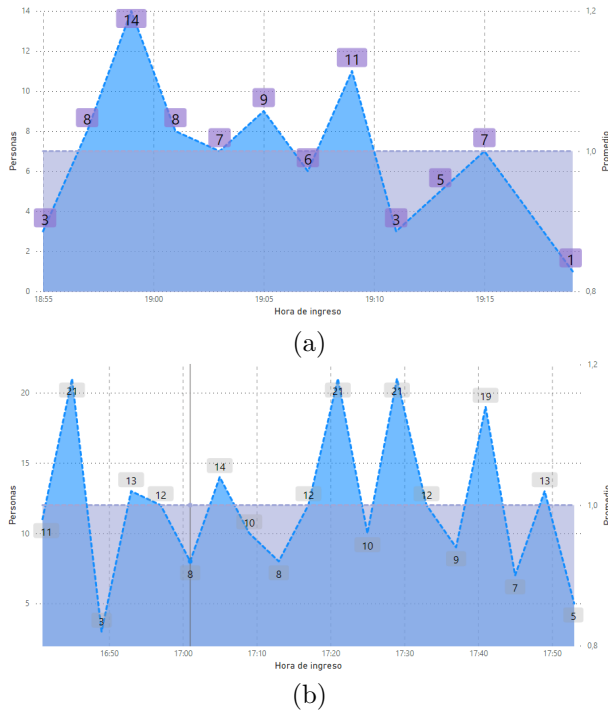


Figura 9. Flujo de personas: a) *indoor* y b) *outdoor*

Los resultados del experimento demuestran que el flujo de personas en el ambiente *outdoor* duplicó al de *indoor*. Teniendo como promedio un ingreso de 6 personas en el ambiente interno y circulación de 12 personas en el ambiente externo. El conteo fue realizado a través de la herramienta Camlytics. La Figura 10 muestra ejemplos de detecciones en los escenarios reales *indoor* y *outdoor*.

3.1. Métricas de evaluación

Para evaluar el desempeño del algoritmo AIoT en los modelos computacionales Cloud y Edge, en el caso de estudio «detección de uso de mascarillas de bioseguridad en tiempo real» se han considerado como métricas de evaluación:

- **Confiabilidad del algoritmo de detección:** Según [16], [18], [41–43], para determinar el rendimiento del algoritmo de detección se basa en cinco métricas a saber: exactitud, precisión, sensibilidad, media armónica, media de la precisión promedio.
- **Recursos computacionales:** En función de lo presentado por [42] y el estándar ISO/IEC 25023,

se recomienda analizar los recursos que ocupa la aplicación, analizando el tráfico de red, memoria RAM, CPU y almacenamiento.

- **Tiempo de respuesta:** Es otro parámetro que nos permite medir el tiempo que tarda el sistema en responder según lo investigado por Ashouri *et al.* [42] y por el estándar ISO/IEC 25023.



Figura 10. Resultados en escenario real interior y exterior

3.1.1. Confiabilidad del algoritmo de detección

Para evaluar la confiabilidad de los clasificadores basados en ML (Machine Learning) se utiliza una matriz de confusión para saber qué tan efectivo es el sistema. De acuerdo con Aslanpour *et al.* [41], una matriz de confusión, también conocida como matriz de errores, es un método para resumir el rendimiento del resultado de un modelo de clasificación, mostrando el número de predicciones correctas e incorrectas. Cuatro métricas son calculadas a partir de la matriz de confusión [16], [18], [41–43]: la exactitud (A: Accuracy, ver en la Ecuación 1), la precisión (P: Precision, ver en la Ecuación 2), la sensibilidad o revocación (R: Recall, ver en la Ecuación 3), y la media armónica (f_β , ver en la Ecuación 4). Adicionalmente, debido a las implementaciones AIoT Edge y Cloud del presente experimento se identifica tres clases (MC: mascarilla correcta, SM: sin mascarilla y MI: mascarilla incorrecta), también es necesario calcular la media de la precisión promedio (mAP, ver en la Ecuación 5) a partir de la precisión promedio (AP) de cada clase.

$$A = \frac{TP+TN}{(TP+FP)+(TN+FN)} \quad (1)$$

$$P = \frac{TP}{TP+FP} \quad (2)$$

$$R = \frac{TP}{TP+FN} \quad (3)$$

$$f_\beta = \frac{(1+\beta^2)*(P*R)}{\beta^2*P+R} \quad (4)$$

$$mAP = \frac{AP_{MC}+AP_{SM}+AP_{MI}}{3} \quad (5)$$

En donde: TP (*True Positive*) cuando la observación es positiva y predicha como positiva; FN (*False Negative*) cuando la observación es positiva, pero predicha como negativa; TN (*True Negative*) cuando la observación es negativa y es predicha como negativa; y FP (*False Positive*) cuando la observación es negativa, pero es predicha como positiva. Mientras que β es usado para asignar diferentes pesos a las medidas utilizadas en la Ecuación 4 [43]. En el presente trabajo a β se le asignó un valor de 1. La Tabla 4 muestra los resultados obtenidos al implementar en escenarios reales los modelos Edge y Cloud. Para lo cual, se realiza una depuración de detecciones repetidas en cada uno de los ambientes.

Tabla 4. Matriz de confusión

Modelo Edge en el escenario <i>indoor</i>				
		Valor verdadero		
		MI	SM	MC
Predicción	MC	2	29	191
	SM	0	36	9
	MI	3	3	0
Modelo Edge en el escenario <i>outdoor</i>				
Predicción	MC	2	15	170
	SM	0	52	30
	MI	1	1	0
Modelo Cloud en el escenario <i>indoor</i>				
Predicción	MC	5	36	165
	SM	7	29	12
	MI	1	2	6
Modelo Cloud en el escenario <i>outdoor</i>				
Predicción	MC	3	45	123
	SM	2	41	40
	MI	1	2	2

En la Tabla 5 se muestran los resultados obtenidos después de evaluar las implementaciones Edge y Cloud para la detección del uso de mascarillas buconasales por parte de las personas en los dos ambientes *indoor* y *outdoor*, en tiempo y escenarios reales.

Tabla 5. Resultados obtenidos de A, P, R y f_β

Exactitud (A) %				
Clase	Cloud		Edge	
	<i>indoor</i>	<i>outdoor</i>	<i>indoor</i>	<i>outdoor</i>
MC	76,7	64,7	85,2	82,6
SM	77,4	65	84,9	82,9
MI	90,7	94,8	97,9	98,7
Media	81,6	74,8	89,3	88,1
Precisión (P) %				
MC	80	71,9	86	90
SM	60,4	49,4	80	63,4
MI	11,1	20	50	50
mAP	50,5	47,1	72	67,8
Revocación (R) %				
MC	90,1	74,5	95,5	85
SM	43,3	46,6	52,9	76,5
MI	7,6	16,7	60	33,3
Media	47	45,9	69,5	64,8
Media armónica (f_β) %				
MC	84,8	73,2	90,5	87,4
SM	50,4	48	63,7	67,9
MI	9	18,2	54,5	40
Media	48,1	46,5	69,6	65,1

La Tabla 4 muestra los porcentajes alcanzados con respecto a las métricas de exactitud, precisión, revocación y media armónica. La exactitud se refiere a la cantidad de predicciones positivas correctas; en este contexto, los resultados muestran que el modelo Edge es 10,5 % más exacto que el modelo Cloud. Por otro lado, la precisión se refiere al porcentaje de casos positivos detectados; los resultados denotan que la precisión en ambiente *indoor* es mayor a la obtenida en ambiente *outdoor* en ambos modelos. Así mismo, se observa que el modelo Edge es un 39,9 % más preciso que Cloud. La precisión de Cloud es inferior a la de Edge, ya que durante la transmisión algunos fotogramas se pierden o se distorsionan en algunos casos. Adicionalmente, la precisión de la clase mascarilla incorrecta no puede ser considerada totalmente válida pues no existen las suficientes muestras de esta clase en los dos ambientes, en su lugar la distorsión de las imágenes en el modelo Cloud aumenta en número de falsos positivos. Con respecto a la métrica de revocación, la cual se refiere a la proporción de casos positivos que son correctamente identificados por el algoritmo, los resultados indican que el modelo Edge predijo un 20,7 % más correctamente que Cloud. Finalmente, la métrica de media armónica, es usada cuando el dataset no es balanceado al proveer entradas de las diferentes clases al clasificador. En este contexto, los resultados muestran que al no haber obtenido suficientes detecciones de la clase «mascarilla incorrecta» afecta drásticamente en la distribución de los datos.

3.2. Uso de recursos

Entre los recursos que se analizaron, para la comparación de los dos modelos computacionales Cloud y Edge, de acuerdo con Ashouri *et al.* [42] y el estándar ISO/IEC 25023, están el tráfico de la red, la utilización de memoria RAM, CPU y almacenamiento en disco. Debido a que los resultados denotaron un mejor desenvolvimiento del detector de mascarillas buconasales en el ambiente *indoor*, en las siguientes secciones, se realiza un análisis del empleo de recursos en este ambiente. Asimismo, la Tabla 6 muestra las características de componentes de hardware de los equipos en los cuales se implementa cada uno de los dos modelos, Cloud y Edge.

Tabla 6. Características de hardware de las implementaciones Cloud y Edge

Componente	Cloud	Edge
GPU	—	NVIDIA Maxwell architecture with 128 NVIDIA CUDA® cores
CPU	Intel Xeon Processor (Sky-lake, IBRS) / 8 núcleos / 2100 MHz	Quad-core ARM Cortex-A57 MPCore processor
Memoria RAM	31 GB virtual	4 GB 64-bit LPDDR4, 1600MHz 25.6 GB/s
Almacenamiento	246 GB	16 GB eMMC 5.1
Conectividad	Gigabit Ethernet	Gigabit Ethernet, Wi-Fi
Pantalla	—	HDMI 2.0 and eDP 1.4

3.2.1. Tráfico de red

Las medidas del tráfico de la red generadas por la transmisión de video desde la cámara IP en el modelo Cloud, e imágenes desde de la Jetson Nano en el modelo Edge, fueron tomadas mediante el analizador de protocolos *Wireshark* en la interfaz de entrada del servidor donde se aloja modelo Cloud y la plataforma web. Se tomaron medidas de tráfico utilizando como parámetros de codificación de video a 1008 Kbps, observando el comportamiento del tráfico en volumen de Mbps. En la Figura 11, se puede observar el tráfico de red generado, la curva superior de color azul representa el tráfico desde la cámara IP al modelo computacional Cloud mediante el protocolo RSTP, y la curva inferior de color verde representa el tráfico generado por la transmisión de imágenes procesadas con el algoritmo de detección en el modelo Edge a la plataforma web (medido en Mbps). Dicha información está representada en forma de series a través del tiempo, la misma que corresponde a los primeros 15 minutos de monitoreo en el ambiente *indoor*.

Como resultado se puede evidenciar que el tráfico de la red es significativamente superior en el modelo Cloud en comparación al generado en el modelo Edge. La media de tráfico de red en Cloud es de 0,86 Mbps, con un máximo de 4,91 Mbps; mientras que la media de tráfico de red en Edge es de 0,07 Mbps, con un

máximo de 0,26 Mbps. Esto se debe a que en el modelo Cloud se transmiten todos los fotogramas del sensor visual, sin hacer previamente un filtro de información; mientras que en el modelo Edge únicamente se transmite imágenes cuando existe una detección, lo que evita la saturación de la red.

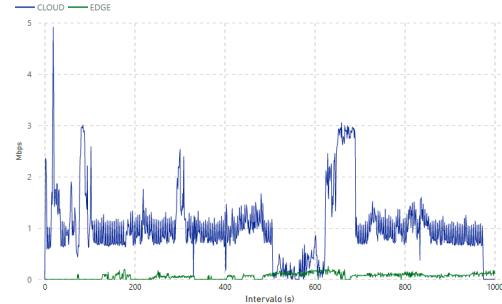


Figura 11. Tasa de transferencia de video al Cloud e imágenes procesadas desde el Edge a la plataforma web

3.2.2. Memoria RAM

Los modelos computacionales Cloud y Edge se caracterizan por la diferencia en la cantidad de recursos disponibles. Particularmente, en las implementaciones de este trabajo se dispuso de 4 GB de RAM en el modelo Edge y de 31 GB de RAM en el modelo Cloud. Los resultados indican (ver Figura 12) que el uso de RAM en el modelo Edge fluctuó entre 2,41 GB como mínimo, 2,43 GB como máximo, con una media de 2,42 GB. Mientras que en el modelo Cloud, el uso de RAM fluctuó entre 10,7 GB como mínimo, 12 GB como máximo, con una media de 11,55 GB. A partir de los datos obtenidos, se puede interpretar que, una vez designados los recursos al proceso YOLO, no existe mayor crecimiento durante la ejecución de las detecciones tanto en Cloud como Edge.

3.2.3. CPU

Con respecto a la capacidad de procesamiento de los modelos computacionales Cloud y Edge se diferencian notoriamente. A partir de la Figura 13, se determina que el modelo Edge con el Jetson Nano integra un procesador de 1,43 GHz; de los cuales el uso de la CPU durante los 15 primeros minutos de procesamiento fluctuó entre el 22,95 % como mínimo, el 62,01 % como máximo, con una media de 29,59 %. Mientras que en el modelo Cloud, el servidor contaba con un procesador de 4,8 GHz; de los cuales el uso de la CPU fluctuó entre 1,75 % como mínimo, 7,49 % como máximo, con una media de 3,31 %. Por lo tanto, se puede interpretar que debido a que el modelo Edge tiene menos recursos, el esfuerzo es mayor al momento de procesar las detecciones. Inversamente a ello, debido a que el modelo Cloud cuenta con mejores recursos el esfuerzo es mínimo al ejecutar el detector de uso de mascarillas buconasales.

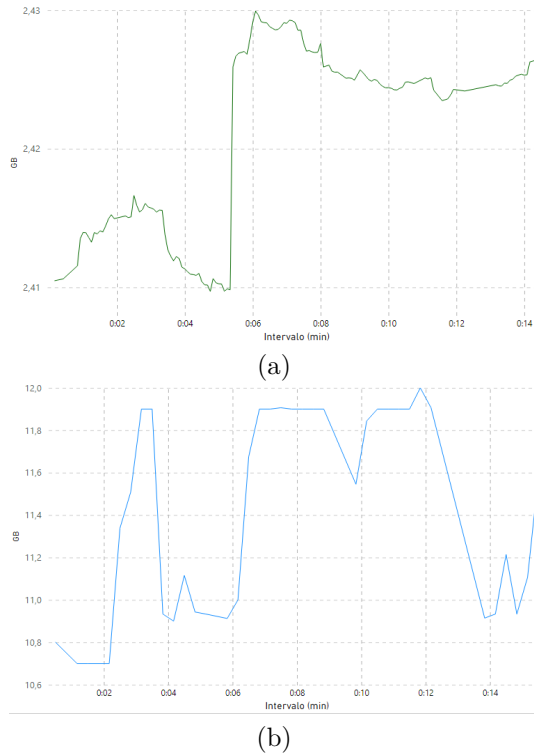


Figura 12. Uso de memoria RAM durante los primeros 15 minutos de monitoreo en el ambiente *indoor*: a) Modelo Edge y b) Modelo Cloud



Figura 13. Uso de CPU durante los primeros 15 minutos de monitoreo en el ambiente *indoor*: a) Modelo Edge y b) Modelo Cloud

3.2.4. Almacenamiento

El empleo de espacio en disco de las detecciones crece exponencialmente en ambos modelos Cloud y Edge. En Cloud se puede incrementar este recurso en el caso de demandar un mayor espacio, mediante una actualización del contrato de alquiler del servidor en la nube. Mientras que, en Edge no es posible incrementar la capacidad de almacenamiento, ya que de naturaleza es limitado. Los resultados demuestran que el uso de espacio en disco es similar en ambos modelos Cloud y Edge, aproximadamente se ocupó 90,7 MB en el ambiente *indoor* y 200,5 MB en el ambiente *outdoor*. Es importante denotar que el detector de mascarillas buconasales almacena solamente el cuadro de la detección, no el contexto o la imagen completa, por lo que la capacidad de almacenamiento es optimizada.

3.3. Tiempo de respuesta

De acuerdo con Ashouri *et al.* [42] y el estándar ISO/IEC 25023, el tiempo de respuesta de un sistema es otra métrica que nos permite evaluar el desempeño de un sistema. Particularmente, en el presente trabajo, para obtener el valor del tiempo de respuesta se utilizaron los tiempos de eventos marcados en los archivos de log, y de esta manera identificar con exactitud el instante que ingresó la imagen al modelo, para luego calcular el tiempo transcurrido hasta su publicación.

En este contexto, para calcular el tiempo de respuesta en la implementación Edge, se consideró el lapso transcurrido entre el instante que se produce la detección hasta que el sistema termina de emitir la alerta sonora. La Figura 14a muestra gráficamente los tiempos de respuesta registrados en el modelo Edge durante las primeras veinte detecciones en el ambiente *indoor*, obteniendo un promedio de 2,37 segundos de respuesta.

Por otro lado, para calcular el tiempo de respuesta en el modelo Cloud se debe medir desde que se produce la captura en el sensor visual hasta la publicación de los resultados en la página web. Sin embargo, lo que es posible capturar con exactitud es el lapso de tiempo que se produce desde la detección en Cloud hasta su publicación en el portal; por lo que, en el tiempo Cloud se agregó un valor medio de 2 segundos a partir de la tasa de transferencia para una imagen de 300 kB con una resolución de 1920×1080 , que corresponde al tiempo que le toma al sensor visual transmitir el video a la nube, el cual es indirectamente proporcional al ancho de banda proporcionado por la red. El ancho de banda con el que se contó para la implementación del modelo Cloud fue de 25 Mbps. La Figura 14b muestra gráficamente los tiempos de respuesta registrados en el modelo Cloud durante las primeras veinte detecciones en el ambiente *indoor*, logrando un promedio de 3,45 segundos de respuesta.

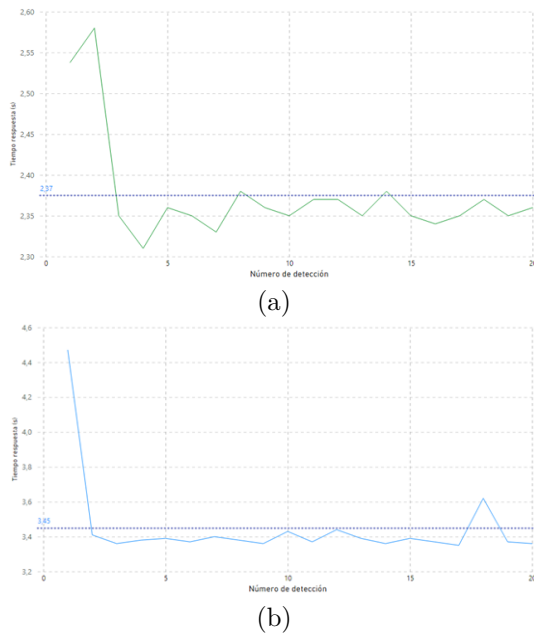


Figura 14. Tiempos de respuesta: a) Modelo Edge y b) Modelo Cloud

3.4. Discusión de resultados

Después de haber desplegado las implementaciones Cloud y Edge en escenarios reales, a nivel general se identifica que el algoritmo AIoT (especializado en la identificación del uso de mascarillas de bioseguridad) tuvo un mejor desempeño en el ambiente *indoor* en los dos modelos, debido al flujo controlado (en una dirección) y exclusivo de personas que constituía el ingreso a la iglesia. Mientras que el desempeño del mismo algoritmo AIoT fue menos eficiente en el ambiente *outdoor* en ambas implementaciones, debido al flujo de personas no controlado (en varias direcciones) y no exclusivo de personas; otros objetos como automóviles, bicicletas, e incluso animales, formaron parte de las imágenes capturadas por el sensor visual. Con la implementación de algoritmos AIoT para la identificación de objetos en tiempo real, el modelo computacional Edge presentó un mejor desempeño en comparación con el modelo Cloud.

YOLO constituye una herramienta recomendable para implementar soluciones que utilizan AI en escenarios de la vida real, los cuales requieran de acciones inmediatas. Particularmente, en los resultados del presente trabajo arrojan métricas de exactitud de 78,2 % en el modelo Cloud y de 88,7 % en Edge. Aunque existe un descenso en la precisión del clasificador con un 48,8 % en Cloud y 69,9 % en Edge, se pudo evidenciar que la precisión en ambos modelos baja especialmente en el escenario *outdoor*, se debe al hecho que la red neuronal no fue lo suficientemente entrenada para identificar objetos pequeños. Adicionalmente, se notó que el detector también decae cuando existen múltiples

personas en un mismo fotograma a ser detectadas en ambos modelos, para superar este inconveniente se podría incluir en el dataset de entrenamiento un mayor número de imágenes que contengan múltiples detecciones.

La calidad del flujo de información multimedia, entrada para el procesamiento de video en las implementaciones Cloud y Edge, incide en el desempeño del algoritmo AIoT. Se probó al detector de mascarillas en tiempo real con dos resoluciones del sensor visual, alta (1920×1080) y baja (640×360). Lo que permitió llegar a la conclusión de que a una la resolución baja, la detección presenta fallos u omisión en objetos pequeños; sin embargo, los objetos grandes (ceranos) son correctamente identificados en tiempo real (Figura 15), ya que el procesamiento del fotograma lo hace con fluidez.

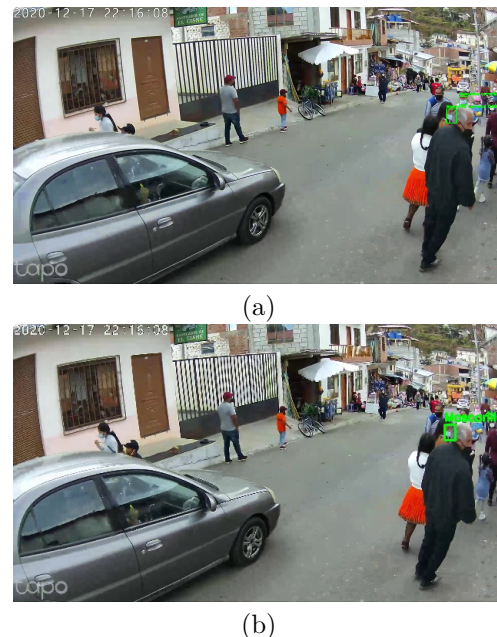


Figura 15. Detección de mascarilla en diferentes resoluciones: a) 1920×1080 y b) 640×360

Es necesario evaluar la relación entre la velocidad del flujo de video (fotogramas por segundo) y su relevancia en el contexto del negocio de la solución AIoT. Particularmente, en el caso de estudio de la presente investigación, detector de uso de mascarillas en tiempo real, se pudo evidenciar que no era necesario evaluar todos los fotogramas de la entrada. En primera instancia el algoritmo AIoT procesaba todos los fotogramas receptados (15 fotogramas por segundo), y como salida se obtuvo demasiadas detecciones pertenecientes a la misma persona. Por lo que se llegó a la conclusión que era necesario filtrar la cantidad de fotogramas de entrada al detector (un fotograma por segundo) y de esta manera evitar la saturación del procesador. En otras palabras, los recursos que se demanda para procesar cada uno de los fotogramas son innecesarios.

Para solventar este inconveniente se disminuye los fotogramas por segundo, la cual consiste en procesar un determinado fotograma por cada cierto intervalo. Como resultado se alcanzó una optimización de recursos de procesamiento al filtrar la entrada y de almacenamiento en la salida, ya que el número de detecciones de la misma persona bajó considerablemente, por ejemplo, de un 1 GB a 100 MB.

Finalmente, luego de haber experimentado con ambos modelos Cloud y Edge, se identifican varios desafíos para futuros trabajos. Existe incongruencia entre la velocidad de detección de los algoritmos de clasificación basados en Machine Learning (ML) y las tecnologías que permiten el almacenamiento y administración de actuadores en la red. Por ejemplo, el detector de uso de mascarillas de bioseguridad trabaja con una velocidad de 15 detecciones por segundo, pero al momento de querer almacenar esta información, la transacción tarda una detección por segundo, provocando de esta manera un cuello de botella. Los gestores de bases de datos actuales no alcanzan la velocidad que se requiere al trabajar con clasificadores basados en AI. Similarmente ocurre con los actuadores visuales o auditivos, es en vano que el algoritmo AIoT detecte múltiples objetos simultáneamente si el tiempo que le toma al parlante o pantalla mostrar esa información al público demanda de un segundo por objeto.

3.5. Evaluación del sistema en un ambiente real

Para evaluar la eficacia y la viabilidad del método propuesto, en esta parte presentamos un prototipo de sistema equipado con YOLOv3-tiny, que puede desplegarse en las entradas de los lugares públicos. El prototipo del sistema basado en el modelo computacional Edge se ilustra en la Figura 16 con la integración e implementación de los distintos componentes de hardware y software, incluyendo una cámara IP, un computador Jetson Nano, una pantalla con una interfaz HDMI.

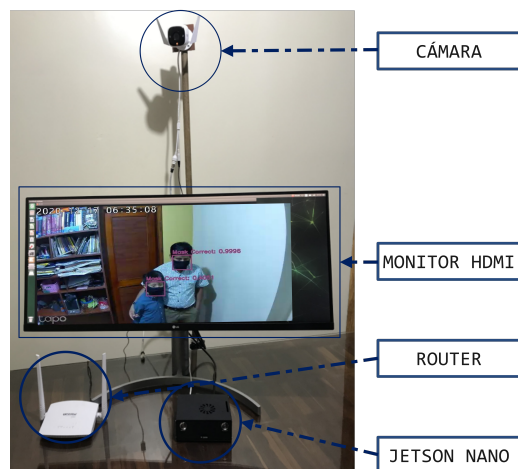


Figura 16. Implementación del sistema

En la Figura 5 se puede evidenciar el funcionamiento del prototipo para los tres casos (mascarilla correcta, sin mascarilla y mascarilla incorrecta). Así mismo, en los escenarios de evaluación las alertas visuales no captaron la atención de las personas cuando el algoritmo AIoT proporciona la retroalimentación de la detección. Inicialmente cuando las personas atravesaban el ángulo de visión de la cámara, en la pantalla se mostraba la salida de los cuadros delimitadores etiquetados y pintados de acuerdo con la clase detectada. Se evidenció que el propósito de la pantalla no era claro para el transeúnte, por lo que algunos saludaban o salían del área de acción de la cámara. Esto cambió, al agregar las alertas auditivas que capturaron más la atención de las personas. Los usuarios escuchaban los siguientes mensajes: «uso de mascarilla correcta», «mascarilla no detectada», o «uso de mascarilla incorrecta»; dependiendo de la clase de detección realizada por el algoritmo, los peatones identificaron el propósito del despliegue intuitivamente. Muchos de ellos corrigieron el mal uso o ausencia de mascarilla de bioseguridad.

4. Conclusiones

En este trabajo se ha diseñado, implementado y evaluado un sistema para la detección de mascarillas en contextos reales. Donde el desempeño del algoritmo de detección de objetos basados en AIoT, el modelo computacional Edge superó al modelo Cloud, con un 39,9 % en la métrica de precisión, que concierne al porcentaje de casos positivos detectados; y con un 10,5 % en la métrica de exactitud, la cual se refiere al porcentaje de predicciones positivas que fueron correctas. Adicionalmente, existen ventajas y desventajas inherentes a las características intrínsecas de cada modelo. Una de las ventajas de las implementaciones Cloud es que se caracterizan por disponer de altas capacidades de almacenamiento y procesamiento; y en el caso de requerir incrementar sus recursos de memoria RAM, disco, o procesamiento, el modelo ofrece la característica de escalabilidad al sistema. Sin embargo, la gran desventaja del modelo Cloud es el alto consumo de la red, ya que se transmite la secuencia de fotogramas en video sin previamente realizar una depuración de la información.

Mientras que el modelo Edge, a pesar de disponer de recursos limitados, esta desventaja es compensada con el hecho que es posible hacer una depuración de información, lo que permite a las aplicaciones ajustarse a la cantidad de recursos disponibles de RAM, procesamiento y ancho de banda. En donde se pudo evidenciar que, luego de ser asignados los recursos, el consumo de estos no fluctúa drásticamente. Además, en este lado de la red, se puede usar actuadores visuales o auditivos para una interacción similar a la humana en el contexto en donde se esté usando el modelo.

La aplicación de YOLOv3 constituye una opción adecuada para implementaciones especializadas en detección de objetos en tiempo real ya sea en el modelo computacional Cloud o Edge, YOLOv3 por tratarse de un modelo detector de objetos de una sola etapa, clasifica y predice directamente el objetivo en cada ubicación de la imagen original completa. Todas estas características distinguen a YOLOv3 de otros modelos detectores, sin embargo, las métricas de exactitud y precisión son alcanzadas cuando se efectúa un proceso de entrenamiento con un amplio conjunto de datos. El mismo que debe contener múltiples detecciones en la misma imagen, las cuales deben ser capturadas en diferentes contextos y escalas. Así mismo, se puede diversificar el dataset a través de la utilización de técnicas de aumentación de imágenes.

Finalmente, como trabajo futuro se plantea el análisis del sistema en la persuasión a las personas para que usen mascarillas. También, se plantea la integración de sensores adicionales al sistema que permitan analizar la calidad del aire en especial en ambientes *indoor*.

Agradecimientos

Los autores queremos agradecer a la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL) por financiar este trabajo por medio de la segunda convocatoria para el «FINANCIAMIENTO DE TRABAJOS DE FIN DE TITULACIÓN Y MÁSTER 2020».

Referencias

- [1] R. Aragón Nogales, I. Vargas Almanza, and M. G. Miranda Novales, “COVID-19 por SARS-CoV-2: la nueva emergencia de salud,” *Revista Mexicana de Pediatría*, vol. 86, pp. 213–218, 2020. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.35366/91871>
- [2] WHO, “Listings of WHO’s response to COVID-19,” World Health Organization. [Online]. Available: <https://bit.ly/3mAZ6LH>
- [3] —, “Vías de transmisión del virus de la COVID-19: Repercusiones para las recomendaciones relativas a las precauciones en materia de prevención y control de las infecciones.” [Online]. Available: <https://bit.ly/3epu4Sq>
- [4] OMS, “Who coronavirus (COVID-19) dashboard,” 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3mDAO3r>
- [5] OPS, “Vacunas contra la COVID-19,” 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3z0JGFs>
- [6] H. Ritchie, E. Mathieu, L. Rodés-Guirao, C. Appel, C. Giattino, E. Ortiz-Ospina, J. Hasell, B. Macdonald, D. Beltekian, M. Roser, and et al., “Coronavirus (COVID-19) vaccinations - statistics and research,” 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3sEmtro>
- [7] C. Costa and C. Tombesi, “COVID-19: Cuánto tiempo se demoró en encontrar la vacuna para algunas enfermedades (y por qué este coronavirus es un caso histórico),” 2020. [Online]. Available: <https://bbc.in/3pEV0Eh>
- [8] “Comparative research grant,” *Anthropology News*, vol. 36, no. 8, pp. 43–43, 1995. [Online]. Available: <https://anthrosource.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/an.1995.36.8.43.1>
- [9] S. S. Bibak Saresheh, E. Magli, and P. Dal Zovo, “Combined ict technologies for supervision of complex operations in resilient communities,” Master’s thesis, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3HaioPE>
- [10] I. Santos-González, A. Rivero-García, J. Molina-Gil, and P. Caballero-Gil, *Implementation and Analysis of Real-Time Streaming Protocols*, vol. 17, no. 4, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s17040846>
- [11] A. Nurrohman and M. Abdurrohman, “High performance streaming based on H264 and real time messaging protocol (RTMP),” in *2018 6th International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT)*, 2018, pp. 174–177. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICoICT.2018.8528770>
- [12] S. Basu, “What are video streaming codecs & container formats: Muvi live server,” 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3ErJPCZ>
- [13] J. S. Katz, “Aiot: Thoughts on artificial intelligence and the internet of things,” *IEEE Internet of Things*, 2019. [Online]. Available: <https://bit.ly/3sBwGEZ>
- [14] J. Redmon and A. Farhadi, “Yolov3: An incremental improvement,” *ArXiv*, vol. abs/1804.02767, 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/3psJLyp>
- [15] A. M. Porcelli, “La inteligencia artificial y la robótica: sus dilemas sociales, éticos y jurídicos,” *Derecho global. Estudios sobre derecho y justicia*, vol. 6, pp. 49–105, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.32870/dgedj.v6i16.286>
- [16] X. Jiang, T. Gao, Z. Zhu, and Y. Zhao, “Real-time face mask detection method based on YOLOv3,” *Electronics*, vol. 10, no. 7, p. 837, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/electronics10070837>

- [17] S. Sethi, M. Kathuria, and T. Kaushik, "Face mask detection using deep learning: An approach to reduce risk of coronavirus spread," *Journal of Biomedical Informatics*, vol. 120, p. 103848, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jbi.2021.103848>
- [18] D. González Dondo, J. A. Redolfi, R. G. Araguás, and D. García, "Application of deep-learning methods to real time face mask detection," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 19, no. 6, pp. 994–1001, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3pw7DkM>
- [19] S. Sethi, M. Kathuria, and T. Kaushik, "A real-time integrated face mask detector to curtail spread of coronavirus," *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, vol. 127, no. 2, pp. 389–409, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.32604/cmcs.2021.014478>
- [20] I. Vich, "Medical masks dataset images tfrecords," Kaggle, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3er0tb8>
- [21] S. Ge, J. Li, Q. Ye, and Z. Luo, "MAFA," 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/3FBC52o>
- [22] S. Yadav and S. Shukla, "Analysis of k-Fold Cross-validation over hold-out validation on colossal datasets for quality classification," in *2016 IEEE 6th International Conference on Advanced Computing (IACC)*, 2016, pp. 78–83. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/IACC.2016.25>
- [23] E. Allibhai, "Holdout vs. Cross-validation in machine learning," 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/3z2TbE0>
- [24] F. Zhuang, Z. Qi, K. Duan, D. Xi, Y. Zhu, H. Zhu, H. Xiong, and Q. He, "A comprehensive survey on transfer learning," *Proceedings of the IEEE*, vol. 109, no. 1, pp. 43–76, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2020.3004555>
- [25] R. K. Indla, "An overview on amazon rekognition technology," 2021.
- [26] L. Herrera-Izquierdo and M. Grob, "A performance evaluation between docker container and virtual machines in cloud computing architectures," *Maskana*, vol. 8, pp. 127–133, 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/3z12oNf>
- [27] NVIDIA, "Jetpack sdk 4.5.1 archive," 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/32BxzT1>
- [28] Python, "Welcome to python.org," 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3qqTd4Q>
- [29] NVIDIA, "Quickstart guide - deepstream 6.0 release documentation," 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3sDTa8s>
- [30] ProminenceAI, "Prominenceai/deepstream-services-library: A shared library of on-demand deepstream pipeline services for Python and C/C++," GitHub. [Online]. Available: <https://bit.ly/3pyxM2y>
- [31] MongoDB, "The application data platform," MongoDB. [Online]. Available: <https://bit.ly/3qrRsUL>
- [32] N. Craig-Wood, "Rclone syncs your files to cloud storage," 2014. [Online]. Available: <https://bit.ly/3JlPNsu>
- [33] Docker, "Empowering app development for developers," 2020. [Online]. Available: <https://www.docker.com/>
- [34] A. Thakur, C. Clauss, C. Hollinger, V. Boivin, B. Lowe, M. Schoentgen, and R. Bouckennooghe, "abhiTronix/vidgear: VidGear v0.2.3," Oct. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5602375>
- [35] OpenCV. (2021) Opencv courses holiday sale. [Online]. Available: <https://bit.ly/3ezvAS1>
- [36] Google Developers, "Firebase," 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3JinCeh>
- [37] Pallets, "Flask web development, one drop at a time," Pallet, 2010. [Online]. Available: <https://bit.ly/3Hemy9h>
- [38] J. T. Mark Otto. (2021) Build fast, responsive sites with bootstrap. [Online]. Available: <https://bit.ly/32Nl5rK>
- [39] Google. (2021) Colaboratory. Google Research. [Online]. Available: <https://bit.ly/3EC3mk0>
- [40] T.-Y. Lin, M. Maire, S. Belongie, J. Hays, P. Perona, D. Ramanan, P. Dollár, and C. L. Zitnick, "Microsoft coco: Common objects in context," in *Computer Vision – ECCV 2014*, D. Fleet, T. Pajdla, B. Schiele, and T. Tuytelaars, Eds. Springer International Publishing, 2014, pp. 740–755. [Online]. Available: <https://bit.ly/3sxpZUu>
- [41] M. S. Aslanpour, S. S. Gill, and A. N. Toosi, "Performance evaluation metrics for cloud, fog and edge computing: A review, taxonomy, benchmarks and standards for future research." *Internet of Things*, vol. 12, p. 100273, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100273>

- [42] M. Ashouri, F. Lorig, P. Davidsson, and R. Spalazzese, “Edge computing simulators for iot system design: An analysis of qualities and metrics,” *Future Internet*, vol. 11, no. 11, p. 235, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/fi11110235>
- [43] F. Oliveira-Teixeira, T. P. Donadon-Homem, and A. Pereira-Junior, “Aplicación de inteligencia artificial para monitorear el uso de mascarillas de protección,” *Revista Científica General José María Córdova*, vol. 19, no. 33, pp. 205–222, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.21830/19006586.725>



PROTOTIPO DE UN DISPOSITIVO PARA LA MEDICIÓN AUTOMÁTICA DE SEÑALES FISIOLÓGICAS PARA ASISTIR AL DIAGNÓSTICO Y SEGUIMIENTO DE PACIENTES CON COVID-19

PROTOTYPE OF A DEVICE FOR THE AUTOMATIC MEASUREMENT OF PHYSIOLOGICAL SIGNALS TO ASSIST THE DIAGNOSIS AND MONITORING OF PATIENTS WITH COVID-19

Karla Llanos¹ , Christian Landi¹ , Fernando Yupa¹ , Paola Vasquez¹ ,
 Ismael Criollo¹ , John Calle-Siguencia¹ , Fernando Urgilés-Ortiz¹ ,
 Ana Cecilia Villa-Parra^{1,*}

Recibido: 15-11-2021, Recibido tras revisión: 20-12-2021, Aceptado: 28-12-2021, Publicado: 01-01-2022

Resumen

En el presente artículo se describe el diseño, construcción y resultados preliminares de un dispositivo para automatizar la medición de señales fisiológicas para asistir el diagnóstico y seguimiento de la COVID-19. El dispositivo utiliza un sistema para controlar actuadores lineales para encender/apagar instrumentos biomédicos certificados, además de algoritmos para el reconocimiento de imágenes de las pantallas de los instrumentos con mediciones de temperatura, saturación de oxígeno, presión arterial y frecuencia cardíaca. El sistema incluye también una aplicación móvil que recibe los datos de las mediciones a tiempo real y crea una base de datos para realizar una evaluación médica. Los resultados obtenidos demuestran un alto porcentaje de eficiencia en la adquisición de las mediciones. Después de hacer varias pruebas con usuarios, las evaluaciones SUS y PSSUQ permitieron verificar resultados satisfactorios respecto a la satisfacción y usabilidad del prototipo, demostrando la aceptación del dispositivo.

Palabras clave: automatización, COVID-19, e-Salud, procesamiento de imágenes, SUS, telemedicina

Abstract

This article describes the design, construction and preliminary results of a device to automate the measurement of physiological signals to assist in the diagnosis and monitoring of COVID-19. The device uses a system to controlling linear actuators to turn on/off certified biomedical instruments, in addition to algorithms for image recognition of displays with measurements of temperature, oxygen saturation, pressure and heart rate. The system also includes a mobile application, which receives data in real time and creates a database for medical evaluation. Results obtained with the device have demonstrated to provide a high percentage of efficiency in the data acquisition. After several trials with users, SUS and PSSUQ tests were applied to allow verifying the users' feedback regarding the satisfaction and usability of the prototype, with high score, showing the good acceptance of the device from the users.

Keywords: Automation, Covid-19, eHealth, image processing, SUS, telemedicine

^{1,*}Grupo de Investigación en Ingeniería Biomédica GIIB, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca.
 Autor para correspondencia ✉: avilla@ups.edu.ec.

Forma sugerida de citación: Llanos, K.; Landi, C.; Yupa, F.; Vasquez, P.; Criollo, I.; Calle-Siguencia, J.; Urgilés-Ortiz, F. y Villa-Parra, A. C. "Prototipo de un dispositivo para la medición automática de señales fisiológicas para asistir al diagnóstico y seguimiento de pacientes con COVID-19," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 27, pp. 49-58, 2022. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n27.2022.05>.

1. Introducción

La COVID-19 es una enfermedad respiratoria grave que se originó en Wuhan (Hubei, China), y que dio inicio a un brote epidémico en diciembre del año 2019. La Organización Mundial de la Salud (OMS), en función de las crecientes tasas de contagios a nivel global, declaró una crisis sanitaria mundial en enero del año 2020 [1, 2]. En Ecuador, hasta noviembre de 2021, el Instituto Nacional de Investigación en Salud Pública (INSPI) ha registrado 526 615 casos con pruebas PCR y 33 219 decesos confirmados por COVID-19 [3]. Esta enfermedad ataca al sistema respiratorio y entre sus síntomas más comunes se pueden citar fiebre, tos, dolor de cabeza, congestión nasal, fatiga, disminución de la saturación de oxígeno, pérdida del gusto y del olfato, síncope y desviaciones de los gases en la sangre [4–6]. Quienes adquirieron la enfermedad presentan alteraciones en la temperatura, en la presión arterial (principalmente hipertensión), en la frecuencia cardíaca y en la saturación de oxígeno (por la dificultad para respirar en casos graves de COVID-19).

En este escenario, los protocolos recomendados por los sistemas de salud incluyen la medición de estas variables fisiológicas para realizar el diagnóstico y pronóstico de la enfermedad [7, 8].

Los avances de la tecnología están permitiendo obtener datos sobre el impacto de la enfermedad y cumplir con los requerimientos para el cuidado de la población en la época de pandemia [9]. Por ejemplo, los teléfonos inteligentes son herramientas que se están utilizando para monitorear señales fisiológicas en varios desarrollos [10, 11], el empleo de tecnología vestible [12], el Internet de las cosas y big-data analytics [9], tienen un gran potencial para la asistencia en el diagnóstico de enfermedades como la COVID-19. Sin embargo, son pocos los desarrollos que integren en un solo sistema dispositivos certificados como oxímetros digitales, termómetros infrarrojos digitales y los tensiómetros para adquirir señales fisiológicas de interés para crear un historial clínico y bases de datos relevantes para sistemas de toma de decisiones [13, 14].

Plataformas para la transmisión y almacenamiento de los datos de un instrumento biomédico (IB) [14] y desarrollos que integren redes para la comunicación segura de los datos [15, 16] exigen aplicaciones digitales de telemedicina robustas como recursos fundamentales para la atención médica remota. El monitoreo continuo con sensores y protocolos para el seguimiento a través de plataformas de telemedicina con Internet de las cosas, constituyen herramientas valiosas para reducir la exposición al contagio de la COVID-19 de pacientes y del personal médico [17–21].

Con el objetivo de mejorar los protocolos para el diagnóstico y tratamiento de la COVID-19 con una herramienta tecnológica, en este trabajo se propone el desarrollo de un dispositivo portátil para realizar

la medición automática de la frecuencia cardíaca, la presión arterial, el nivel de saturación de oxígeno y la temperatura corporal. El dispositivo se basa en el uso de tres IB certificados y de una aplicación para visualizar los datos de las mediciones y compartirlos de manera segura con profesionales de la salud para su evaluación. A continuación, se describe el desarrollo de este dispositivo y las pruebas ejecutadas al primer prototipo.

2. Materiales y métodos

En la Figura 1 se muestra el diagrama de bloques que describe el funcionamiento de las etapas de *hardware* y *software* del dispositivo.

Se incluye una placa Raspberry Pi 3 modelo B+ (procesador de cuatro núcleos de 64 bits, 1,4 GHz, LAN inalámbrica de 5 GHz, Bluetooth 4.2 / BLE, Ethernet y capacidad PoE), tres actuadores lineales mini JS35A de 12 V, 4 A (1,2 pulg, 0,4 Nm, 0,6 pulg/s, 0,07 kg).

Entre los IB están un oxímetro de pulso (Jziki) que se ajusta al dedo índice, un termómetro infrarrojo (K&i), un tensiómetro de muñeca automático (URBEST) que muestra la presión sistólica/presión diastólica/frecuencia de pulso.

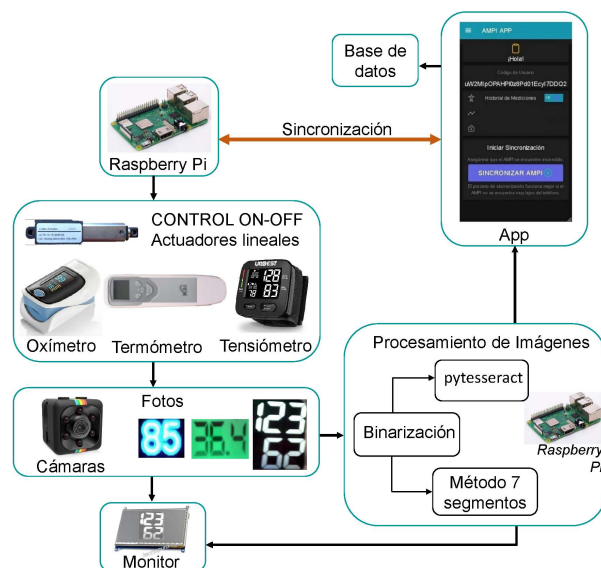


Figura 1. Diagrama de bloques del dispositivo

Se incluyen tres minicámaras Opticam SQ11 12 megapíxeles 4032×3024 y un monitor LCD 3,5" Raspberry touchscreen de 320×480 P.

Las mediciones se realizan con los IB dispuestos en una estructura mecánica diseñada para que los actuadores activen los IB para efectuar las mediciones de manera automática en el brazo izquierdo de los usuarios. Los IB no son desarmados ni manipulados internamente para garantizar la fiabilidad de las mediciones.

Para iniciar las mediciones es necesario sincronizar la *app* con la Raspberry y de esta manera se puede enviar la orden para activar los IB. Luego del encendido automático, se llevan a cabo las mediciones y la captura de las imágenes de las pantallas de cada IB.

Las imágenes adquiridas son procesadas en la Raspberry Pi para el reconocimiento del valor de la medición obtenida.

El monitor que se encuentra en el dispositivo permite visualizar, durante tres periodos de tiempo la pantalla de los IB durante las mediciones. Se inicia con el termómetro, luego el oxímetro y, finalmente, se muestra la pantalla del tensiómetro.

Cuando las mediciones son registradas se visualizan en el monitor y manda esta información a una aplicación que también permite visualizar las mediciones y envía los registros a una base de datos.

Para el diseño de la estructura mecánica del sistema electrónico y de la plataforma digital se han considerado las normas IEC 60601-1-2 (compatibilidad electromagnética), la IEC 60601-1-6 (usabilidad), IEC60601-1-8 (alarmas e indicadores) e IEC 60601-1-11 (dispositivos de uso en el hogar) [22]. Esto con el fin de obtener un prototipo confiable y seguro.

2.1. Estructura mecánica

En la Figura 2 se muestra el diseño completo de la estructura mecánica del dispositivo en Autodesk Inventor 2020, el cual consta de 15 particulares ensamblados con autosujeción por presión.

La estructura es de PLA (ácido poliláctico) impresa en 3D con una Ender 3 Pro. Se escogió este material debido a su facilidad a la hora de imprimir y a su alta resistencia mecánica.

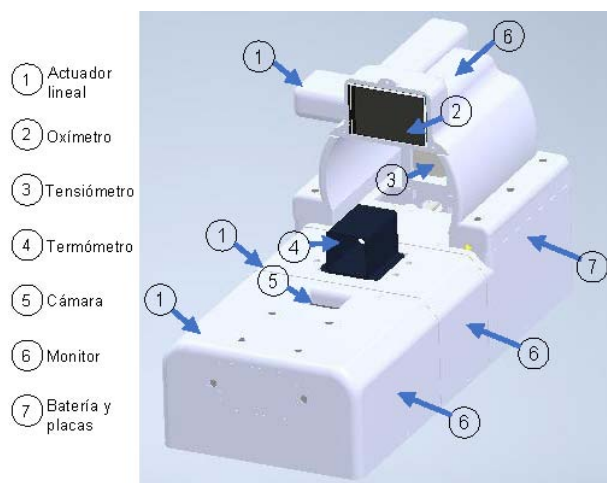


Figura 2. Diseño del dispositivo y sus componentes

El diseño de la estructura fue planteado a partir de medidas de los IB y de las medidas antropométricas del percentil 50, con ajuste manual a los demás percentiles. De esta manera, la estructura permite cumplir

con los protocolos de medición de cada IB para que los usuarios coloquen su brazo izquierdo y las mediciones se realicen correctamente.

El oxímetro se ubica en el lado derecho de la estructura para orientar al dedo índice sin la necesidad de aplicar presión en los extremos.

El termómetro se ubica en el área proximal-palmar de la mano para la toma de las medidas.

El tensiómetro se ajusta a la muñeca siguiendo el protocolo del propio IB.

Las cámaras están dispuestas para que la imagen de la pantalla de cada IB se adquiera a una distancia de 5 cm y sin cambios en la iluminación.

Los actuadores lineales tienen un recorrido de 30 mm y se han colocado de manera horizontal en la estructura con el fin de no sobredimensionarla.

Se diseñó un sistema de corredera para transformar un movimiento horizontal en vertical que permita garantizar que los pulsantes de los instrumentos médicos sean accionados de manera segura.

En la Figura 3a se muestran el acople del motor y en la Figura 3b se muestra la corredera diseñada para que se genere un desplazamiento de 4,5 mm para activar los dispositivos médicos.

En la Figura 3c se aprecia el mecanismo utilizado para activar el pulsante on/off del tensiómetro. El motor va acoplado al elemento A que al desplazarse horizontalmente permite que la corredera (elemento B) se mueva en sentido vertical como se muestra en la Figura 3d. Este mecanismo se replica para activar el termómetro y el oxímetro.

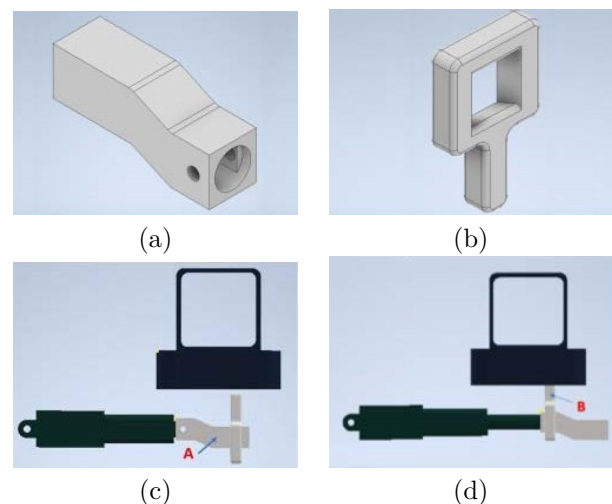


Figura 3. Elementos mecánicos para transformar el movimiento horizontal del motor en un movimiento vertical de la corredera (a) Acople del motor; (b) Corredera; (c) Sistema de corredera en posición inicial; (d) Sistema de corredera en posición final

2.2. Sistema electrónico

El sistema electrónico está compuesto por circuitos para: regular la alimentación de los IB y de las placas (5 V y 3,3 V), establecer la etapa de potencia para los actuadores (puente H), realizar el control y garantizar la carga de la batería (con leds para indicar carga completa y descarga). El dispositivo se alimenta con una batería recargable de Li-ion 3S2P Modelo 18650-3S2P de 12 V 4,4 A (0,3 kg; 115 mm × 20 mm × 70 mm). Se cuenta con fusibles y diodos para protección de la etapa de alimentación, además de sistemas de protección al paciente, como aislamiento de los conectores para impedir descargas eléctricas. El dispositivo considera el uso de sistemas de alimentación compatibles con normas de seguridad eléctrica para garantizar la protección de los usuarios.

Para el control se emplea la Raspberry que se ha programado en Python para hacer: a) la sincronización del *hardware* con la aplicación (*app*) que permita enviar la orden del inicio de las mediciones desde el teléfono inteligente; b) el control de tres actuadores lineales para el encendido de los equipos de medición y c) el manejo del monitor.

Las placas electrónicas y la batería están dispuestas en la estructura del dispositivo (ver Figura 2).

2.3. Reconocimiento de imágenes

Para el reconocimiento de la información de las mediciones hechas por los equipos médicos, a partir de las imágenes de las pantallas de los mismos, fue necesario adaptar un método en función de la representación gráfica de los números que reflejan la medición. Existen instrumentos que presentan la información con tipografía digital como se muestran en la Figura 4 o con la configuración de *display* (siete segmentos) como se muestra en la Figura 5.

Por esta razón se realizó un método de reconocimiento para el oxímetro (con tipografía digital) y para el termómetro y tensiómetro (con *displays*).

En la Figura 4 se puede observar que cada uno de los dígitos tiene un contorno de color celeste y en su interior resalta un color que tiende a blanco (paso 1). En este caso es necesario binarizar la imagen con un proceso de detección de un rango de colores que para la imagen adquirida es el color blanco. El resultado se muestra en el paso 2. Al tener binarizada la imagen y con los dígitos en color negro se emplea la herramienta para el reconocimiento óptico de caracteres (OCR) llamada pytesseract. Este es un recurso de código abierto que permite identificar caracteres directamente de imágenes de extensión jpeg, png, gif, bmp, tiff y otras con Python que utiliza el motor Tesseract-OCR de Google [23,24].

Después del procesamiento se crea una función que toma la imagen de la foto y devuelve el texto detectado

en la imagen. El resultado de este proceso se aprecia en el paso 3.



Figura 4. Reconocimiento de números con tipografía digital

Para el reconocimiento de dígitos a partir de un display de 7 segmentos como se muestra en la Figura 5, en el paso 1 es necesario transformar la imagen a escala de grises como se indica en el paso 2 y binarizar la imagen en blanco y negro (paso 3).

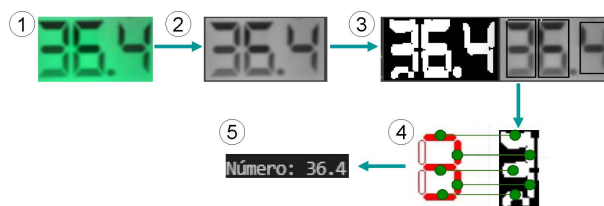
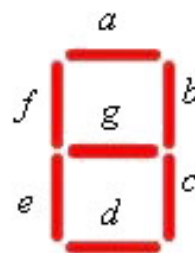


Figura 5. Reconocimiento de números con representación como display siete segmentos

Posteriormente se emplea un algoritmo diseñado para identificar la región de cada dígito como se muestra en el paso 4. Para este fin, se asignaron a cada segmento de la matriz de siete segmentos las letras indicadas en la Figura 6a. Una vez identificada la región de cada dígito se procede a comparar los puntos críticos con la tabla que se muestra en la Figura 6b, en la cual el número 0 representa un píxel en color negro y el número 1 representa un píxel en color blanco. La comparación se realiza por cada dígito de la imagen y permite obtener el resultado del paso 5 (Figura 5) con la identificación del número completo.

Número	g	f	e	d	c	b	a
0	0	1	1	1	1	1	1
1	0	0	0	0	1	1	0
2	1	0	1	1	0	1	1
3	1	0	0	1	1	1	1
4	1	1	0	0	1	1	0
5	1	1	0	1	1	0	1
6	1	1	1	1	1	0	1
7	0	0	0	0	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	1
9	1	1	0	1	1	1	1



(a)

(b)

Figura 6. (a) Asignación de nombre a los siete segmentos; (b) Tabla para la comparación de los segmentos identificados para la asignación del número correspondiente

Luego de obtener el valor numérico de la medición de cada instrumento, el valor es enviado a la base de datos de la *app*.

2.4. Plataforma digital

En la Figura 7 se muestra la estructura de la plataforma digital del dispositivo, conformado por tres subsistemas.

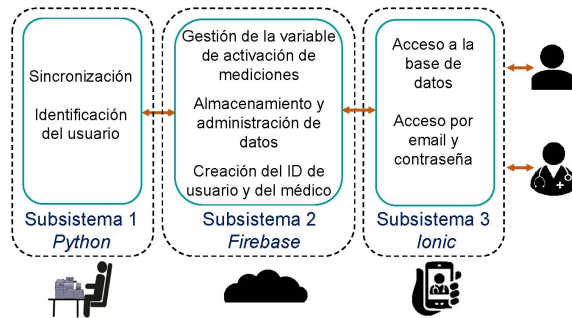


Figura 7. Subsistemas de la plataforma digital

El subsistema 1, que fue desarrollado en Python, establece la comunicación entre el Raspberry Pi con la base de datos de Firebase (BDF) para sincronizar el dispositivo y comprobar si en la base de datos existe un usuario. Cuando el Raspberry recibe la señal de inicio de medición se activa el dispositivo (instrumentos de medición y reconocimiento de imágenes) para enviar los datos de las mediciones y almacenarlos en la base de datos. Los datos enviados incluyen las mediciones de los tres instrumentos, el horario de la medición y el código de usuario.

El programa en el Raspberry Pi escucha y actualiza permanentemente los cambios de la variable que activa el proceso de toma y el envío de mediciones a la base de datos.

El subsistema 2 se desarrolló en la plataforma Firebase que tiene un soporte para la escucha de eventos y actualización automática para el lenguaje Python. Se emplearon dos servicios de Firebase: a) *Firebase Authentication* que permite guardar y controlar los datos de los usuarios que se registren y enlazar esta información a la base de datos y b) *Cloud Firestore* que es una base de datos NoSQL orientada a los documentos y permite guardar las mediciones y el dato de inicialización de las mediciones.

Con estos recursos se realiza la escritura/lectura de dos nodos (N1 y N2) de la BDF con la biblioteca Pyrebase. El N1 corresponde a «Estado Dispositivo» que dará la señal para iniciar el proceso de toma y el reconocimiento de señales. El N2 llamado «Código único de usuario», identifica al último usuario que sincronizó el dispositivo con la *app*. La escritura de datos cuenta con una función para el almacenamiento de información en la BDF. Aquí se almacenan los datos de las señales fisiológicas medidas.

El subsistema 3 se compone de la *app* que fue desarrollada en Ionic (Framework de código abierto para el desarrollo de aplicaciones móviles híbridas), para acceder en tiempo real a los datos de Firebase e informar

al usuario sobre los eventos para el manejo del dispositivo. En esta etapa se hace la escucha permanente de un nodo variable de Activación de Firebase que, de manera permanente, consulta y actualiza el dato de estado de la variable «Estado Dispositivo» de la BDF.

La *app* permite realizar el registro, la recuperación de clave de usuario y el inicio de sesión para tener acceso al menú principal. En el menú se accede al historial de las mediciones y a la sincronización de la *app* con el dispositivo. Cada usuario debe tener un código único de activación de la aplicación, el cual es dado en el momento que el usuario crea una cuenta. Este código único identificará al usuario y se actualizará cuando se ingrese a la aplicación.

Se ha programado un menú para soporte con información del manejo del dispositivo, cambio de contraseña y actualización de datos personales.

Para la administración de los datos del usuario (identificación y enlace con el dispositivo), además, se requieren los datos del personal médico que realizará el monitoreo de las señales fisiológicas. Se incluye en cada registro de las mediciones información sobre pérdida de olfato o gusto consultada en la *app*, síntomas relevantes en el diagnóstico de la COVID-19 [5].

2.5. Pruebas

Para comprobar la funcionalidad del dispositivo se hicieron pruebas para determinar: a) el tiempo que requiere el dispositivo para el registro de las señales fisiológicas (temperatura corporal, la presión arterial y la saturación de oxígeno); b) el porcentaje de error de las pruebas al sistema de reconocimiento de imágenes; c) evaluación de las funcionalidades de la *app*; d) evaluación del dispositivo y de la aplicación por parte de usuarios con la escala SUS (*System Usability Scale*) y PSSUQ (*Post-Study System Usability Questionnaire*) y e) el porcentaje de error en las mediciones registradas en la *app* frente a los resultados particulares de cada instrumento.

Para estimar el tiempo que tardará el dispositivo en llevar a cabo una medición se registra el tiempo que tarda cada proceso en completarse correctamente. Para verificar la exactitud del reconocimiento se compararon los valores registrados en veinte fotografías obtenidos con el algoritmo de reconocimiento con los valores registrados por una persona durante el monitoreo de la medición.

Para la evaluación de la *app* se probó el correcto registro y recuperación de clave utilizando un correo de Google; la verificación del servicio de la base de datos y almacenamiento; actualización de la información en la base de datos; comprobación del servicio para compartir el historial de mediciones; conectividad con la *app* en una red de datos de un operador, con una red wifi y con la señal de conexión débil; el rendimiento observando el consumo de batería, si el dispositivo se sobrecalienta y el uso de la memoria.

En las pruebas participaron 16 personas saludables (7 hombres, 9 mujeres, 15 años a 72 años) cumpliendo normas de bioseguridad y siguiendo un *protocolo de pruebas* que se describe a continuación: 1) Se explica a los participantes el funcionamiento del dispositivo. 2) Cada participante debe firmar un consentimiento informado indicando que están de acuerdo con el desarrollo de las pruebas con el dispositivo. 3) Se requiere acceder a la *app* con su usuario y sincronizar la aplicación con el dispositivo. 4) Se pide a cada participante que coloque su brazo izquierdo en el dispositivo con la palma de la mano hacia abajo y cerrar la cinta del tensiómetro como se muestra en la Figura 8b y Figura 8c. 5) Se solicita hacer cinco mediciones siguiendo el procedimiento de adquisición y visualización de los valores de las señales fisiológicas en la *app*. Entre cada medición hay un descanso de 180 s. 6) Posteriormente, se realizan cinco mediciones de las variables fisiológicas empleando un tensiómetro, un termómetro y un oxímetro de manera individual, siguiendo los protocolos de medición de cada equipo. Entre cada medición individual existe un descanso de 180 s. 7) Finalizadas las mediciones se pide a cada participante responder los cuestionarios SUS y PSSUQ para conocer el nivel de satisfacción con el algoritmo correspondiente al método [25] y usando la herramienta «PSSUQ Calculator» [26]. 8) Se desinfecta el dispositivo.

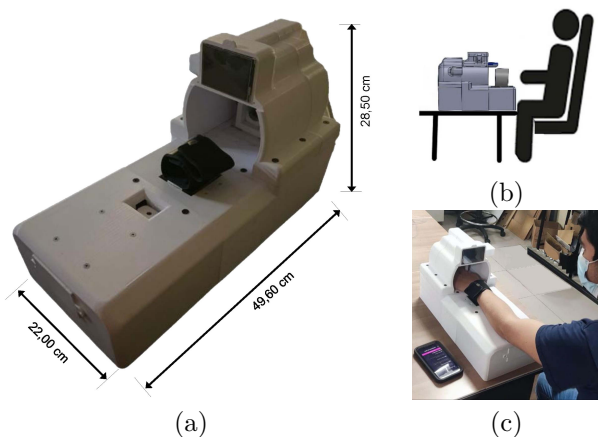


Figura 8. Prototipo del dispositivo (a) Integración de los elementos y dimensiones; (b) Posición correcta para realizar las mediciones; (c) Usuario con su brazo izquierdo en el dispositivo con el tensiómetro ajustado y la aplicación sincronizada para el inicio de las mediciones

3. Resultados y discusión

En la Figura 8a se muestra el dispositivo con los componentes mecánicos y electrónicos integrados. El dispositivo tiene una dimensión de 22 cm × 49,60 cm × 28,5 cm y un peso de 1,125 kg. Tomando en consideración que los IB funcionan al mismo tiempo, se estima como valor total de medición el tiempo de respuesta del tensiómetro digital, debido a que este IB

es el que mayor tiempo requiere para brindar una respuesta en su pantalla. Por esta razón, se considera que el dispositivo permite la obtención de las mediciones de temperatura, frecuencia cardíaca, presión arterial y nivel de saturación de oxígeno en 70 s. Como es necesario hacer una limpieza en casos de varios usuarios, se considera que el tiempo para el empleo del dispositivo por un usuario es de 4 min. Después de limpiar con alcohol, el dispositivo puede volver a ser utilizado inmediatamente. Basándose en este tiempo, en una hora es posible realizar doce mediciones seguidas. En la Tabla 1 se detalla el consumo de los componentes del dispositivo, definiendo un consumo total de 3,20 Ah. Considerando las especificaciones de la batería y el consumo total, el tiempo de funcionamiento continuo del dispositivo o autonomía es de 1,37 h. El dispositivo, por tal razón, funciona sin suministro de la red eléctrica por un tiempo de operación satisfactorio, cumpliendo la característica de portabilidad y seguridad según lo establecido por normas como la IEC 60601.

Tabla 1. Consumo de energía del dispositivo durante doce mediciones en una hora de uso

Elemento	Tiempo medición (h)	Corriente (A)	Consumo (Ah)
Raspberry	1,00	0,70	0,70
Actuador	0,02	0,04	0,48
Termómetro	0,005	0,36	0,36
Oxímetro	0,04	0,36	0,36
Tensiómetro	0,075	0,6	0,60
Monitor	1,00	0,74	0,74
Consumo total			3,20

Respecto a la exactitud del reconocimiento, al comparar los valores de respuesta del algoritmo de reconocimiento con los valores registrados durante el monitoreo de la medición, se obtuvo un porcentaje de exactitud del 100 %. Esta tasa de acierto permite garantizar que el sistema del dispositivo registra los valores de IB comerciales integrados en una plataforma que almacena la información para el seguimiento de casos de COVID-19 y otras enfermedades respiratorias, datos que se han demostrado ayudan al diagnóstico y que son obtenidos de manera segura.

Sobre el funcionamiento de la *app* se verificó que el acceso con autenticación por correo electrónico y contraseña se realiza satisfactoriamente. Durante la creación de una cuenta se incluyó la información de identificación, el proveedor de servicio, fecha de creación de la cuenta, última fecha de acceso y el código único de usuario.

En la Figura 9a se muestra la interfaz correspondiente a la página principal, en la cual se despliegan las páginas y actividades principales de la aplicación: sección de salud, historial de mediciones y sincronización

con el dispositivo. En la Figura 9b se muestra el botón para la activación del dispositivo e inicio para la toma de señales fisiológicas.

En la Figura 9c se indica la información requerida para crear el perfil de usuario y la Figura 9d muestra un ejemplo de las mediciones almacenadas en la base de datos de Firebase obtenidas del dispositivo.

Durante las pruebas, todas las mediciones visualizadas en el monitor fueron enviadas a la base de datos. De esta manera, se vio el correcto funcionamiento de la plataforma digital para el registro de las mediciones de todos los IB.

La *app* resulta ser sencilla e intuitiva y sirve como interfaz para la comunicación entre el usuario y el dispositivo.

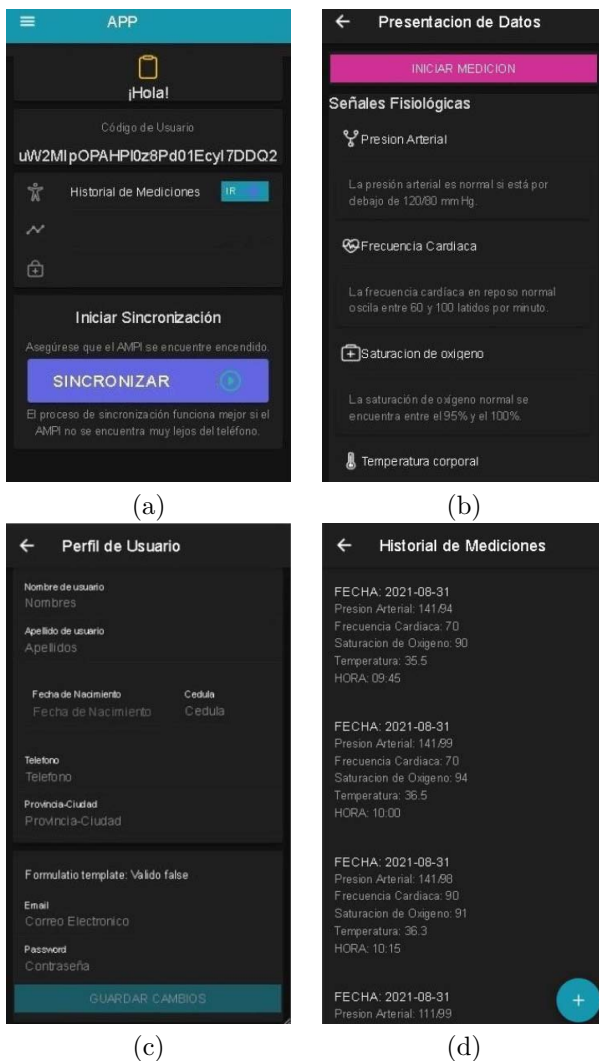


Figura 9. Interfaz de la app (a) Página principal; (b) Interfaz para el inicio de la medición; (c) Perfil de usuario; (d) Historial de mediciones

Se verificó que la aplicación funciona perfectamente con diferentes sistemas operativos (Android e IOS) y desde una página web. De igual manera, la aplicación

funciona correctamente con siete diferentes marcas de teléfono. El tiempo promedio para abrir la aplicación hasta que se muestra la interfaz principal es de $3,25 \pm 1,75$ s.

Se verificó que ningún dispositivo móvil de los participantes se sobrecalentó y el consumo de batería promedio de la aplicación fue de 5,10 %. En el caso del uso de memoria total, se encontró 13 MB de uso promedio de RAM y 25,9 MB de almacenamiento. Con estos resultados se confirma que la aplicación tiene un 100 % de funcionalidad y puede ser empleada sin inconvenientes en diferentes dispositivos móviles.

Respecto a la exactitud de las mediciones del dispositivo frente a las medidas obtenidas empleando los instrumentos de manera individual y activados de forma manual, para la saturación de oxígeno, la frecuencia cardíaca y la temperatura corporal el porcentaje de exactitud supera el 98 %. Para la presión arterial el porcentaje de exactitud supera el 96 %. Los resultados demuestran que la estructura mecánica del dispositivo, que integra los IB y permite su activación automática no altera los protocolos para la medición. Los IB empleados son descritos en diversas propuestas como parte de plataformas para telemedicina e Internet de las cosas. Si bien en el caso de la presión arterial se recomienda la medición manual [27], los registros con sistemas digitales son considerados válidos y útiles en los protocolos de diagnóstico y seguimiento de enfermedades del sistema respiratorio [19], [21], [28]. Por lo tanto, el dispositivo desarrollado se considera un aporte como herramienta para la asistencia al diagnóstico y seguimiento.

En la Tabla 2 se presentan los resultados de la evaluación SUS, en la cual cada participante respondió diez preguntas usando una escala de 1 a 5 (E1: totalmente desacuerdo; E2: desacuerdo; E3: neutral; E4: de acuerdo; E5: totalmente de acuerdo).

Las preguntas fueron: 1) «Creo que usaría este dispositivo frecuentemente»; 2) «Encuentro este dispositivo innecesariamente complejo»; 3) «Creo que el dispositivo fue fácil de usar»; 4) «Creo que necesitaría ayuda de una persona con conocimientos técnicos para usar este dispositivo»; 5) «Las funciones de este dispositivo están bien integradas»; 6) «Creo que el dispositivo es inconsistente»; 7) «Imagino que la mayoría de la gente aprendería a usar este dispositivo en forma rápida»; 8) «Encuentro que el dispositivo es confuso de usar»; 9) «Me siento confiado al usar este dispositivo»; 10) «Necesité aprender muchas cosas antes de ser capaz de usar este dispositivo».

La puntuación SUS total calculada con el algoritmo correspondiente al método [25] fue $82,50 \pm 17,17$.

Más del 60 % de los participantes opinan que usarían este dispositivo frecuentemente, que fue fácil de usar y que sus funciones están bien integradas.

Tabla 2. Resultados del cuestionario SUS

Pregunta	% E1	% E2	% E3	% E4	% E5
1	10	15	13	12	50
2	56	25	0	19	0
3	0	19	6	12	63
4	19	19	6	6	50
5	0	31	6	0	63
6	57	6	6	31	0
7	6	38	12	0	44
8	61	19	20	0	0
9	0	44	6	6	44
10	63	6	6	25	0

Respecto a la calificación del cuestionario PSSUQ, el resultado del rendimiento y la satisfacción de la *app* es de 1,47. La utilidad del sistema tuvo una puntuación media de 1,25; la calidad de la información obtuvo una puntuación de 1,5 y la calidad de la interfaz una puntuación de 1,67. Estos resultados indican que la aplicación se encuentra en un nivel alto de satisfacción y usabilidad, debido a que cuanto menor sea la puntuación entre 1 y 7, mejor es el rendimiento.

Los participantes opinaron al inicio el dispositivo puede considerarse complejo, sin embargo, las indicaciones brindadas, el contar con un manual de funcionamiento y la práctica ayudan a los usuarios a manejar el dispositivo con facilidad. Sin embargo, la mitad de los participantes manifestaron que se sentirían más seguros en compañía de un profesional que les guíe. El grupo de mayor edad planteó la necesidad de contar con una persona para asistirlos en el manejo de la *app*. Este hecho muestra que las nuevas tecnologías deben incluir una capacitación orientada a la población que no conoce de plataformas digitales. Considerando el potencial de las aplicaciones en el marco de la pandemia y la nueva generación de servicios de salud [29] es trascendental impulsar la inclusión de alfabetización digital para que propuestas de telemedicina tengan un mayor impacto.

Un grupo manifestó que manipular con una sola mano el teléfono celular puede resultar difícil, sin embargo, el monitor facilita el inicio de las mediciones y el seguimiento de los datos obtenidos. Esto brinda seguridad a los usuarios, debido a que algunos participantes expresaron que existieron errores en el envío de datos lo cual exigió repetir las mediciones. Es importante incorporar en la *app* alarmas y mensajes de audio como recursos opcionales que guíen al grupo de usuarios que requieran ayuda adicional.

Los participantes opinaron que en conjunto, el dispositivo es un buen equipo; sin embargo, es necesario acostumbrarse a contar con dispositivo de esta naturaleza en su hogar. Un participante manifestó incomodidad al no poder ver su mano durante las mediciones, lo cual plantea considerar nuevos materiales para la estructura que permita visualizar el proceso de medición en pro de garantizar la confianza de los usuarios

en el dispositivo.

Es necesario hacer un estudio con población que ya padeció COVID-19 con el objetivo de analizar el impacto del dispositivo como herramienta para el cuidado de este grupo.

Se considera que el dispositivo propuesto constituye una base sólida para desarrollar nuevas plataformas basadas en algoritmos de inteligencia artificial y análisis de datos como herramientas para diagnóstico de casos asintomáticos de COVID-19 y para establecer modelos de predicción con datos adquiridos a tiempo real [9], [20].

Contar con recursos innovadores de manera accesible es lo que permitirá fortalecer los servicios de salud del futuro.

4. Conclusiones

El prototipo del dispositivo para la medición automática de señales fisiológicas de interés para el diagnóstico de COVID-19 propuesto es de fácil uso, portátil, no invasivo, que garantiza la validez de las mediciones y la seguridad del paciente.

La *app* permite al usuario manejar un historial clínico con información clave para el seguimiento de COVID-19 y enfermedades respiratorias.

Las pruebas de usabilidad fueron muy importantes para conocer los aspectos a mejorar en la estructura mecánica y en la plataforma digital.

Referencias

- [1] WHO. (2020) Archived: WHO Timeline - COVID-19. World Health Organization. [Online]. Available: <https://bit.ly/32GwzNj>
- [2] A. Trilla, "Un mundo, una salud: la epidemia por el nuevo coronavirus COVID-19," *Medicina Clínica*, vol. 154, no. 5, pp. 175–177, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.medcli.2020.02.002>
- [3] Ministerio de Salud. (2021) Actualización de casos de coronavirus en Ecuador. Instituto Nacional de Investigación en Salud Pública, Ecuador. [Online]. Available: <https://bit.ly/3Fyqtgx>
- [4] M. Villegas-Chiroque, "COVID-19 pandemic: fight or flight," *Revista Experiencia en Medicina del Hospital Regional Lambayeque*, vol. 6, no. 1, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.37065/rem.v6i1.424>
- [5] C. Menni, C. H. Sudre, C. J. Steves, S. Ourselin, and T. D. Spector, "Quantifying additional COVID-19 symptoms will save lives," *The Lancet*, vol. 395, no. 10241,

- pp. e107–e108, Jun 2020. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)31281-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)31281-2)
- [6] B. Mizrahi, S. Shilo, H. Rossman, N. Kalkstein, K. Marcus, Y. Barer, A. Keshet, N. Shamir-Stein, V. Shalev, A. E. Zohar, G. Chodick, and E. Segal, “Longitudinal symptom dynamics of COVID-19 infection,” *Nat Commun*, vol. 11, no. 1, p. 6208, Dec. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20053-y>
- [7] A. Bella, R. Latif, A. Saddik, and F. Z. Guerrouj, “Monitoring of physiological signs and their impact on the COVID-19 pandemic: Review,” *E3S Web of Conferences*, vol. 229, p. 01030, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202122901030>
- [8] A. Espinosa Brito, “A propósito de la COVID-19: Mide tu presión arterial, contrólala y vive más,” *Revista Finlay*, vol. 11, no. 3, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/32I53is>
- [9] D. S. W. Ting, L. Carin, V. Dzau, and T. Y. Wong, “Digital technology and COVID-19,” *Nature Medicine*, vol. 26, no. 4, pp. 459–461, Apr 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41591-020-0824-5>
- [10] R. Rethnakumar, M. G. Md Johar, M. H. Alkawaz, R. A. A. Helmi, and N. M. Tahir, “Smartphone based application for body temperature and heart rate measurements,” in *2021 IEEE 12th Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC)*, 2021, pp. 189–194. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICSGRC53186.2021.9515284>
- [11] A. Depari, A. Flammini, S. Rinaldi, and A. Vezzoli, “A portable multi-sensor system for non-invasive measurement of biometrical data,” *Procedia Engineering*, vol. 47, pp. 1323–1326, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.399>
- [12] S. Mirjalali, S. Peng, Z. Fang, C.-H. Wang, and S. Wu, “Wearable sensors for remote health monitoring: Potential applications for early diagnosis of COVID-19,” *Advanced Materials Technologies*, vol. n/a, no. n/a, p. 2100545, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/admt.202100545>
- [13] L. G. Meza Contreras, M. Botero, and W. Ardila, “Diseño de procedimientos para la calibración de tensiómetros según la norma técnica NTC-ISO/IEC 17025,” *Revista Colombiana de Física*, vol. 43, no. 2, p. 323, 2011. [Online]. Available: <https://bit.ly/3124ijU>
- [14] L. P. Motta, P. P. F. d. Silva, B. M. Borguezan, J. L. M. d. Amaral, L. G. Milagres, M. N. Bóia, M. R. Ferraz, R. Mogami, R. A. Nunes, and P. L. d. Melo, “An emergency system for monitoring pulse oximetry, peak expiratory flow, and body temperature of patients with COVID-19 at home: Development and preliminary application,” *PLoS One*, vol. 16, no. 3, p. e0247635, Mar. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247635>
- [15] J. Martinho, L. Prates, and J. Costa, “Design and implementation of a wireless multiparameter patient monitoring system,” *Procedia Technology*, vol. 17, pp. 542–549, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.10.261>
- [16] D. M. D’Addona, R. Rongo, R. Teti, and R. Martina, “Bio-compatible cyber-physical system for cloud-based customizable sensor monitoring of pressure conditions,” *Procedia CIRP*, vol. 67, pp. 150–155, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.245>
- [17] M. M. Yassin, A. M. Saber, M. N. Saad, A. M. Said, and A. M. Khalifa, “Developing a low-cost, smart, handheld electromyography biofeedback system for telerehabilitation with clinical evaluation,” *Medicine in Novel Technology and Devices*, vol. 10, p. 100056, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.medntd.2020.100056>
- [18] M. Martínez-García, M. Bal-Alvarado, F. Santos Guerra, R. Ares-Rico, R. Suárez-Gil, A. Rodríguez-Álvarez, A. Pérez-López, E. Casariego-Vales, e. N. d. E. de Seguimiento Compartido TELEA-COVID Lugo, and E. T. C.-. (Lugo), “[monitoring of COVID-19 patients by telemedicine with telemonitoring],” *Elsevier Public Health Emergency Collection*, vol. 220, no. 8, pp. 472–479, Jun. 2020. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.1016/j.rce.2020.05.013>
- [19] B. Clipper, “The influence of the COVID-19 pandemic on technology: Adoption in health care,” *Nurse Lead*, vol. 18, no. 5, pp. 500–503, Jun. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.mnl.2020.06.008>
- [20] Y. Coelho, L. Lampier, C. Valadão, E. Caldeira, D. Delisle-Rodríguez, A. C. Villa-Parra, C. Cobos-Maldonado, J. Calle-Siguencia, F. Urgilés-Ortiz, and T. Bastos-Filho, “Towards the use of artificial intelligence techniques in biomedical data from an integrated portable medical assistant to infer asymptomatic cases of covid-19,” in *Information Technology and Systems*, Á. Rocha, C. Ferrás, P. C. López-López, and

- T. Guarda, Eds. Springer International Publishing, 2021, pp. 24–34. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-030-68418-1_3
- [21] F. Z. Fagroud, H. Toumi, E. H. Ben Lahmar, M. A. Talhaoui, K. Achtaich, and S. E. Filali, “Impact of IoT devices in E-Health: A review on IoT in the context of COVID-19 and its variants,” *Procedia Comput Sci*, vol. 191, pp. 343–348, Sep. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.07.046>
- [22] A. Ravizza, C. De Maria, L. Di Pietro, F. Sternini, A. L. Audenino, and C. Bignardi, “Comprehensive review on current and future regulatory requirements on wearable sensors in preclinical and clinical testing,” *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, vol. 7, p. 313, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00313>
- [23] S. Hoffstaetter, J. Bochi, M. Lee, L. Kistner, R. Mitchell, E. Cecchini, J. Hagen, D. Morawiec, E. Bedada, and U. Akyüz. (2021) Pytesseract 0.3.8. Python Software Foundation. [Online]. Available: <https://bit.ly/3mCXRvn>
- [24] R. de la Vega. (2021) Pytesseract: Reconocimiento óptico de caracteres en Python. PHAROS. [Online]. Available: <https://bit.ly/3qypbfc>
- [25] M. Almenara Masbernát, “Modelo teórico-práctico para la implementación del diseño centrado en el usuario en el desarrollo, la validación y la aceptación de los productos de apoyo para personas con enfermedades de origen neurológico,” Ph.D. dissertation, 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/3pxFqtL>
- [26] UIUX Trend. (2021) Pssuq calculator. UIUX Trend. [Online]. Available: <https://bit.ly/3z1Xgsa>
- [27] I. Guerra Llamas, D. H. Gascuña, C. Ledesmas Torres, and I. García Pérez, “Diferencias en las tomas de tensión arterial manual y automática,” *Fundación Renal Íñigo Álvarez de Toledo. Madrid*, 2014. [Online]. Available: <https://bit.ly/3z5F2FW>
- [28] V. Santos, M. Trujillo, K. Portilla, and A. Rosales, “Accessible eHealth system for heart rate estimation,” in *Advances in Emerging Trends and Technologies*, M. Botto-Tobar, J. León-Acurio, A. Díaz Cadena, and P. Montiel Díaz, Eds. Springer International Publishing, 2020, pp. 260–269. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-030-32022-5_25
- [29] P. Eslami, S. R. Niakan Kalhori, and M. Taheriyani, “eHealth solutions to fight against COVID-19: A scoping review of applications,” *Medical Journal of the Islamic Republic of Iran*, vol. 35, p. 43, Apr. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.47176/mjiri.35.43>



UNA REVISIÓN DE LOS ÚLTIMOS AVANCES DE LOS COLECTORES SOLARES TÉRMICOS APLICADOS EN LA INDUSTRIA

A REVIEW OF THE STATE-OF-THE-ART OF SOLAR THERMAL COLLECTORS APPLIED IN THE INDUSTRY

Willian Carrión-Chamba¹ , Wilson Murillo-Torres¹ ,

Andrés Montero-Izquierdo^{2,*}

Recibido: 16-05-2021, Recibido tras revisión: 28-06-2021, Aceptado: 03-08-2021, Publicado: 01-01-2022

Resumen

El consumo energético asociado al sector de la industria representa el 38 % de la demanda de energía a nivel global, siendo un aspecto importante que marca el desarrollo de un país. En este sentido, es sumamente importante diversificar las distintas fuentes de energía e incorporar el uso de fuentes renovables de energía, como la solar, no solamente con la idea de asegurar el suministro energético, sino también considerando como elementos que permitan la reducción de las emisiones generadas por el uso de combustibles fósiles. El presente trabajo aborda las principales tecnologías de colectores solares que pueden ser incorporadas a distintos tipos de industrias, basado en experiencias e investigaciones en otros países. Sobre la base de esta revisión, se ha visto que una buena parte de las industrias a nivel mundial requieren temperaturas en sus procesos hasta los 250 °C, lo que hace idóneo el uso de esta tecnología. En función de cada industria, se podrán usar colectores solares de placa plana, de tubos de vacío, del tipo Fresnel o cilindro parabólicos. Por último, se detallan los ahorros asociados a algunas instalaciones y se abordan los desafíos relacionados con este sector.

Palabras clave: energía solar, colectores solares térmicos, aplicaciones industriales

Abstract

The energy consumption associated with the industry sector represents 38% of the global energy demand, being an important aspect that marks the development of a country. In this sense, it is extremely important to diversify the different energy sources and incorporate the use of renewable energy sources, such as solar energy, not only with the idea of ensuring energy supply, but also as elements that enable the reduction of energy emissions generated by the use of fossil fuels. This work addresses the main solar collector technologies that may be incorporated into different types of industries, based on experiences and research in other countries. Based on this review, it has been seen that an important part of the industries worldwide requires temperatures up to 250 °C in their processes, which makes suitable the use of solar energy technology. Depending on each industry, flat plate, vacuum tube, Fresnel type or parabolic trough solar collectors may be used. Finally, the savings associated with some facilities are detailed and the challenges related to this sector are addressed.

Keywords: Solar energy, solar thermal collectors, industrial applications.

¹Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Cuenca, Ecuador.

^{2,*}Grupo de Ingeniería de Reactores, Catálisis y Tecnologías del Medio Ambiente - IRCMA, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Cuenca, Ecuador. Autor para correspondencia ✉: andres.montero@ucuenca.edu.ec.

Forma sugerida de citación: Carrión-Chamba, W.; Murillo-Torres, W. y Montero-Izquierdo, A. "Una revisión de los últimos avances de los colectores solares térmicos aplicados en la industria," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 27, pp. 59-73, 2022. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n27.2022.06>.

1. Introducción

La energía es un componente clave para el bienestar y desarrollo económico de una nación, por lo que una economía basada en la industrialización es una de las razones del incremento en la tendencia del consumo energético [1]. El sector industrial emplea el 38 % de la demanda de energía a nivel global, ubicándose como la actividad económica de mayor consumo de este recurso [2]. Las fuentes de energía en las industrias manufactureras provienen generalmente de los combustibles fósiles y del gas natural. No obstante, las emisiones de gases de efecto invernadero, producto de la combustión de hidrocarburos, se han convertido en una problemática ambiental que aceleran los efectos del cambio climático [3]. Incorporar alternativas eficientes de energía sostenible y así reducir los niveles de contaminación del aire, es el desafío actual al que se enfrenta el sector industrial [4]. Una solución ante esta situación es la implementación de sistemas basados en energías renovables y medidas de eficiencia energética, considerando que en el futuro los combustibles fósiles alcanzarán su límite de extracción. La energía solar por su abundancia y disponibilidad gratuita es uno de los recursos renovables con mayor potencial para reducir los niveles de emisión de CO₂ a la atmósfera [5]. La radiación solar se puede aprovechar de dos formas: la conversión directa en electricidad por medio de celdas fotovoltaicas y la conversión térmica con el uso de colectores solares [6].

El uso de la energía solar térmica en la industria se viene investigando desde los años setenta a través de programas de la Agencia Internacional de la Energía (IEA) como el *Solar Heating & Cooling Programme* [7]. A finales de 2019 la potencia solar térmica instalada fue de 700 MW_t considerando al menos ochocientos proyectos con un área total de captación de aproximadamente un millón de metros cuadrados instalados en el mundo [8]. Las industrias de alimentos, textiles, papel, metales, plásticos y la industria química se destacan entre las principales empresas que emplean energía solar térmica en el desarrollo de sus procesos de manufactura [9]. Dependiendo del tipo de proceso industrial, se puede dar una clasificación de los colectores solares dependiendo del rango de temperatura en tres categorías: baja temperatura (< 150 °C), media temperatura (150–400 °C) y alta temperatura (> 400 °C) [10]. Sin embargo, en empresas comerciales e industriales se tiene una mayor demanda a temperaturas por debajo de los 250 °C [11]. Este artículo comprende una revisión de los últimos avances de los colectores solares térmicos aplicados a la industria mediante la presentación de aspectos técnicos, económicos y ambientales, considerando instalaciones reales y simulaciones dinámicas de los sistemas analizados.

2. La energía solar térmica y su aprovechamiento

La energía solar térmica consiste en aprovechar la energía del Sol para calentar un fluido caloportador y transferir ese calor a otro medio dentro de un proceso o sistema. Este tipo de energía renovable es capaz de sustituir o reducir el uso de combustibles fósiles y debido a la existencia de un mercado competitivo se considera como una de las alternativas comerciales más económicas para la producción de calor [12]. Sin embargo, la intermitencia de la energía solar hace necesario disponer de sistemas auxiliares de almacenamiento térmico, lo que resulta en mayores costos de inversión y, a su vez, menor viabilidad económica para la ejecución de nuevos proyectos [13]. La energía térmica se puede almacenar en forma de calor latente o calor sensible; no obstante, en el mecanismo de calor latente con materiales de cambio de fase o *Phase change materials* (PCM) se requiere un menor volumen de almacenamiento debido a que la densidad de energía es mayor que en los materiales de calor sensible [7].

Los colectores solares térmicos son dispositivos encargados de transformar la energía solar en térmica a través de diversos principios de funcionamiento que varían según el tipo de colector empleado [14]. En aplicaciones industriales los principales aspectos a tomar en cuenta para instalar un sistema solar térmico son la temperatura objetivo, el requerimiento energético, los criterios económicos, la disponibilidad del espacio y el grado de madurez de la tecnología analizada [15]. Basándose en los rangos de temperaturas y uso en la industria, este trabajo abarca a los colectores de baja y media temperatura.

2.1. Colectores de baja temperatura

2.1.1. Colector de placa plana

El colector solar de placa plana o *Flat plate collector* (FPC) transforma la energía solar en térmica empleando un panel compuesto por una cubierta acristalada, que permite el paso de la radiación solar hasta incidir y ser absorbida por la superficie selectiva de una placa absorbente. En la Figura 1 se observa un corte transversal de un colector FPC en donde se diferencia cada uno de sus componentes. La energía térmica después de ser interceptada en la placa se transfiere al interior de los tubos por donde circula el fluido caloportador, para finalmente pasar a un sistema de almacenamiento, o ser utilizado de manera directa [16]. La pérdida de calor del sistema se reduce utilizando aislante térmico en la parte inferior y en los laterales de la carcasa; asimismo, la cubierta de vidrio cumple la función de minimizar las pérdidas de calor por convección y radiación emitida desde la placa absorbente [17]. Los FPC tienen la particularidad de aprovechar la radiación solar directa

y difusa; sin embargo, por ser estacionarios reciben menos energía por unidad de área del colector [16]. Estos dispositivos actúan en un intervalo de baja temperatura ($< 100\text{ }^{\circ}\text{C}$) y, por tener una estructura simple a comparación con otros colectores, poseen un bajo costo en el mercado [18].

2.1.2. Colector de tubos de vacío

El colector de tubos de vacío o *evacuated tube collector* (ETC) está compuesto de un número determinado de tubos de cristal en donde cada uno de ellos está compuesto por dos tubos concéntricos. El tubo interior se encuentra cubierto con una capa absorbente selectiva, mientras que cada unidad concéntrica es separada por el principio de sellado al vacío [17]. El objetivo de generar el vacío es reducir las pérdidas de calor por convección y conducción; además, es una ventaja técnica que permite operar al dispositivo a temperaturas más elevadas que los FPC.

La temperatura de operación del colector ETC puede alcanzar valores de hasta $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ [19]. Además, la alta eficiencia térmica y los costos relativamente bajos de este colector son las razones principales de su alta competencia en el mercado [20]. Existen dos tipos principales de colectores ETC:

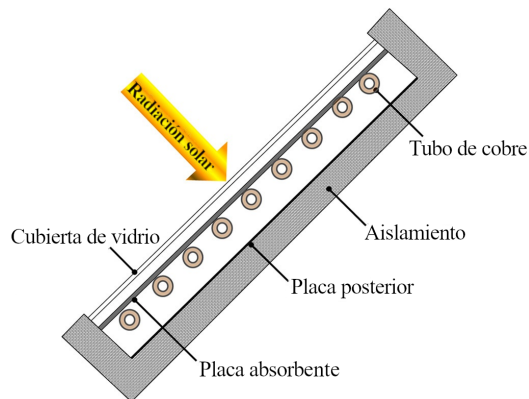


Figura 1. Partes de un colector de placa plana [21]

1. ETC del tipo *heat-pipe*. Este colector se basa en el principio de funcionamiento denominado ciclo de evaporación-condensación. El proceso inicia cuando el tubo de calor recibe la radiación solar y hace que el fluido altamente volátil (por ejemplo, metanol o etanol) contenido en su interior cambie de estado líquido a gaseoso, provocando que el vapor se eleve a la parte superior del tubo donde se encuentra el condensador [18]. El vapor al condensarse libera el calor latente hacia el circuito principal y luego el líquido condensado regresa a la parte inferior del tubo de calor para completar el ciclo de circulación [22]. En la Figura 2 se muestra la sección transversal de un colector de tubos de vacío del tipo *heat-pipe*.

2. ETC de flujo directo. En este colector, el interior del tubo absorbedor está aislado al vacío y tiene integrado una tubería en forma de U que permite la entrada y salida del fluido (Figura 3). La tubería interna es de metal y está cubierta con un revestimiento de material selectivo para acelerar la transmisión de calor hacia el fluido y reducir las pérdidas por radiación. Durante el proceso, el fluido frío ingresa y absorbe el calor de las tuberías en forma de U calentadas por la radiación solar para finalmente descargarse por la salida de las tuberías [16].

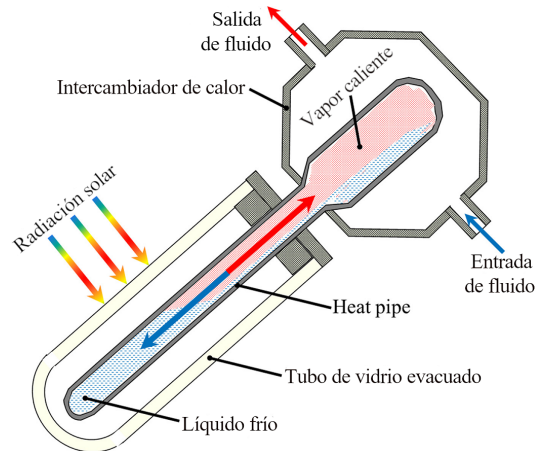


Figura 2. Vista transversal de un colector de tubos del tipo *heat-pipe* [21]

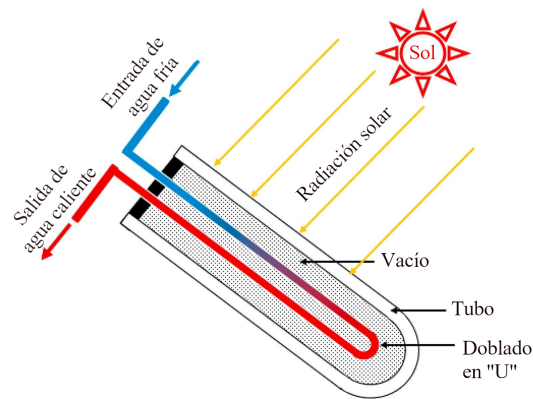


Figura 3. Vista transversal de un colector de tubos de vacío de flujo directo [9]

2.1.3. Colector parabólico compuesto

El colector parabólico compuesto o *compound parabolic collector* (CPC) está conformado por dos superficies parabólicas cubiertas de material reflectante que comparten el mismo centro. El tubo absorbedor se sitúa en el centro de estas parábolas, con lo que se logra captar la radiación solar incidente que ingresa al área de apertura del colector dentro del ángulo de aceptación [18].

El diseño de construcción de estos dispositivos permite un mejor aprovechamiento de la radiación solar difusa y disminuye la acción de realizar ajustes de seguimiento continuo [23]. Existen varios modelos que se adaptan para alcanzar mayor eficiencia; un ejemplo muy práctico es acoplar el CPC con tubos de vacío. En aplicaciones industriales los CPC alcanzan temperaturas $< 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ [24]. La Figura 4 muestra una representación esquemática de este colector en donde se observa las dos superficies parabólicas que concentran la radiación solar en el tubo absorbedor

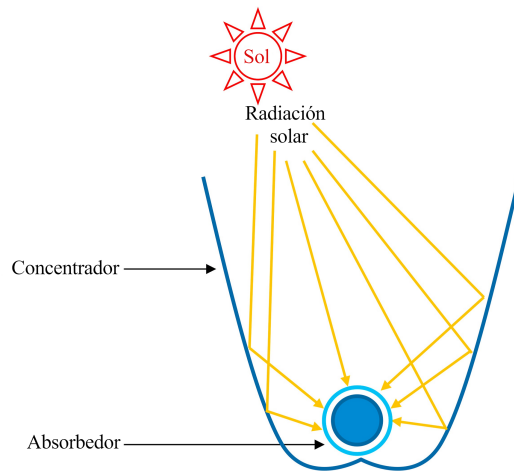


Figura 4. Colector parabólico compuesto [9]

2.2. Colectores de media temperatura

2.2.1. Colector de placa plana evacuado

El colector de placa plana evacuado o *Evacuated flat plate collector* (EFPC) combina el diseño del colector FPC y el principio de vacío del colector ETC. En la Figura 5 se muestra cómo está compuesto un colector de este tipo: una carcasa de aluminio como estructura y varios elementos como una cubierta de vidrio, una placa de absorción, un serpentín de cobre para el intercambio de calor y una placa inferior.

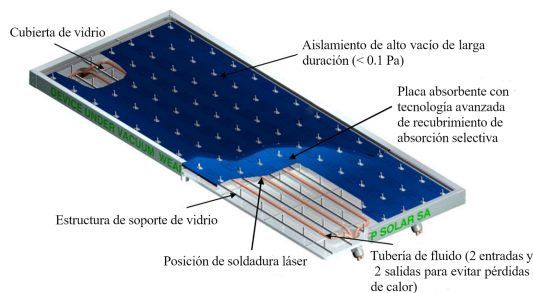


Figura 5. Estructura del colector de placa plana evacuado [25]

El vacío interior permite alcanzar una mayor eficiencia térmica debido a que se eliminan las pérdidas por

conducción y convección; además, este efecto, hace que el colector ocupe menos superficie que el colector ETC. Con esta tecnología se puede alcanzar temperaturas medias entre 120 y $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ para satisfacer demandas de calor industrial [25].

2.2.2. Colector cilindro parabólico

El colector cilindro parabólico o *Parabolic trough collector* (PTC) dispone de una lámina en forma de parábola que refleja la radiación solar directa y la concentra en el tubo receptor ubicado a lo largo de la línea focal. Por lo general, el tubo absorbente de metal es cubierto de un material selectivo (cobre) que mejora la transferencia de calor al interior del tubo por donde circula el fluido caloportador. Este conducto absorbente es aislado al vacío con un tubo de vidrio para disminuir las pérdidas térmicas por convección a pesar de originarse pérdidas ópticas por efecto de la reflexión [18]. Estos colectores deben acoplarse a un sistema de seguimiento para alinearse a la trayectoria del sol durante el día (Figura 6).

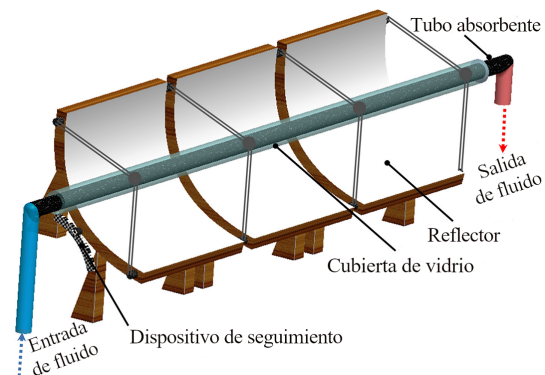


Figura 6. Esquema de un colector cilindro parabólico [21]

La orientación del colector se puede configurar en dirección norte-sur con seguimiento este-oeste para captar mayor energía durante el verano; mientras que, si el objetivo es maximizar la energía en invierno la dirección adecuada del colector debe ser este-oeste con seguimiento norte-sur [26]. Normalmente, en procesos industriales con este tipo de colectores se emplean módulos de concentración solar con un área de captación menor a 250 m^2 y trabajan a una temperatura media por debajo de los $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ [27].

2.2.3. Colector lineal Fresnel

El colector lineal tipo Fresnel o *linear Fresnel collector* (LFC) está compuesto por dos partes principales: un tubo absorbente estacionario por donde circula el fluido caloportador y una serie de espejos reflectores alineados horizontalmente que se acoplan a un sistema de seguimiento uniaxial [18]. El principio de operación del colector ocurre cuando la radiación solar impacta en los espejos reflectores (curvos o planos) y

se direcciona para concentrarse en el tubo absorbente (Figura 7).

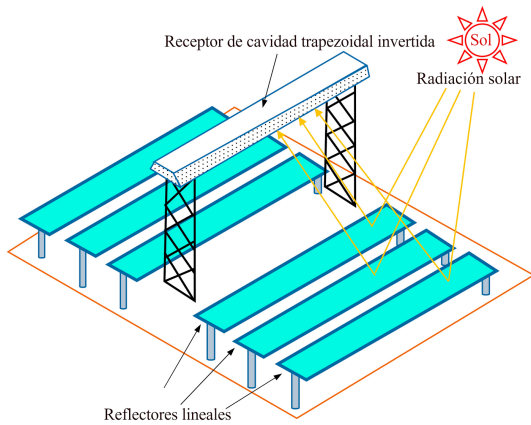


Figura 7. Esquema de un colector lineal Fresnel [9]

Para maximizar la concentración de la energía solar, ciertos diseños optan por instalar un colector CPC sobre la parte superior del receptor o punto focal con el objetivo de redireccionar la radiación solar al tubo absorbente [28]. Una de las ventajas que hacen competitivo al LFC con respecto a un PTC, es su fabricación simple, lo que implica un menor costo de inversión; sin embargo, las limitaciones ópticas y geométricas como el sombreado y bloqueo entre los espejos disminuyen el

grado de eficiencia del colector [27]. En procesos industriales este tipo de colector puede alcanzar intervalos de temperatura media ($60\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 250\text{ }^{\circ}\text{C}$) [29].

Para comparar el comportamiento entre colectores, la ecuación de la eficiencia (η) puede ser empleada.

$$\eta = a_0 - a_1 \frac{(T_m - T_{amb})}{G} - a_2 \frac{(T_m - T_{amb})^2}{G} \quad (1)$$

Se puede observar en la Figura 8 la comparación de eficiencias para varios colectores solares térmicos en función de la Ecuación (1), en donde: T_m corresponde a la temperatura media del fluido calotransportador, T_{amb} es la temperatura ambiente, a_0 es el rendimiento óptico, a_1 es el coeficiente de pérdidas de primer orden, a_2 es el coeficiente de pérdidas de segundo orden y G es la irradiancia global. Para esta comparación, se asume una irradiancia global de 1000 W/m^2 y una temperatura ambiente de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, se observa a través de la Ecuación (1) que los colectores FPC alcanzan una eficiencia elevada para un ΔT bajo, mientras que a medida que esta variable aumenta, su eficiencia disminuye drásticamente. Todo lo contrario, sucede con el resto de los colectores, en donde la eficiencia se reduce a medida que se incrementa el valor de ΔT de una manera no tan drástica. Incluso se observa que el colector PTC mantiene su eficiencia casi constante a medida que el diferencial de temperatura ΔT incrementa.

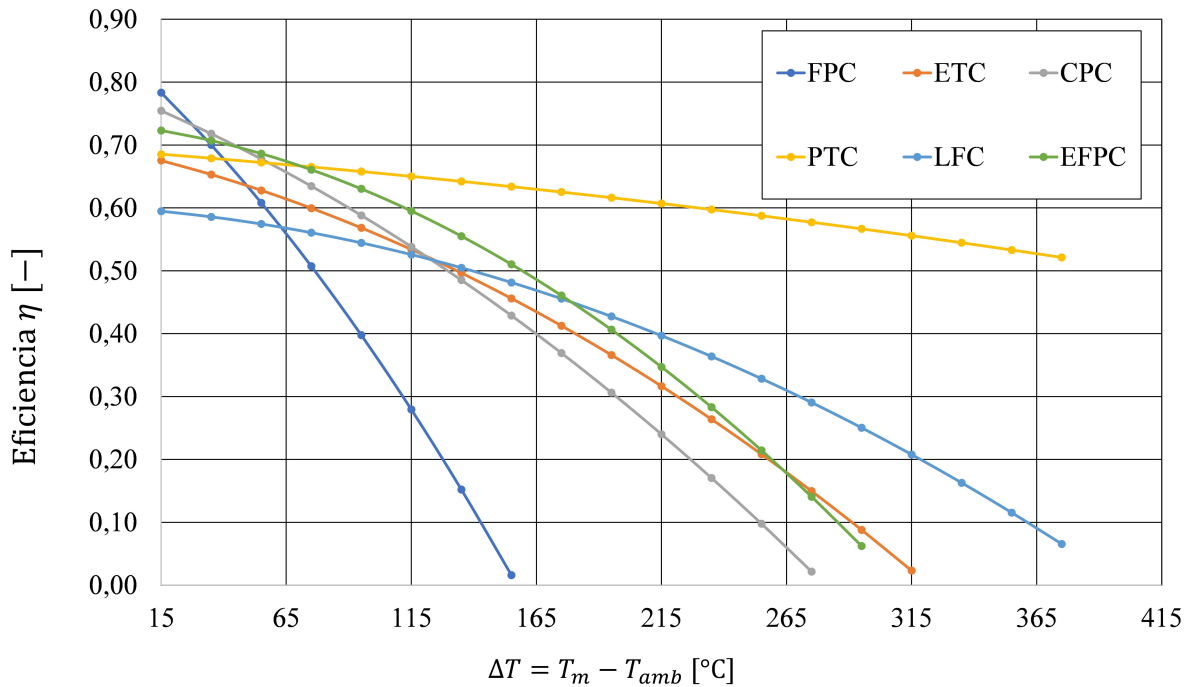


Figura 8. Comparativa entre colectores solares

3. Aplicación de la energía solar térmica en la industria

La energía solar térmica se ha constituido como un componente clave que contribuirá en la descarbonización del sector industrial. A nivel mundial, el consumo de calor en el sector industrial es aproximadamente de 85 EJ, de los cuales el 30 % corresponde a la demanda de calor de baja temperatura [30]. A continuación, se presenta una revisión de casos de estudio, basada en simulación mediante computadora, para aplicaciones industriales.

En Sudáfrica se investigó la viabilidad de integrar FPC como un sistema de generación de calor para el precalentamiento de materia prima en dos empresas de producción de harina de pescado. El estudio demostró que en la fábrica A la rentabilidad de instalación es justificada porque se requiere una demanda mensual de calor relativamente constante y por el elevado costo del fueloil que hacen de este sistema una tecnología solar competitiva. Sin embargo, en la fábrica B instalar un sistema FPC no es factible debido al bajo coste del carbón y a que el perfil de demanda de calor estacional es variable [31]. Un estudio para evaluar el rendimiento de incorporar un sistema de almacenamiento de calor con materiales de cambio de fase junto a colectores FPC en la zona tropical de Mérida-México, reveló que el ácido láurico, por sus características termofísicas, es el PCM más adecuado para obtener una mayor ganancia térmica durante todo el año. Además, el análisis

financiero indicó que el valor máximo de 17,2 % en la tasa interna de retorno se alcanza si el sistema de almacenamiento de calor se acopla con un arreglo de cinco colectores FPC para el proceso de calentamiento de agua en una fábrica de ropa [32].

Por otro lado, Anastasovski [33] analizó el rendimiento de dieciocho soluciones para la integración de calor solar en una industria productora de etanol considerando las tecnologías ETC y PTC, considerando la radiación solar en días típicos durante las estaciones del año. Sus hallazgos muestran que, la solución más atractiva es el diseño con ETC acoplados a un sistema de almacenamiento de calor con agua a presión durante el solsticio de invierno, puesto que permite reemplazar el 35 % del calor requerido y recuperar la inversión en aproximadamente 4,5 años.

En otro estudio, Maillot, Castaing-Lasvignottes y Marc [34] simularon cuatro casos distintos para valorar la integración directa e indirecta de acoplar colectores ETC en el sistema de generación de vapor de una industria productora de yogur. Según la evaluación técnica el mayor ahorro de combustible es del 24 %, que se logra cuando los colectores con un área de captación de 555 m² se integran de manera directa en el tanque de la caldera.

En la Tabla 1 se muestran aspectos técnicos para aplicaciones industriales, existentes y a nivel de simulación, basadas en sistemas térmicos con tecnologías FPC y ETC.

Tabla 1. Aspectos técnicos, económicos y ambientales de la aplicación y simulación de colectores solares con tecnologías FPC y ETC para procesos industriales en diferentes países del mundo

Ubicación	Industria	Temperatura proceso industrial (°C)	Área captación colector (m ²)	Fracción solar (%)	Ahorros	Fuente
Sudáfrica	Producción de harina de pescado- precalentamiento	70	384-FPC	81	32 061 litros de fueloil	[31]
Macedonia	Producción de etanol- calentamiento de agua- preparación de soluciones salinas y melaza	95	n/d-ETC	n/d	aprox. 57 % de fueloil	[33]
Isla Reunión	Yogur-generación de vapor a partir de la integración directa del captador solar en el tanque de la caldera	160-170	555-ETC	n/d	24 % de combustible	[34]
Marruecos	Láctea-calentamiento de agua -secado y limpieza de frutas, enfriamiento y pasteurización	60-90	400-ETC	41	77,23 tCO ₂ e/año	[35]
Etiopía	Textil-calentamiento de agua-teñido	50-90	472-ETC	56,3	252,2 tCO ₂ e/año	[36]

En el caso de los colectores CPC, Milczarek *et al.* [37] experimentaron el secado de orujos de tomate y ciruela con un secador solar térmico de tambor, para lo cual se utilizaron 26 CPC externos con un área captación de 98,3 m² que permitió calentar la superficie del tambor a una temperatura mínima de 92 °C. El resultado final demostró la efectividad de la energía solar térmica para lograr la estabilidad de almacenamiento de estas frutas y verduras. En Argentina, los colectores CPC han mostrado ser una alternativa económica y ambientalmente viable a temperaturas

que oscilan entre 100 y 150 °C debido a que el costo nivelado de energía está entre 2,5 y 16,9 euros por kWh/m². Asimismo, los rangos asociados a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero al sustituir la electricidad y el gas natural por este sistema solar están entre 179 a 348 kgCO₂/m²·año y entre 113 a 220 kgCO₂/m²·año, respectivamente.

En la Tabla 2 se puede observar casos sobre aplicaciones y simulaciones con tecnologías de captación PTC y LFC.

Tabla 2. Aspectos técnicos, económicos y ambientales de la aplicación y simulación de colectores solares con tecnologías PTC y LFC para procesos industriales en diferentes países del mundo

Ubicación	Industria	Temperatura proceso industrial (°C)	Área captación Colector (m ²)	Fracción solar (%)	Ahorros	Fuente
Italia (Molina di Fiemme)	Pasta-calentamiento de agua-secado de pasta	135	840-PTC	23	4,7 tCO ₂ /semana	[11]
Chipre (Limasol)	Refrescos-generación de vapor-limpieza, pasteurización y esterilización	188	288-PTC	n/d	40 €/t de vapor	[38]
Suiza (Saignelégier)	Láctea-calentamiento de agua-limpieza	117	627-PTC	12	69 tCO ₂ /año	[39]
Portugal (Santarém)	Producción de aglomerado de corcho expandido precalentamiento de agua de alimentación de caldera	170	1328-PTC	36,9	76,5 tep y 201,8 tCO ₂ e/GJ	[40]
Marruecos (Rabat)	Asfáltica-calentamiento de betún	160	n/d-PTC	40	0,75-1,5 tCO ₂ /año/kW	[41]
Indonesia	Minera de níquel-generación de vapor para calentar azufre	135-145	n/d-LFC	n/d	45 000 USD/año	[42]
Italia (Sicilia)	Pasta de trigo-agua sobrecalentada-secado de pasta	120-140	6602-LFC	40	n/d	[43]

El estudio mediante la modelación dinámica de un campo solar con colectores PTC, para el calentamiento de agua en el proceso de secado de pasta en una fábrica italiana, evidenció que el diseño de este sistema tiene la capacidad de garantizar el 23 % de la demanda de energía térmica semanal empleada en este proceso [11]. En el trabajo de Ghazouani, Bouya y Benaissa [15] se analizaron los parámetros de diseño y operativos de un PTC pequeño con el fin de maximizar la eficiencia termoeconómica y el rendimiento energético con las condiciones meteorológicas de la ciudad de Rabat; con la mejora de las características técnicas del colector consiguieron proporcionar más de 12,84 MWh/año a un costo competitivo menor a 0,022 USD/kWh con cada dispositivo.

En el caso de la industria láctea, Biencinto *et al.* [44] propusieron un sistema innovador de almacenamiento térmico abastecido por un campo de colectores PTC para contribuir a la demanda de calor a tres niveles diferentes de temperatura en el proceso de pasteurización. Según los resultados de la simulación, el uso de almacenamiento térmico basado en pentaglicerina (PCM) cubriendo un rango de tres horas puede satisfacer la demanda anual de energía entre un 20-27 % y un 40-52 % para las ciudades de Graz-Austria y Almería-España, respectivamente.

Sharma *et al.* [45] en su estudio realizado para la implementación de energía solar térmica en la industria

láctea de la India, determinó que al instalar colectores PTC se puede alcanzar una fracción solar entre 16 y 33 % según la ubicación de cada fábrica. No obstante, el bajo costo de los combustibles fósiles y la incapacidad de los sistemas solares de abastecer la demanda total de calor en los procesos de manufactura, hacen que estas inversiones sean inseguras.

May Tzuc *et al.* [46] realizaron un modelo de optimización con PTC para ser integrados en la industria láctea considerando cuatro tipos diferentes de clima en México. La investigación afirma que estos colectores pueden satisfacer una demanda que varía entre el 40 y 80 % del calor utilizado en la pasteurización. De igual manera, el ahorro anual de emisiones para las cuatro regiones climáticas con la aplicación de esta tecnología renovable oscila entre 39,5 y 95,3 tCO₂.

Cortés *et al.* [47] indicaron que la integración de PTC en la industria alimentaria de Chile resulta técnica y económicamente factible; puesto que, si en la mayoría de las regiones del país el costo de instalación del campo solar fuera menor a 250 USD/m², esta tecnología sería competitiva con los combustibles fósiles.

Ktistis, Agathokleous y Kalogirou [38] demostraron que acoplar colectores PTC con un sistema de almacenamiento de hormigón es viable para ser empleada en una industria de refrescos en Chipre, ya que el costo de producción de vapor para los procesos de limpieza, pasteurización y esterilización de la fábrica con este

sistema solar es de 10 €/t; a diferencia de 50 €/t que es el costo por la generación de vapor cuando se emplea una caldera convencional y un precio de combustible de 700 euros por tonelada.

En cuanto a los colectores LFC, Laadel *et al.* [48] argumentaron que este captador solar acoplado a un sistema de calor es técnicamente apto para integrarse en las industrias marroquíes debido a que pueden alcanzar valores de hasta un 40 % de fracción solar sin incluir almacenamiento térmico. Buscemi *et al.* [43] examinaron la posibilidad de generar calor para el secado de pasta a partir de un campo solar con LFC en una industria italiana. El resultado de la simulación de este sistema solar con almacenamiento de hormigón genera una fracción solar del 40 % y un tiempo de recuperación de la inversión de ocho años.

Existen investigaciones de aplicación de calor solar que están incursionando en otros sectores y operaciones como, por ejemplo, en la industria del asfalto para el calentamiento de betún [41]; en procesos de gestión de aguas industriales y aguas residuales [49] y en la generación de vapor para la industria farmacéutica mediante LFC [50].

En este contexto, el aporte de nuevas investigaciones sobre el ajuste de diseño de los colectores solares ha permitido buscar alternativas que mejoren el rendimiento y reduzcan el costo nivelado de calor de estos sistemas térmicos. Por ejemplo, el diseño innovador de un FPC que posee un solo tubo colector en forma de espiral en comparación con un colector FPC convencional con la misma área y tubos de igual diámetro

y longitud, tiene una mejora en la eficiencia térmica de 21,45 % cuando funciona a un caudal másico de 0,026 kg/s y 1011 W/m²; además, con el diseño espiral del tubo se disminuye la caída de presión del fluido y se puede ahorrar un 30 % del total de materiales de fabricación [51].

Un experimento realizado en Las Vegas-Estados Unidos sobre el diseño de la estructura de soporte de un PTC utilizando madera como material, demostró que el colector puede tener un funcionamiento adecuado durante treinta años si se realiza un monitoreo y mantenimiento continuo de la madera. El análisis económico determinó que la estimación del costo de instalación de este diseño es de 56,14 USD/m² con lo que se reduce significativamente el coste nivelado del calor para el vapor de proceso industrial [52].

4. Proveedores de colectores solares térmicos

Durante el año 2019, de acuerdo con el programa *Solar Payback*, se instalaron 251 MW_t relacionados con sistemas termosolares destinados a la industria a nivel mundial, un valor muy superior a los 39 MW_t instalados en el 2018 [53]. Este programa contabiliza alrededor de 76 proveedores de tecnologías de captación solar en el mundo, siendo la mayoría de ellos productores de sus propios sistemas. En la Tabla 3 se presentan los proveedores que poseen más de diez proyectos instalados bajo la modalidad de «llave en mano» a finales del 2019.

Tabla 3. Proveedores de colectores solares «llave en mano» [53]

Colector	Proveedor/país	Proyectos	Área (m ²)
FPC	Módulo Solar/México	89	15 616
	Inter Solar Systems/India	22	10 400
ETC	Sunrain Solar Energy /China	72	52 970
	Linuo Paradigma/China	47	90 470
	Ritter Energie-und Umwelttechnik/Alemania	29	5165
	Sunda Solar Energy/ China	16	9432
	Himin/China	15	29 627
PTC	Inventive Power/México	66	10 570
	Vicot Solar Technology/China	24	22 560
	Soliterm/Alemania	20	37 069
Plato parabólico	Megawatt Solutions/India	32	16 545
Contrato de suministro de calor	Millennium Energy Industries (MEI)/Jordania	22	3611
	Solid Energy Systems/Austria	15	11 779
n/d	Casolar/México	14	n/d

5. Costos de las tecnologías

Para la integración de un sistema de calor solar en una industria es indispensable considerar la temperatura operativa del colector solar, su costo, los requisitos de operación y mantenimiento, así como otros factores relacionados con el uso del suelo, la variabilidad temporal de producción y el precio de los combustibles [54]. También es necesario conocer que generalmente el costo de los colectores representa entre el 50 y 70 % de la inversión del sistema termosolar [55]. En la Tabla 4 se detalla el costo por área de las diferentes tecnologías de captación solar, no obstante, se debe tener en cuenta que la información proporcionada de los valores económicos de los dispositivos se basa en cifras referenciales de simulaciones y estudios científicos.

Tabla 4. Costos de las diferentes tecnologías de captación solar

Colector	País	Costo (USD/m ²)	Fuente
FPC	México	287 *	[56]
	Chile	330-687	[54]
	Zimbabue	220-347	[57]
ETC	México	472 *	[56]
	Chile	460-817	[54]
	Zimbabue	157-433	[57]
CPC	España	268-387 *	[58]
	Italia	131 *	[11]
PTC	México	402 *	[56]
	España	393-666 *	[58]
	Chile	379-1263	[54]
	Italia	262 *	[11]
LFC	España	309-506 *	[58]
	Italia	199 *	[11]

*Unidades monetarias ajustadas de euros a USD. Se ha empleado 1,19 USD como la equivalencia de 1 EUR considerando el valor de cotización promedio de la moneda en el periodo julio 2020-julio 2021 [59].

6. Ahorro de emisiones de gases de efecto invernadero

En 2018 las emisiones directas de CO₂ provenientes del sector industrial alcanzaron un valor de 8,5 GtCO₂, lo que representa el 24 % de las emisiones globales. El Escenario de Desarrollo Sostenible propuesto por la IEA menciona que para lograr cero emisiones netas hasta 2070, las emisiones de la industria deben reducirse en un 1,2 % anual para alcanzar 7,4 GtCO₂ en 2030 [60]. Las diversas tecnologías de captación solar son una

respuesta para contribuir al logro de este cometido ambiental. Un estudio realizado en China determinó que los diez sectores industriales que integran tecnología de captación solar en sus procesos productivos pueden reducir aproximadamente 98,22 millones de tCO₂ en 2020 [55].

Por otro lado, McMillan *et al.* [61] demostraron que en Estados Unidos los PTC en combinación con un sistema de almacenamiento de calor sensible usando agua o aceite sintético, son la tecnología que puede emplearse para satisfacer la demanda de calor de procesos industriales en gran parte del país; y con su instalación se podría ahorrar anualmente 137 millones de toneladas métricas de CO₂.

En otra investigación, se evidenció que la instalación de sistemas termosolares en varios procesos de la industria textil algodonera en la India se podría reducir entre 2,46 y 7,67 millones tCO₂ anualmente [62]. En Europa, Kylili *et al.* [63] analizaron el potencial de reducción de emisiones asociado con la instalación de sistemas solares térmicos de baja temperatura para calentamiento de agua en las industrias. En su estudio evaluaron el grado de contaminación en función de las fases del ciclo de vida del sistema y llegaron a la conclusión que es posible ahorrar entre 35 y 75 GJ de energía, y entre 2 y 5 tCO₂/kWt dependiendo de la zona geográfica.

7. Desafíos y oportunidades de investigación

Según la literatura revisada existe una tendencia progresiva en el aprovechamiento de la energía solar térmica en diversos procesos industriales, pero la capacidad real instalada es aún pequeña. A continuación, se presentan algunas temáticas que pueden ser abordadas y así fomentar el uso extensivo de la energía solar térmica en la industria.

- Desarrollo de nuevos colectores térmicos y tecnologías de almacenamiento: la investigación de nuevos materiales que mejoren la eficiencia de generación térmica y reduzcan el peso de los colectores. En los sistemas de almacenamiento es imprescindible que se busquen alternativas con mayor eficiencia termodinámica para reducir el impacto de la intermitencia solar [64].
- Adaptabilidad a los procesos industriales: el sector industrial necesita una integración innovadora entre los colectores solares y las tecnologías de proceso que se adapten a los distintos sectores y ubicaciones de la industria [64].
- Inversión en I+D: La actual crisis relacionada con la COVID-19 reducirá la inversión en I+D en el sector privado, por lo que los Gobiernos de las

economías más importantes serán los encargados de promover políticas y apoyo económico que incentiven la I+D en este sector [65].

8. Conclusiones

Hasta 2019 la energía solar térmica incorporada en procesos industriales representó una potencia instalada de 700 MW_t, siendo una alternativa en constante crecimiento dentro de este sector económico.

En el sector industrial, los colectores solares térmicos son empleados principalmente para el calentamiento de agua y generación de vapor. Las empresas de producción de alimentos son las que mayormente han integrado estas tecnologías, debido a que gran parte de sus procesos requieren calor de baja temperatura. No obstante, diversos estudios han evaluado que la energía solar térmica se puede implementar en industrias mineras, textiles, farmacéuticas, entre otras.

Para integrar las tecnologías termosolares en la industria se debe considerar principalmente la demanda de energía térmica del proceso, el perfil de producción, el espacio disponible, la ubicación geográfica, el tipo y el coste del colector.

Se ha visto que los principales obstáculos que impiden la expansión de las tecnologías solares térmicas en el mercado industrial son el bajo costo de los combustibles fósiles, sistemas económicos de almacenamiento térmico aún en investigaciones y política energética ineficiente o inexistente.

Referencias

- [1] B. Koçak, A. I. Fernández, and H. Paksoy, "Review on sensible thermal energy storage for industrial solar applications and sustainability aspects," *Solar Energy*, vol. 209, pp. 135–169, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.081>
- [2] IEA. (2020) World energy balances: Overview. [Online]. Available: <https://bit.ly/3jEw90a>
- [3] S. H. Farjana, N. Huda, M. A. P. Mahmud, and R. Saidur, "Solar industrial process heating systems in operation - current ship plants and future prospects in Australia," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 91, pp. 409–419, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.105>
- [4] V. Pranesh, R. Velraj, S. Christopher, and V. Kumaresan, "A 50 year review of basic and applied research in compound parabolic concentrating solar thermal collector for domestic and industrial applications," *Solar Energy*, vol. 187, pp. 293–340, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.056>
- [5] S. H. Farjana, N. Huda, M. P. Mahmud, and R. Saidur, "Solar process heat in industrial systems - a global review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 2270–2286, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.065>
- [6] S. K. Verma, N. K. Gupta, and D. Rakshit, "A comprehensive analysis on advances in application of solar collectors considering design, process and working fluid parameters for solar to thermal conversion," *Solar Energy*, vol. 208, pp. 1114–1150, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.042>
- [7] C. A. Schoeneberger, C. A. McMillan, P. Kurup, S. Akar, R. Margolis, and E. Masanet, "Solar for industrial process heat: A review of technologies, analysis approaches, and potential applications in the united states," *Energy*, vol. 206, p. 118083, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118083>
- [8] W. Weiss and M. Spörk-Dür, *Solar Heat Worldwide*. IEA Solar Heating & Cooling Programme, Austria, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2WT0yPM>
- [9] K. Ravi Kumar, N. V. V. Krishna Chaitanya, and N. Sendhil Kumar, "Solar thermal energy technologies and its applications for process heating and power generation - a review," *Journal of Cleaner Production*, vol. 282, p. 125296, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125296>
- [10] IEA. (2017) Renewable energy for industry. [Online]. Available: <https://bit.ly/3BGLYty>
- [11] M. Bolognese, D. Viesi, R. Bartali, and L. Crema, "Modeling study for low-carbon industrial processes integrating solar thermal technologies. a case study in the Italian Alps: The Felicetti pasta factory," *Solar Energy*, vol. 208, pp. 548–558, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.07.091>
- [12] A. Shahsavari and M. Akbari, "Potential of solar energy in developing countries for reducing energy-related emissions," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 90, pp. 275–291, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.065>
- [13] A. Gautam and R. Saini, "A review on sensible heat based packed bed solar thermal energy storage system for low temperature applications," *Solar Energy*, vol. 207, pp. 937–956, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.07.027>

- [14] L. Evangelisti, R. De Lieto Vollaro, and F. Asdrubali, "Latest advances on solar thermal collectors: A comprehensive review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 114, p. 109318, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109318>
- [15] M. Ghazouani, M. Bouya, and M. Benaissa, "Thermo-economic and exergy analysis and optimization of small PTC collectors for solar heat integration in industrial processes," *Renewable Energy*, vol. 152, pp. 984–998, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.109>
- [16] M. Imtiaz Hussain, C. Ménézo, and J.-T. Kim, "Advances in solar thermal harvesting technology based on surface solar absorption collectors: A review," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 187, pp. 123–139, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.07.027>
- [17] M. P. Islam and T. Morimoto, "Advances in low to medium temperature non-concentrating solar thermal technology," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 2066–2093, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.030>
- [18] G. Barone, A. Buonomano, C. Forzano, and A. Palombo, "Chapter 6 - solar thermal collectors," in *Solar Hydrogen Production*, F. Calise, M. D. D'Accadia, M. Santarelli, A. Lanzini, and D. Ferrero, Eds. Academic Press, 2019, pp. 151–178. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814853-2.00006-0>
- [19] A. Veera Kumar, T. Arjunan, D. Seenivasan, R. Venkatramanan, and S. Vijayan, "Thermal performance of an evacuated tube solar collector with inserted baffles for air heating applications," *Solar Energy*, vol. 215, pp. 131–143, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.12.037>
- [20] M. Aramesh and B. Shabani, "On the integration of phase change materials with evacuated tube solar thermal collectors," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 132, p. 110135, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110135>
- [21] S. Suman, M. K. Khan, and M. Pathak, "Performance enhancement of solar collectors - a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 49, pp. 192–210, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.087>
- [22] A. Shafieian, M. Khiadani, and A. Nosrati, "A review of latest developments, progress, and applications of heat pipe solar collectors," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 95, pp. 273–304, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.014>
- [23] S. A. Waghmare and N. P. Gulhane, "Design configurations and possibilities of reflector shape for solar compound parabolic collector by ray tracing simulation," *Optik*, vol. 176, pp. 315–323, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.09.082>
- [24] C. Jiang, L. Yu, S. Yang, K. Li, J. Wang, P. D. Lund, and Y. Zhang, "A review of the compound parabolic concentrator (cpc) with a tubular absorber," *Energies*, vol. 13, no. 3, p. 695, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en13030695>
- [25] D. Gao, G. Gao, J. Cao, S. Zhong, X. Ren, Y. N. Dabwan, M. Hu, D. Jiao, T. H. Kwan, and G. Pei, "Experimental and numerical analysis of an efficiently optimized evacuated flat plate solar collector under medium temperature," *Applied Energy*, vol. 269, p. 115129, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115129>
- [26] L. Kumar, M. Hasanuzzaman, and N. Rahim, "Global advancement of solar thermal energy technologies for industrial process heat and its future prospects: A review," *Energy Conversion and Management*, vol. 195, pp. 885–908, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.05.081>
- [27] E. Zarza-Moya, "7 - concentrating solar thermal power," in *A Comprehensive Guide to Solar Energy Systems*, T. M. Letcher and V. M. Fthenakis, Eds. Academic Press, 2018, pp. 127–148. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811479-7.00007-5>
- [28] O. A. López-Núñez, J. A. Alfaro-Ayala, O. Jaramillo, J. Ramírez-Minguela, J. C. Castro, C. E. Damián-Ascencio, and S. Cano-Andrade, "A numerical analysis of the energy and entropy generation rate in a linear Fresnel reflector using computational fluid dynamics," *Renewable Energy*, vol. 146, pp. 1083–1100, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.144>
- [29] D. Sakthivadivel, K. Balaji, D. Dsilva Winfred Rufuss, S. Iniyan, and L. Suganthi, "Chapter 1 - solar energy technologies: principles and applications," in *Renewable-Energy-Driven Future*, J. Ren, Ed. Academic Press, 2021, pp. 3–42. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820539-6.00001-7>

- [30] Solar Payback, *Calor solar para la industria*. Solar Payback. [Online]. Available: <https://bit.ly/3jJE10l>
- [31] D. Oosthuizen, N. J. Goosen, and S. Hess, "Solar thermal process heat in fishmeal production: Prospects for two South African fishmeal factories," *Journal of Cleaner Production*, vol. 253, p. 119818, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119818>
- [32] A. Cetina-Quiñones, J. Xamán, A. Bassam, M. Escalante Soberanis, and I. Pérez-Quintana, "Thermo-economic analysis of a flat solar collector with a phase changing material under tropical climate conditions: Residential and industrial case," *Applied Thermal Engineering*, vol. 182, p. 116082, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116082>
- [33] A. Anastasovski, "Improvement of energy efficiency in ethanol production supported with solar thermal energy – a case study," *Journal of Cleaner Production*, vol. 278, p. 123476, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123476>
- [34] C. Maillot, J. Castaing-Lasvignottes, and O. Marc, "Modelling and dynamic simulation of solar heat integration into a manufacturing process in reunion island," *Procedia Manufacturing*, vol. 35, pp. 118–123, 2019, the 2nd International Conference on Sustainable Materials Processing and Manufacturing, SMPM 2019, 8-10 March 2019, Sun City, South Africa. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.05.013>
- [35] A. Allouhi, Y. Agrouaz, M. Benzakour Amine, S. Rehman, M. Buker, T. Kousksou, A. Jamil, and A. Benbassou, "Design optimization of a multi-temperature solar thermal heating system for an industrial process," *Applied Energy*, vol. 206, pp. 382–392, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.196>
- [36] F. B. Tilahun, R. Bhandari, and M. Mamo, "Design optimization and control approach for a solar-augmented industrial heating," *Energy*, vol. 179, pp. 186–198, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.142>
- [37] R. R. Milczarek, J. J. Ferry, F. S. Alleyne, C. W. Olsen, D. A. Olson, and R. Winston, "Solar thermal drum drying performance of prune and tomato pomaces," *Food and Bioproducts Processing*, vol. 106, pp. 53–64, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2017.08.009>
- [38] P. K. Ktistis, R. A. Agathokleous, and S. A. Kalogirou, "Experimental performance of a parabolic trough collector system for an industrial process heat application," *Energy*, vol. 215, p. 119288, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119288>
- [39] M. H. Rittmann-Frank, J. Möllenkamp, M. Caflisch, and A. Häberle, "Evaluation of solar process heat systems in Switzerland," *AIP Conference Proceedings*, vol. 2033, no. 1, p. 150005, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.5067158>
- [40] A. Castro, J. a. P. Cardoso, L. F. Mendes, P. Azevedo, and J. a. F. Mendes, "Pre-heating boiler feedwater for expanded cork agglomerate production using a parabolic trough system," *AIP Conference Proceedings*, vol. 2033, no. 1, p. 150002, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.5067155>
- [41] M. Ghazouani, M. Bouya, M. Benaissa, K. Anoune, and M. Ghazi, "Thermal energy management optimization of solar thermal energy system based on small parabolic trough collectors for bitumen maintaining on heat process," *Solar Energy*, vol. 211, pp. 1403–1421, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.10.074>
- [42] Suyanto, R. Hantoro, A. Suharto, R. Saleh, and T. D. Reynaldi, "A review of linear Fresnel reflector technology for heating sulphur liquid in nickel processing industry," *AIP Conference Proceedings*, vol. 2088, no. 1, p. 020034, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.509528>
- [43] A. Buscemi, D. Panno, G. Ciulla, M. Beccali, and V. Lo Brano, "Concrete thermal energy storage for linear Fresnel collectors: Exploiting the south mediterranean's solar potential for agri-food processes," *Energy Conversion and Management*, vol. 166, pp. 719–734, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.04.075>
- [44] M. Biencinto, R. Bayón, L. González, R. Christodoulaki, and E. Rojas, "Integration of a parabolic-trough solar field with solid-solid latent storage in an industrial process with different temperature levels," *Applied Thermal Engineering*, vol. 184, p. 116263, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116263>
- [45] A. K. Sharma, C. Sharma, S. C. Mullick, and T. C. Kandpal, "Financial viability of solar industrial process heating and cost of carbon mitigation: A case of dairy industry in India," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 27, pp. 1–8, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.03.007>

- [46] O. May Tzuc, A. Bassam, L. J. Ricalde, O. Jaramillo, M. Flota-Bañuelos, and M. Escalante Soberanis, "Environmental-economic optimization for implementation of parabolic collectors in the industrial process heat generation: Case study of Mexico," *Journal of Cleaner Production*, vol. 242, p. 118538, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118538>
- [47] F. Cortés, M. Ibarra, F. Moser, I. Muñoz, A. Crespo, and C. Murray, "Techno-economical evaluation of parabolic trough collectors systems for steam processes in the Chilean industry," *AIP Conference Proceedings*, vol. 2033, no. 1, p. 150003, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.5067156>
- [48] N. E. Laadel, H. Agalit, A. Mouaky, and E. G. Bennouna, "Potential of solar heat integration in medium temperature industrial processes in Morocco," *AIP Conference Proceedings*, vol. 2126, no. 1, p. 150005, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.5117661>
- [49] C. Brunner, B. Muster-Slawitsch, A. Grubbauer, J. Koschikowski, I. Oller, C. Sattler, K. Hennecke, D. Krüger, M. Duke, and C. Ozansoy, *Solar Energy in Industrial Water and Wastewater management*. IEA Solar Heating & Cooling Programme, 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/3BNw9kH>
- [50] A. Frein, M. Motta, M. Berger, and C. Zahler, "Solar DSG plant for pharmaceutical industry in Jordan: Modelling, monitoring and optimization," *Solar Energy*, vol. 173, pp. 362–376, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.07.072>
- [51] S. K. Verma, K. Sharma, N. K. Gupta, P. Soni, and N. Upadhyay, "Performance comparison of innovative spiral shaped solar collector design with conventional flat plate solar collector," *Energy*, vol. 194, p. 116853, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116853>
- [52] N. R. Peralta and P. Gleckman, "The engineering design of a high-performance parabolic trough collector using lumber for the support structure," *Solar Energy*, vol. 191, pp. 382–399, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.08.038>
- [53] Solar Payback. (2019) Mapa mundial de proveedores ship. [Online]. Available: <https://bit.ly/3zRXZvJ>
- [54] G. Quiñones, C. Felbol, C. Valenzuela, J. M. Cardemil, and R. A. Escobar, "Analyzing the potential for solar thermal energy utilization in the Chilean copper mining industry," *Solar Energy*, vol. 197, pp. 292–310, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.01.009>
- [55] T. Jia, J. Huang, R. Li, P. He, and Y. Dai, "Status and prospect of solar heat for industrial processes in China," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 90, pp. 475–489, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.077>
- [56] H. Ortega, *Energía solar térmica para procesos industriales en México. Estudio base de mercado*. Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), Asociación Nacional de Energía Solar (ANES), Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/3l0qa5o>
- [57] T. Hove, "A thermo-economic model for aiding solar collector choice and optimal sizing for a solar water heating system," in *Africa-EU Renewable Energy Research and Innovation Symposium 2018 (RERIS 2018)*, M. Mpholo, D. Steuerwald, and T. Kukeera, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 1–19. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-319-93438-9_1
- [58] I. Lillo-Bravo, E. Pérez-Aparicio, N. Sancho-Caparrini, and M. A. Silva-Pérez, "Benefits of medium temperature solar concentration technologies as thermal energy source of industrial processes in Spain," *Energies*, vol. 11, no. 11, p. 2950, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en11112950>
- [59] BCE. (2021) Consulta por monedas extranjeras. Banco Central del Ecuador. [Online]. Available: <https://bit.ly/3h9OS2a>
- [60] IEA. (2020) Tracking industry 2020. International Energy Agency, Paris. [Online]. Available: <https://bit.ly/3neCjpU>
- [61] C. McMillan, C. Schoeneberger, J. Zhang, P. Kurup, E. Masanet, R. Margolis, S. Meyers, M. Bannister, E. Rosenlieb, and W. Xi, *Opportunities for Solar Industrial Process Heat in the United States*. National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-6A20-77760, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3zYSsDG>
- [62] A. K. Sharma, C. Sharma, S. C. Mullick, and T. C. Kandpal, "Ghg mitigation potential of solar industrial process heating in producing cotton based textiles in india," *Journal of Cleaner Production*, vol. 145, pp. 74–84, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.161>
- [63] A. Kylili, P. A. Fokaides, A. Ioannides, and S. Kalogirou, "Environmental assessment

- of solar thermal systems for the industrial sector,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 176, pp. 99–109, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.150>
- [64] C. Brunner, B. Muster-Slawitsch, S. Meitz, and E. Frank, *Solar Heat Integrations in Industrial Processes*. IEA Solar Heating and Cooling Technology Collaboration Programme, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3BNG8qb>
- [65] IEA, *Energy Technology Perspectives 2020*. International Energy Agency, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3tqcep8>



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN CON ASISTENCIA LÁSER PARA LA UNIÓN DE EJES DE ACERO AISI 1045 Y ALUMINIO 2017-T4

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A FRICTION WELDING EQUIPMENT WITH LASER ASSISTANCE FOR THE JOINT OF AISI 1045 STEEL AND ALUMINUM 2017-T4 SHAFTS

José Luis Mullo^{1,2} , Jorge Andrés Ramos-Grez^{1,3} ,

Germán Omar Barrionuevo^{1,*}

Recibido: 17-04-2021, Recibido tras revisión: 12-08-2021, Aceptado: 02-09-2021, Publicado: 01-01-2022

Resumen

La soldadura de materiales disímiles hace que los procesos de soldadura convencional no sean factibles de ser utilizados. La soldadura por fricción, por otro lado, ha demostrado ser una tecnología prometedora capaz de unir materiales sin que la temperatura supere su punto de fusión. Sin embargo, la obtención de las propiedades mecánicas de la junta soldada con características similares a los materiales base sigue siendo un desafío. En el desarrollo de este trabajo se diseñó y fabricó un equipo de soldadura por fricción rotatoria con asistencia láser. Para proporcionar el movimiento rotatorio se empleó un torno convencional de 3 HP de potencia y para generar fricción se diseñó un sistema hidráulico de presión el cual aplica fuerza axial mediante un cilindro de simple efecto para obtener la unión entre los materiales base.

Abstract

Welding metal alloys with dissimilar melting points make conventional welding processes unfeasible to be used. On the other hand, friction welding has proven to be a promising technology capable of joining materials, while preventing the temperature from exceeding the melting point. However, obtaining a welded joint with mechanical properties that are similar to the base materials remains a challenge. In the development of this work, a laser-assisted rotary friction welding equipment was designed and manufactured. A 3 HP conventional lathe was used to provide rotary movement, and a hydraulic pressure system that applies axial force through a simple effect cylinder was designed to generate friction to obtain the union between the base materials.

^{1,*}Departamento de Ingeniería Mecánica y Metalúrgica, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Av. Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, Chile. Autor para correspondencia ✉: gobarrionuevo@uc.cl

²Carrera de Tecnología Superior en Mecánica Automotriz, Instituto Superior Tecnológico Ciudad de Valencia (ISTCV), Quevedo, Ecuador

³Centro de Investigación en Nanotecnología y Materiales Avanzados (CIEN-UC), Av. Vicuña Mackenna, 4860, Macul, Santiago, Chile.

Forma sugerida de citación: Mullo, J. L.; Ramos-Grez, J. A. y Barrionuevo, G. O. "Diseño y construcción de un equipo de soldadura por fricción con asistencia láser para la unión de ejes de acero AISI 1045 y aluminio 2017-T4," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 27, pp. 74-84, 2022. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n27.2022.07>.

En el equipo implementado se realizaron uniones de ejes de acero AISI 1045 con aluminio 2017-T6; las uniones soldadas se evaluaron metalúrgicamente, haciendo hincapié en la composición química en la interfaz de la soldadura. Para la caracterización de la microestructura se empleó microscopía electrónica de barrido (SEM), espectroscopía de dispersión de energía (EDS) y espectrometría de emisión óptica de descarga luminiscente (GDOES) para medir la composición inicial de los materiales que se soldaron. Los resultados obtenidos muestran una adecuada unión entre los materiales base, denotando la utilidad del equipo fabricado para la unión de materiales disímiles.

Palabras clave: acero, aluminio, láser, materiales disímiles, microestructura, soldadura por fricción

In the implemented equipment, joints of AISI 1045 steel and 2017-T6 aluminum shafts were made. The welded joints were metallurgically evaluated, emphasizing on the chemical composition at the weld interface. For microstructure characterization, scanning electron microscopy (SEM), energy dispersion spectroscopy (EDS), and glow discharge optical emission spectrometry (GDOES) were used to measure the initial composition of the welded materials. The results obtained show an adequate joint between the base materials, denoting the usefulness of the equipment manufactured for the union of dissimilar materials.

Keywords: Steel, Aluminum, Laser, Dissimilar materials, Microstructure, Friction welding

1. Introducción

Los procesos de unión de metales se constituyen en una necesidad esencial para diversas industrias relacionadas con la metalurgia y soldadura. Dependiendo del sector, la adecuada selección de materiales y procedimientos, junto con las normas de seguridad y calidad, son aspectos esenciales en la industria ingenieril [1]. En el instante que se requiere de la unión de materiales con características distintas, la soldadura convencional por fusión no es factible debido a sus limitaciones metalúrgicas. En la actualidad, los procesos convencionales no son suficientes debido a la diferencia entre sus puntos de fusión que generan compuestos intermetálicos de características frágiles y nada beneficiosos a la junta soldada [2]. En función de esta problemática, la soldadura de estado sólido ha sido un proceso de unión prometedor; en el cual, dos piezas de trabajo se unen bajo presión, generando calor por fricción a temperaturas inferiores al punto de fusión de los materiales base [3]. Dicha soldadura por fricción (FW) ha sido un método alternativo de unión por estado sólido, puesto que produce una coalescencia de materiales bajo una fuerza de compresión entre dos piezas de trabajo que giran o se mueven en contacto produciendo calor y desplazando plásticamente el material hasta crear una interfaz de contacto [4]. El metal de aporte, el fundente y el gas de protección no son necesarios en este proceso, debido a su simplicidad. El proceso enunciado sobre la base de estudios académicos, lo ha ubicado entre uno de los mejores para la producción en serie de unión en materiales disímiles [5]. Por esta razón, el proceso FW es utilizado en la industria automotriz, aeronáutica, petrolera, eléctrica, entre otras.

Debido a que las uniones de aceros con otros materiales en los procesos de soldadura por fricción pueden tener propagaciones de fases inesperadas, corrosión del límite de grano o generación de fases de ferrita delta y sigma en la interfaz de soldadura. Se ha considerado ciertas precauciones, como determinar las variables respecto a tratamientos térmicos, incrementar la velocidad de soldadura, ya que de esta manera se logrará una cierta homogeneidad en la distribución de temperatura en los dos componentes [6]. Bajo este contexto, la obtención de uniones soldadas con adecuadas propiedades mecánicas y metalúrgicas aportaría al interés creciente en una amplia gama de aplicaciones industriales. La fabricación de componentes en la industria del transporte y aeronáutica, requieren de elementos cilíndricos soldados con buenas propiedades mecánicas, bajo peso específico y buena resistencia a la corrosión. Concretamente, la introducción de piezas de acero y aluminio en sistemas rotatorios y en estructuras de acero requieren del desarrollo de procesos de unión fiables, eficientes y económicos. A través de la aplicación de un haz láser se podría optimizar la calidad de soldadura en un proceso FW convencional. Li, Yu, Li, Zhang y Wang [7]

mencionan que, durante el proceso FW convencional, la generación de calor está determinada principalmente por la velocidad de rotación, la presión de fricción y el tiempo de fricción. Así, la energía de calentamiento es muy limitada, especialmente para la soldadura de ejes delgados.

La junta de soldadura del proceso de soldadura por fricción rotatoria es la parte más importante y que se debe analizar, misma que se caracteriza por una estrecha zona afectada por el calor ZAC, la presencia de material plásticamente deformado alrededor de la soldadura (flash) y la ausencia de una zona de fusión. Taban, Gould y Lippold [8] realizaron uniones entre ejes de una aleación de aluminio 6061-T6 y un acero AISI 1018, utilizando velocidades de rotación de hasta 4200 rpm, presión de fricción de 23 MPa, tiempo de fricción de 1 s, tiempos de forja de 5 s y presión de forja de 60 MPa. Los resultados mostraron una resistencia a la tracción de 250 MPa con fallas en la zona plastificada debido a la existencia de una interfaz con compuesto intermetálico Al-Fe, con un espesor de 250 nm relacionado con las fases Fe_2Al_5 que se forman a temperaturas superiores a 1200 °C [9]. Handa y Chawla [10] adaptaron un torno convencional con un sistema de presión y frenado para crear una máquina de RFW. Los autores encontraron que la resistencia máxima a la tracción y la resistencia al impacto son aceptables a una velocidad de rotación de 1250 rpm con una presión axial de 120 MPa, para juntas soldadas de acero AISI 1021 de 20 mm de diámetro. Luo *et al.* [11], por su parte, desarrollaron un método de unión entre un amortiguador y su vástago, con la finalidad de reducir las rebabas de soldadura. De esta manera, determinaron que, con una adecuada selección de los parámetros, el proceso de soldadura por fricción es muy eficaz para este tipo de aplicaciones, a diferencia de los métodos convencionales ya que la microestructura obtenida presenta granos más uniformes en ausencia de cambio de fase, lo que no sucede con los procesos de soldadura por fusión.

Las principales ventajas del proceso CDFW son el ahorro de material, el bajo tiempo de producción y la posibilidad de soldar materiales disímiles. En la actualidad se utiliza para la fabricación de elementos de la industria automotriz como válvulas, engranajes, semiejes, ejes del ventilador turbo, conexiones, pistones, etc. Para elaborar dichos elementos se emplean aleaciones ferrosas y no ferrosas [12]. Debido a su versatilidad, la soldadura por fricción tiene un uso industrial generalizado como un proceso de producción en masa para la unión de materiales [5]. Sin embargo, para realizar uniones disímiles, el proceso FW requiere de métodos alternativos de precalentamiento con la finalidad de brindar mejores propiedades en los materiales soldados. Por tal motivo, en el desarrollo del presente trabajo, se construyó un equipo de soldadura por fricción rotatoria donde, además, se aplica un pre-

calentamiento mediante láser para acelerar el proceso y mejorar el acople entre los materiales base.

Para este experimento, el principio de funcionamiento se ilustra en la Figura 1, que describe las etapas del experimento mediante una asistencia láser en su etapa de diseño. En el desarrollo realizado, ω representa la velocidad de rotación en el extremo izquierdo, F_1 la fuerza de fricción y F_2 la fuerza de forja. Para esta configuración un haz de láser actúa sobre uno de los materiales, aumentando su temperatura antes de que comience el proceso de soldadura por fricción rotatoria (RFW).

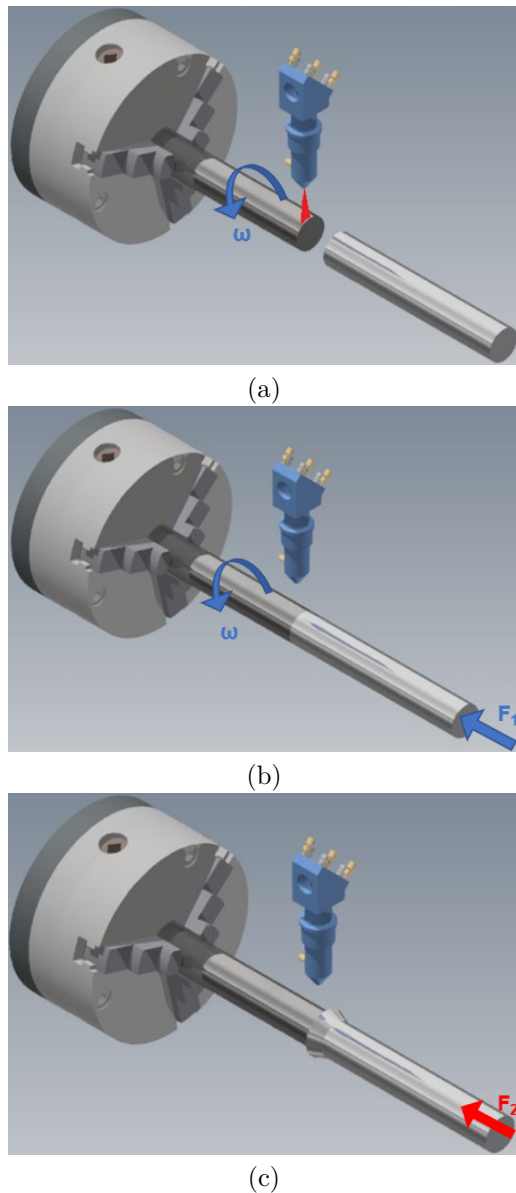


Figura 1. Etapas del proceso de soldadura por fricción con asistencia láser. a) Rotación del eje de acero y accionamiento del láser. b) Fin de la aplicación láser e inicio del proceso de fricción mediante la aplicación de la fuerza F_1 . c) Suspensión de la rotación y aplicación de la fuerza axial de forja [13]

2. Materiales y métodos

Para el proceso de diseño se realizó una profunda revisión de literatura donde se identificaron las publicaciones que presentan soldadura por fricción rotatoria conocida como *Continuous drive friction welding* (soldadura de fricción por accionamiento directo) [14–19]. En este proceso se identifican dos mecanismos esenciales: uno de rotación y otro de presión. Para dar movimiento al eje se ha seleccionado un torno convencional de 3 HP de potencia, 2000 rpm de velocidad de rotación y una distancia entre centros de 1000 mm. Mientras que para el sistema fricción y forja se diseñó un sistema de presión operado hidráulicamente que permite realizar juntas de fricción a varios niveles de presión. El mecanismo de presión consta de un cilindro hidráulico de cinco toneladas de capacidad, impulsado por una bomba hidráulica de 300 cc. El mecanismo de presión también cuenta con un manómetro que permite visualizar las presiones de fricción y forja.

Para el diseño del mecanismo de presión (Figura 2) se acopló un contrapunto de presión al torno, el diseño se realizó en el *software* de diseño 3D Autodesk Inventor. Se utilizaron materiales de acuerdo con el grado de esfuerzo a soportar en el proceso de soldadura. La estructura del dispositivo está construida en acero AISI 1020 y para las partes que requieren un mayor esfuerzo como la boquilla de ajuste, el bloque amortiguador de vibraciones y la brida de sujeción se utilizaron aceros AISI 1045 y AISI 4120, respectivamente.

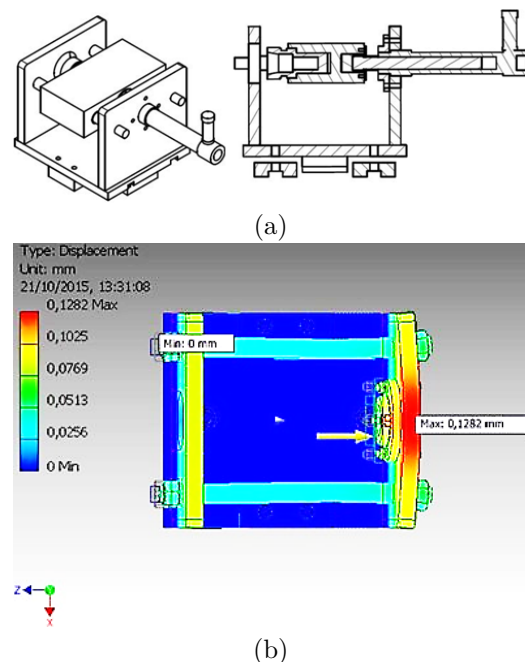


Figura 2. Diseño del sistema de sistema de presión hidráulico, a) Diseño asistido por computador, b) simulación del desplazamiento máximo

La Figura 2a muestra el contrapunto diseñado. Utilizando ingeniería asistida por computador (CAE), las partes del sistema se sometieron a una fuerza de 1000 kg para verificar el esfuerzo máximo y su deformación en los ejes. En la Figura 2b se puede observar la máxima deformación sobre el eje X, con un valor de 0,1282 mm, lo cual es aceptable para que las uniones de soldadura sean concéntricas y de calidad.

Para el diseño hidráulico se consideró que la máxima fuerza entre probetas es de 1000 kg de acuerdo con la investigación de [20]. La fuerza establecida, permitirá realizar soldaduras en ejes de acero o aluminio con diámetros de hasta 20 mm de diámetro. Para determinar la presión hidráulica se realizó una prueba experimental utilizando la máquina universal de ensayos por compresión. Al aplicar presión el pistón hidráulico y medir la fuerza máxima alcanzada se obtiene un valor de presión que permite establecer las capacidades del sistema. Para cada valor de presión en el cilindro se presenta una Tabla 1 de análisis de las presiones.

Tabla 1. Presiones de prueba

Presión del cilindro (MPa)	Fuerza aplicada (kg)	Desplazamiento (mm)
25,4	254	0,93
52	520	1,27
100	1000	1,79
149,9	1499	2,21
200,4	2004	2,62
624,4	6244	5.17

Como fuente de calor se empleó un equipo láser de CO₂ (Oerlikon OPL3500) de 3,5 kW de potencia, que dispone de una longitud de onda de 10,6 μm y TEM00 (Figura 3). Mediante el cual se aplica un precalentamiento para que la unión entre los materiales base sea más eficiente de acuerdo con los resultados reportados en la literatura [21–27].

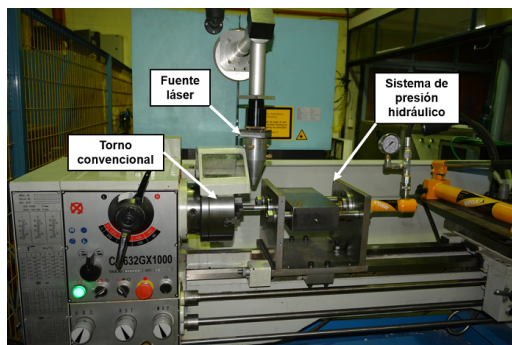


Figura 3. Equipo de soldadura por fricción con asistencia láser (LAFW)

El proceso de soldadura por fricción se realizó sobre ejes de acero AISI 1045 y ejes de aluminio 2017-T4 de 15 mm de diámetro y 180 mm de longitud cada uno. Las composiciones químicas nominales de los materiales base se informan en la Tabla 2. Las propiedades mecánicas de los materiales base se presentan en la Tabla 3.

Tabla 2. Composición química de los materiales base

Material	Elementos (wt %)			
AISI 1045	Fe	C	Mn	Si
	98.41	0.40	0.72	0.22
	Cu	Al	P	S
	0.13	0.02	0.01	0.01
AA 2017	Al	Cu	Mg	Mn
	92.92	4.25	1.58	0.84
	Fe	Zn	Cr	Si
	0.34	0.04	0.01	0.002

Tabla 3. Propiedades mecánicas de los materiales base

Material	Esfuerzo a la rotura (MPa)	Esfuerzo a la fluencia (MPa)	Dureza (HV)
AISI 1045	617-680	330-392	260-330
AA 2017	370-420	215-260	105-120

El proceso de unión consiste en precalentar el eje de acero durante 40 segundos; el proceso de fricción se inicia hasta que se alcanza la velocidad de rotación entre 1600 y 1800 rpm, luego se aplica la presión de fricción axial (14/21 MPa) mediante el mecanismo hidráulico hasta lograr la forja durante 60 segundos. Finalmente, se aplicó la presión de forjado (42,1 MPa) durante 40 segundos. Estos valores de parámetros constantes se eligieron después de varios ensayos previos, en los que se encontró que eran los valores óptimos con respecto a la capacidad del hardware utilizado (Figura 4).

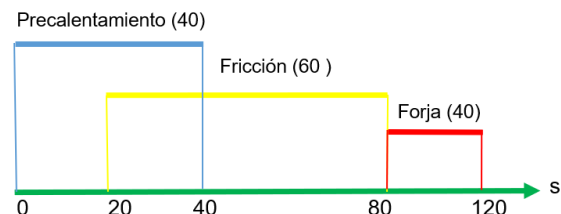


Figura 4. Parámetros del proceso de soldadura

Donde, para el tiempo de precalentamiento láser la presión, $P = 0$ MPa. Posteriormente para el tiempo de fricción, la presión de fricción $P_f = 14$ y 21 MPa. Finalmente, en el tiempo de forja se incrementa la presión de forja a $P_u = 42,1$ MPa.

Para la evaluación macro y microestructural se analizaron 12 probetas obtenidas con el proceso de soldadura con asistencia láser. Las secciones transversales de las uniones soldadas fueron sometidas a una preparación metalográfica de pulido grueso con lijas de 200, 400, 600, 800 hasta la lija de grano 1000 acorde la norma ASTM E407. Se aplicó un pulido fino con alúmina de $0,04\text{ }\mu\text{m}$ de diámetro promedio de grano y un abrasivo de pasta de diamante de $0,01\text{ }\mu\text{m}$ de diámetro para evitar relieves en la superficie de la muestra. El equipo que se utilizó para observar la microestructura es un microscopio marca MEIJI modelo IM 7200 con una amplificación de hasta 100x, 500x y 1000x.

Con la finalidad de visualizar las fases presentes y el tamaño del grano se realizó el ataque químico en el acero mediante inmersión por 10 segundos en una solución de Nital (alcohol al 95 % y ácido nítrico HNO_3 en 5 ml). Para el componente aluminio se impregnó por 15 segundos un cotonete con una solución de ácido fluorhídrico (1 ml de fluoruro de hidrógeno HF y 200 ml de H_2O). La medición de tamaño de grano se realizó bajo la norma ASTM E112 usando el método de intercepción para todos los casos. Finalmente, se realizó una comparativa entre el proceso FW convencional y el proceso LAFW desarrollado por los autores.

3. Resultados y discusión

Durante el proceso de soldadura, se observa la aplicación del láser al acero y posteriormente a la aplicación de la fricción y forja se obtiene la formación de un flash alrededor del eje de aluminio (Figura 5).

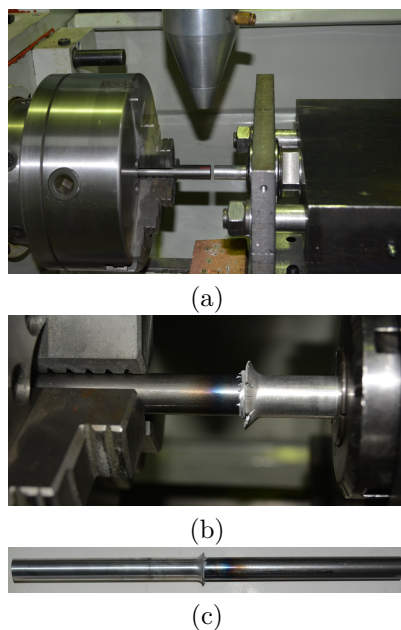


Figura 5. Proceso de soldadura. a) Aplicación láser sobre el eje de acero. b) Formación del flash en el eje de aluminio. c) Probeta soldada

La formación del flash está influenciada principalmente por las características del material sumadas a la presión de fricción, lo que lleva a una deformación más significativa, provocando un mayor efecto de flash debido a la mayor presión mecánica [20].

En general el aspecto de la unión de soldadura para las condiciones establecidas es simétrico, la presión de fricción influye principalmente en un efecto flash que, generalmente, ocurre en el lado del aluminio [8]. Una presión mecánica mayor conduce a una mayor deformación del material que a su vez provoca un mayor efecto de flash (Figura 6).

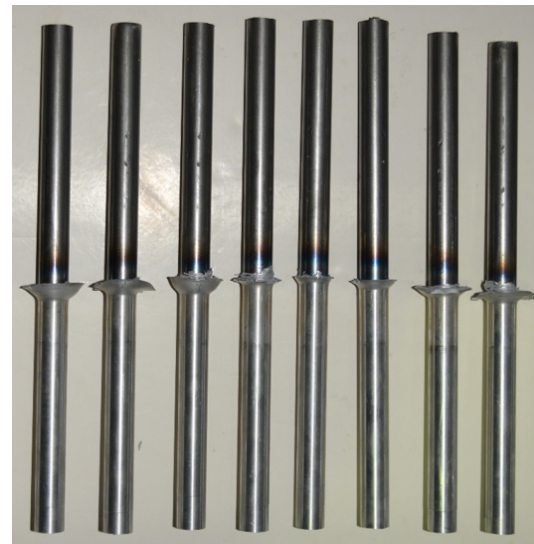


Figura 6. Probetas soldadas, donde se puede observar distintas configuraciones del flash sobre el eje de aluminio

La unión entre aluminio y el acero comienza desde la región exterior y se dirige hacia el centro. La unión mostrada en la Figura 7a presenta una unión homogénea, debido al aporte de calor adicional del láser que favorece a la homogenización del material permitiendo se fusionen ambos materiales [14]. Para determinar la calidad de la unión es necesario realizar el análisis de la microestructura realizando el ataque químico, para verificar la deformación del aluminio en el acero (Figura 7b).

Para uniones acero-aluminio producidas mediante soldadura por fricción se conoce que existen cuatro zonas definidas desde los extremos hacia el centro: zona no deformada (ZND), zona afectada térmicamente (ZAT), zona afectada termomecánicamente (ZATM) y la capa de reacción o interfaz Fe-Al. En el caso del acero, la ZND presenta una matriz conformada por ferrita y perlita en aproximadamente un 39,36 % y un 60,64 %, respectivamente. La matriz tiene un porcentaje de carbono de un 0,45 % y un tamaño de grano ASTM 6 que corresponden a un acero AISI 1045 (Figura 8a). La ZAT muestra un ligero refinamiento del grano similar a los obtenidos por [28]. La zona de

microestructura más crítica es la ZATM que se caracteriza por un refinamiento mayor del grano, debido a que existe un incremento de la temperatura y rápido enfriamiento. Respecto al aluminio, la ZND presenta una matriz conformada por aluminio y cobre en aproximadamente un 93,85 % y un 6,15 %, respectivamente. La matriz tiene un tamaño de grano ASTM 10 que corresponde a un aluminio AA 2017 (Figura 8b).

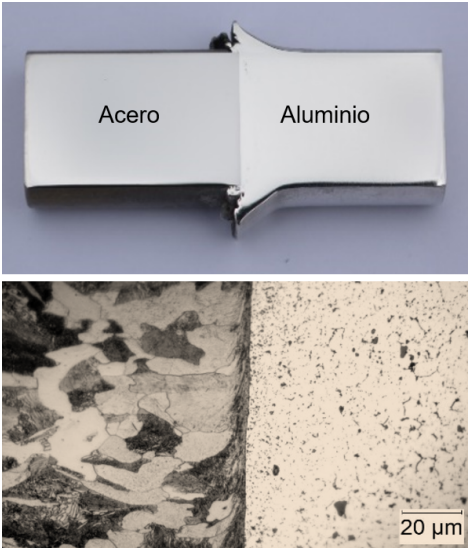


Figura 7. Sección transversal – Micrografía de la unión acero-aluminio 500x

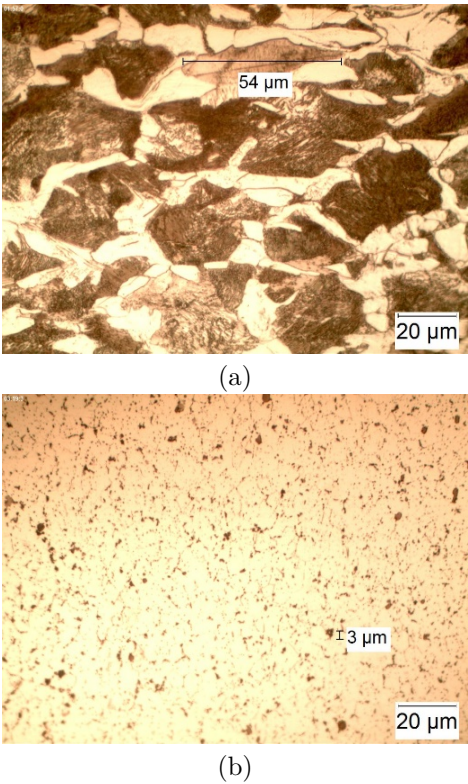


Figura 8. Microscopía óptica de la zona afectada termomecánicamente a 10000x a) Acero. b) Aluminio.

La ZAT presenta un refinamiento del grano similar a los obtenidos por [29]. En la (ZATM) existe una mayor deformación termomecánica producto de la fusión por fricción al tratarse de un material con un menor punto de fusión que el acero.

En referencia a la ZATM con asistencia láser se analizó a una ampliación de 1000x como lo describe la Figura 8a; en la Tabla 4 se puede observar el porcentaje de la matriz perlita a 53,51 %, además, aparece ferrita acicular en un 46,49 % producto del calentamiento y rápido enfriamiento producidos por la presión de fricción y la asistencia láser. El tamaño de grano es ASTM 6 con una dimensión promedio aproximada de 54 micrones calculado a través del método de interceptos. En la Figura 8b existe aluminio y cobre con un 94,56 y 5,44 % respectivamente. Se tiene un tamaño de grano ASTM 9 y un diámetro máximo de tres micrones.

Tabla 4. Fases y elementos presentes en los materiales base

AISI 1045		
Área de perlita	1 020 967,40	µm ²
Área de ferrita	887 088,60	µm ²
Perlita %	53,51 %	
Ferrita %	46,49 %	
Área total	1 908 056	µm ²
AA 2017-T4		
Área de cobre	103 810,60	µm ²
Área de aluminio	1 804 245,40	µm ²
Cobre %	5,44 %	
Aluminio %	94,56 %	
Área total	1 908 056	µm ²

La Figura 9 muestra los puntos de análisis para determinar la composición química de cada material mediante espectrometría de emisión óptica de descarga luminiscente (GDOES), aluminio a la izquierda y acero a la derecha. En el centro se tiene la interfaz de soldadura (punto 3). Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5. Se distingue claramente la mayor concentración de aluminio (Al) alrededor del 82 %, cobre (Cu) cerca de 9 % y manganeso (Mn) sobre 5 % para la aleación 2017-T4. Para el acero 1045 se tiene una concentración de hierro (Fe) mayor a 97 %. Mientras que en la interfaz se redistribuye la composición química en Fe 62 % y Al 33 %, con menor contenido de Cu y Mn.

Para complementar el análisis de la microestructura, la Figura 10, muestra un mapeo elemental mediante espectroscopía de energía dispersiva (EDS). Se puede observar la variación del contenido de elementos a lo largo de la interfaz de soldadura. En la parte superior se presenta Fe a mayor concentración identificado por el color rojo correspondiente a la aleación de acero

1045. En la parte inferior se distingue el Al en color amarillo correspondiente a la aleación 2017-T4. También es posible distinguir una elevada concentración de Cu en la parte inferior y en menor medida silicio (Si) tanto en la aleación de acero como en el aluminio.

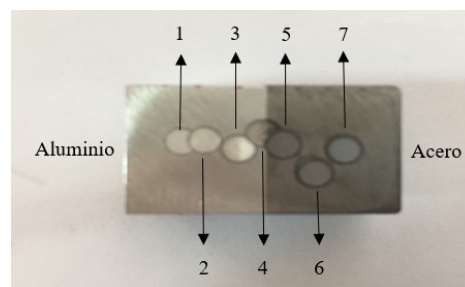


Figura 9. Espectrometría de emisión óptica de descarga luminiscente, puntos de análisis para determinar composición química elemental

Tabla 5. Medición de la composición química mediante GDOES en los puntos indicados

Punto	Fe [%]	C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Ni [%]	Cu [%]	Al [%]	Zn [%]
1	0,78	0,131	5,671	0,184	0,321	0,6831	0,153	8,973	81,891	0,298
2	0,78	0,133	5,588	0,188	0,3017	0,7894	0,153	8,895	81,971	0,294
3	0,73	0,124	5,513	0,173	0,3363	0,8181	0,183	9,08	81,851	0,277
4	61,93	0,063	1,079	0,222	0,0465	0,0148	0,128	3,228	32,786	0,094
5	97,84	0,131	0,849	0,185	0,0138	0,0102	0,185	0,504	0,019	0,007
6	97,88	0,134	0,828	0,18	0,0134	0,0097	0,181	0,494	0,018	0,009
7	97,87	0,133	0,833	0,182	0,0128	0,0097	0,181	0,505	0,013	0,006

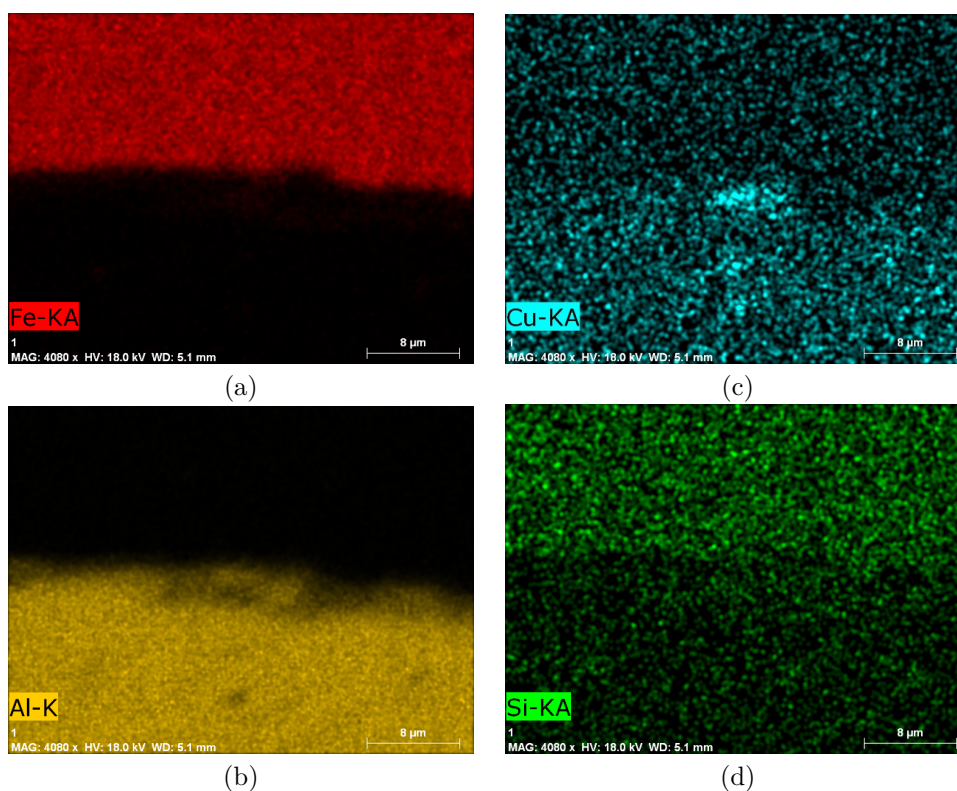


Figura 10. Espectrometría de emisión óptica de descarga luminiscente, puntos de análisis para determinar composición química elemental

4. Conclusiones

Se desarrolló un sistema de soldadura por fricción con asistencia láser donde se puede controlar la velocidad de rotación del sistema mediante un variador de frecuencia. La velocidad óptima escogida a través de ensayos experimentales corresponde a un rango entre 1600 y 1800 rpm.

El sistema de presión hidráulico desarrollado es capaz de proporcionar una fuerza axial sobre los 9800 N, permitiendo realizar soldaduras en ejes de acero-aluminio con diámetros de hasta 20 mm. El rango de presiones para generar fricción y acelerar el proceso de soldadura se encuentra en el rango de 14 a 21 Mpa.

La aplicación del haz láser sobre el eje de acero permite homogenizar la microestructura a la vez que acelera el proceso de soldadura para que exista una mayor interfaz de soldadura entre los ejes de acero y aluminio, mismos que se han verificado en los análisis de la microestructura.

Se determinó el tamaño de grano para cada elemento, para el acero un promedio de grano ASTM 8 con diámetro máximo de 6 micrones. Para el aluminio se tiene un tamaño de grano ASTM 9 y un diámetro máximo de 3 micrones.

En la interfaz de soldadura se determinó un decrecimiento del hierro (Fe) y aluminio (Al). El Fe disminuye de 97,8 % a 61,9 %, mientras que el aluminio se pasa de 81,9 % a 32,8 %. También se pudo determinar la existencia de manganeso, cobre y silicio en menor proporción que los materiales base.

Referencias

- [1] A. Handa and V. Chawla, "Experimental evaluation of mechanical properties of friction welded dissimilar steels under varying axial pressures," *Strojnícky časopis - Journal of Mechanical Engineering*, vol. 66, no. 1, pp. 27–36, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1515/scjme-2016-0008>
- [2] S. D. Meshram, T. Mohandas, and G. M. Reddy, "Friction welding of dissimilar pure metals," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 184, no. 1, pp. 330–337, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.123>
- [3] W. Cai, G. Daehn, A. Vivek, J. Li, H. Khan, R. S. Mishra, and M. Komarasamy, "A State-of-the-Art Review on Solid-State Metal Joining," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 141, no. 3, p. 031012, 01 2019, 031012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1115/1.4041182>
- [4] P. Sathiya, S. Aravindan, and A. Noorul Haq, "Effect of friction welding parameters on mechanical and metallurgical properties of ferritic stainless steel," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 31, no. 11, pp. 1076–1082, Feb. 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00170-005-0285-5>
- [5] A. Hascalik and N. Orhan, "Effect of particle size on the friction welding of Al₂O₃ reinforced 6160 Al alloy composite and SAE 1020 steel," *Materials and Design*, vol. 28, no. 1, pp. 313–317, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.06.001>
- [6] N. Ozdemir, F. Sarsilmaz, and A. Hascalik, "Effect of rotational speed on the interface properties of friction-welded AISI 304L to 4340 steel," *Materials and Design*, vol. 28, no. 1, pp. 301–307, 2007. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2005.06.011>
- [7] W.-Y. Li, M. Yu, J. Li, G. Zhang, and S. Wang, "Characterizations of 21-4N to 4Cr₉Si₂ stainless steel dissimilar joint bonded by electric-resistance-heat-aided friction welding," *Materials and Design*, vol. 30, no. 10, pp. 4230–4235, 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.04.032>
- [8] E. Taban, J. E. Gould, and J. C. Lippold, "Dissimilar friction welding of 6061-T6 aluminum and AISI 1018 steel: Properties and microstructural characterization," *Materials and Design (1980-2015)*, vol. 31, no. 5, pp. 2305–2311, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.12.010>
- [9] S. Fukumoto, H. Tsubakino, K. Okita, M. Aritoshi, and T. Tomita, "Amorphization by friction welding between 5052 aluminum alloy and 304 stainless steel," *Scripta Materialia*, vol. 42, no. 8, pp. 807–812, 2000. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(00\)00299-2](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(00)00299-2)
- [10] A. Handa and V. Chawla, "Experimental study of mechanical properties of friction welded AISI 1021 steels," *Sadhana*, vol. 38, no. 6, pp. 1407–1419, Dec. 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s12046-013-0181-x>
- [11] J. Luo, Y. H. Ye, J. J. Xu, J. Y. Luo, S. M. Chen, X. C. Wang, and K. W. Liu, "A new mixed-integrated approach to control welded flashes forming process of damping-tube-gland in continuous drive friction welding," *Materials and Design*, vol. 30, no. 2, pp. 353–358, 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.04.075>
- [12] S. Celik and I. Ersozlu, "Investigation of the mechanical properties and microstructure of

- friction welded joints between AISI 4140 and AISI 1050 steels,” *Materials & Design*, vol. 30, no. 4, pp. 970–976, 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.06.070>
- [13] J. L. Mullo, J. A. Ramos-Grez, and G. O. Barrionuevo, “Effect of laser heat treatment on the mechanical performance and microstructural evolution of AISI 1045 steel-2017-T4 aluminum alloy joints during rotary friction welding,” *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 30, no. 4, pp. 2617–2631, Apr. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05614-6>
- [14] G. L. Wang, J. L. Li, W. L. Wang, J. T. Xiong, and F. S. Zhang, “Rotary friction welding on dissimilar metals of aluminum and brass by using pre-heating method,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 99, no. 5, pp. 1293–1300, Nov. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2572-y>
- [15] S. Celik and I. Ersozlu, “Investigation of the mechanical properties and microstructure of friction welded joints between AISI 4140 and AISI 1050 steels,” *Materials and Design*, vol. 30, no. 4, pp. 970–976, 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.06.070>
- [16] W. Li, A. Vairis, M. Preuss, and T. Ma, “Linear and rotary friction welding review,” *International Materials Reviews*, vol. 61, no. 2, pp. 71–100, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/09506608.2015.1109214>
- [17] P. Ferro, Y. Wei, and F. Sun, “Microstructures and mechanical properties of Al/Fe and Cu/Fe joints by continuous drive friction welding,” *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2018, p. 2809356, Jun. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1155/2018/2809356>
- [18] O. D. Hincapié, J. A. Salazar, J. J. Restrepo, J. A. Graciano-Urbe, and E. A. Torres, “Weldability of aluminum-steel joints using continuous drive friction welding process, without the presence of intermetallic compounds,” *Engineering Journal*, vol. 24, no. 1, pp. 129–144, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4186/ej.2020.24.1.129>
- [19] X. Li, J. Li, F. Jin, J. Xiong, and F. Zhang, “Effect of rotation speed on friction behavior of rotary friction welding of aa6061-t6 aluminum alloy,” *Welding in the World*, vol. 62, no. 5, pp. 923–930, Sep. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s40194-018-0601-y>
- [20] E. Taban, J. E. Gould, and J. C. Lip-pold, “Dissimilar friction welding of 6061-T6 aluminum and AISI 1018 steel: Prop-erties and microstructural characterization,” *Materials and Design (1980-2015)*, vol. 31, no. 5, pp. 2305–2311, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.12.010>
- [21] X. Fei, X. Jin, N. Peng, Y. Ye, S. Wu, and H. Dai, “Effects of filling material and laser power on the formation of intermetallic compounds during laser-assisted friction stir butt welding of steel and aluminum alloys,” *Applied Physics A*, vol. 122, no. 11, p. 936, Oct. 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00339-016-0462-4>
- [22] T. Wada, Y. Morisada, Y. Sun, H. Fujii, Y. Kawahito, M. Matsushita, and R. Ikeda, “Friction stir welding of medium carbon steel with laser-preheating,” *ISIJ International*, vol. 60, no. 1, pp. 153–159, 2020. [Online]. Avail-able: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2019-394>
- [23] X. Fei, J. Li, W. Yao, and L. Jin, “Study of temperature on microstructure and mechan-ical properties on Fe/Al joint in laser-assisted friction stir welding,” *AIP Advances*, vol. 8, no. 7, p. 075214, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.5039417>
- [24] M. Kutsuna, N. Yamagami, M. J. Rathod, and H. Y. A. Ammar, “Laser roll weld-ing for joining of low-carbon steels to alu-minium alloys,” *Welding International*, vol. 20, no. 6, pp. 446–456, 2006. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1533/wint.2006.3599>
- [25] Q. Guan, J. Long, P. Yu, S. Jiang, W. Huang, and J. Zhou, “Effect of steel to aluminum laser welding parameters on mechanical properties of weld beads,” *Optics and Laser Technology*, vol. 111, pp. 387–394, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.09.060>
- [26] S. L. Campanelli, G. Casalino, C. Casavola, and V. Moramarco, “Analysis and compar-ison of friction stir welding and laser as-sisted friction stir welding of aluminum al-lo,” *Materials (Basel, Switzerland)*, vol. 6, pp. 5923–5941, Dec 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/ma6125923>
- [27] M. Merklein and A. Giera, “Laser as-sisted friction stir welding of drawable steel-aluminium tailored hybrids,” *International Jour-nal of Material Forming*, vol. 1, no. 1, pp. 1299–1302, Apr. 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s12289-008-0141-x>

- [28] M. Yilmaz, M. Çöl, and M. Acet, “Interface properties of aluminum/steel friction-welded components,” *Materials Characterization*, vol. 49, no. 5, pp. 421–429, 2002. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S1044-5803\(03\)00051-2](https://doi.org/10.1016/S1044-5803(03)00051-2)
- [29] N. Hynes, P. Nagaraj, and J. Sujana, “Investigation on joining of aluminum and mild steel by friction stud welding,” *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 27, no. 12, pp. 1409–1413, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/10426914.2012.667894>



DETECCIÓN DE PEATONES EN EL DÍA Y EN LA NOCHE USANDO YOLO-V5

PEDESTRIAN DETECTION AT DAYTIME AND NIGHTTIME CONDITIONS BASED ON YOLO-V5

Bryan Montenegro^{1,3} , Marco Flores-Calero^{2,3,*}

Recibido: 13-05-2021, Recibido tras revisión: 12-08-2021, Aceptado: 13-09-2021, Publicado: 01-01-2022

Resumen

En este artículo se presenta un nuevo algoritmo basado en aprendizaje profundo para la detección de peatones en el día y en la noche, denominada multispectral, enfocado en aplicaciones de seguridad vehicular. La propuesta se basa en YOLO-v5, y consiste en la construcción de dos subredes que se enfocan en trabajar sobre las imágenes en color (RGB) y térmicas (IR), respectivamente. Luego se fusiona la información, a través, de una subred de fusión que integra las redes RGB e IR, para llegar a un detector de peatones. Los experimentos, destinados a verificar la calidad de la propuesta, fueron desarrollados usando distintas bases de datos públicas de peatones destinadas a su detección en el día y en la noche. Los principales resultados en función de la métrica mAP, estableciendo un IoU en 0.5 son 96.6 % sobre la base de datos INRIA, 89.2 % sobre CVC09, 90.5 % en LSIFIR, 56 % sobre FLIR-ADAS, 79.8 % para CVC14, 72.3 % sobre Nightowls y KAIST un 53.3 %.

Palabras clave: infrarrojo, color, multispectral, peatones, aprendizaje profundo, YOLO-v5

Abstract

This paper presents new algorithm based on deep learning for daytime and nighttime pedestrian detection, named multispectral, focused on vehicular safety applications. The proposal is based on YOLO-v5, and consists of the construction of two subnetworks that focus on working with color (RGB) and thermal (IR) images, respectively. Then the information is merged, through a merging subnetwork that integrates RGB and IR networks to obtain a pedestrian detector. Experiments aimed at verifying the quality of the proposal were conducted using several public pedestrian databases for detecting pedestrians at daytime and nighttime. The main results according to the mAP metric, setting an IoU of 0.5 were: 96.6 % on the INRIA database, 89.2 % on CVC09, 90.5 % on LSIFIR, 56 % on FLIR-ADAS, 79.8 % on CVC14, 72.3 % on Nightowls and 53.3 % on KAIST.

Keywords: Infrared, color, multispectral, pedestrian, deep learning, YOLO-v5

¹Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Av. Gral. Rumiñahui s/n, PBX 171-5-231B, Sangolquí (Pichincha), Ecuador.

²Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Av. Gral. Rumiñahui s/n, PBX 171-5-231B, Sangolquí (Pichincha), Ecuador.

^{3,*}Departamento de Sistemas Inteligentes I&H Tech. Autor para correspondencia ✉: mjflores@espe.edu.ec.

Forma sugerida de citación: Montenegro, B. y Flores-Calero, M. "Detección de peatones en el día y en la noche usando YOLO-v5," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 27, pp. 85-95, 2022. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n27.2022.08>.

1. Introducción

En la actualidad, los accidentes de tráfico son un problema de salud pública a nivel mundial, porque ocasionan un alto número de víctimas y lesionados, costos de tratamientos médicos, rehabilitación, alteraciones psicológicas, seguros personales y materiales, consumen recursos que podrían destinarse a otros campos de la salud [1], donde los peatones están expuestos a un alto porcentaje de accidentalidad, llegando hasta el 22 % de los casos [2]. Muchos de estos infortunios pueden ser evitados, debido a que son generados por la acción riesgosa, negligente o irresponsable de los conductores y/o los mismos peatones [3]. En el caso del Ecuador, los atropellamientos representan más del 10 % de las defunciones por accidentes de tráfico.

En este escenario, los sistemas de detección de peatones (SDP) son uno de los componentes tecnológicos más importantes para evitar posibles situaciones de peligro y reducir los atropellamientos. Por lo tanto, la detección de peatones es un tema de investigación activo y desafiante, debido a los retos que se deben superar al trabajar en ambientes no controlados y con sensores limitados en la percepción de la escena vial.

En el caso de las condiciones atmosféricas, el exceso de sol, las lluvias, la niebla o la neblina cambian las condiciones de iluminación, y para peor, la noche magnifican estos factores de riesgo debido a la falta de luz natural [4–6]. Respecto a los peatones, estos usan diferentes tipos de ropa, en colores variados, cambian la postura del cuerpo y pueden estar en cualquier posición de la escena vial. En lo que tiene que ver con la información captada por la cámara, en general, es incompleta debido al reducido campo de visión del sensor, la distancia que separa al peatón de la cámara, disminuye la resolución de la imagen capturada. El movimiento y la vibración del vehículo generan distorsión de la imagen. Además, la geometría de la carretera incide directamente en la calidad de la información captada por la cámara [5], [7].

Afortunadamente, hoy por hoy existen bases de datos públicas, especializadas en la detección de peatones, en el día, en la noche, en conjunto o por separado, en el contexto de vehículos inteligentes y autónomos, que pueden ser usadas para la parte experimental [8–10].

Así, el principal objetivo de este trabajo es instrumentar una nueva arquitectura de aprendizaje profundo (*DL*, *Deep Learning*) basada en YOLO-v5 [4], [11–15], para obtener un sistema de vanguardia y especializado en la detección de peatones en la noche y/o en el día, usando información visual en el rango de la luz visible y en el infrarrojo, que genere resultados comparables a los existentes en el estado de la cuestión.

El contenido de este documento está organizado de la siguiente manera: la sección 2 presenta el estado de la cuestión en el campo de los SDP usando

técnicas DL. A continuación, el apartado 3 describe la arquitectura del sistema de detección basado en una nueva arquitectura basada en YOLO-v5 para la clasificación/detección de peatones en la noche y/o en el día. El siguiente apartado exhibe los resultados de la evaluación experimental, desarrollada sobre varias bases de datos públicas destinada a la implementación de SDP; en el día y la noche. Finalmente, la última parte está dedicada a las conclusiones y los trabajos futuros.

1.1. Estado de la cuestión

Actualmente, las arquitecturas DL están siendo ampliamente usadas en la construcción de SDP, cuyo objetivo es la detección de peatones en escenarios reales de conducción [4], [6], [12], [15, 16]. Para este fin se han usado cámaras en el rango de la luz visible (imágenes RGB) y en el infrarrojo, lejano o cercano, (imágenes IR) para captar la información visual en el día y en la noche, en conjunto o por separado.

Así, Kim *et al.* [17] usaron CNN sobre imágenes nocturnas capturadas con una cámara del espectro visible. Los experimentos se han desarrollado sobre las bases de datos KAIST [18] y CVC-14 [10].

Ding *et al.* [18] pusieron en funcionamiento una arquitectura CNN basada en dos subredes R-FCN, una red para imágenes en color y otra para térmicas. Las subredes de gran medida, térmica y en color, se fusionan en la mitad de la arquitectura, de manera similar para las subredes de pequeña medida. Obteniendo detecciones por separado para peatones de grande y pequeña escala, al final de la red se utiliza el algoritmo de NMS (no máxima supresión) para fusionar los resultados de las dos subredes y obtener una detección robusta. Con la fusión de los dos canales se disminuye la tasa de error versus FPPI del 40 % a 34 %, que se obtiene con los canales por separado. Además, el porcentaje de pérdidas con R-FCN es del 69 %, mientras que con Faster-RCNN es del 51 %.

King *et al.* [5] han instalado una red RPN para detectar personas en el espectro visible y en el infrarrojo; luego para fusionar la información han utilizado la técnica Boosted Decision Tree obteniendo una tasa de error del 29.83 % sobre la base de datos KAIST [19].

Kim *et al.* [16] combinaron RPN y Boosted Forest para la detección de peatones sobre las bases de datos Caltech [20], INRIA [21], ETHZ y KITTI [22]; para mejorar el entrenamiento utilizaron técnicas de bootstrap para llegar a una tasa de error del 9.6 %; el algoritmo tiene un tiempo de procesamiento de 0.6 segundos por fotograma. Además, comprobaron que Faster R-CNN no funciona adecuadamente, debido a que los mapas de características no presentan la suficiente información para detectar peatones a larga distancia, lo que resulta una desventaja a ser resuelta.

Zhang *et al.* [15] desarrollaron una arquitectura Faster R-CNN en el espectro visible e infrarrojo. Los resultados experimentales se desarrollaron sobre la base de datos Caltech [20], y en situaciones nocturnas sobre una base propia, obteniendo una tasa de error del 19 % y del 24 %, respectivamente, con un tiempo de procesamiento de 103 milisegundos (9.7 fps) sobre imágenes de 640×480 píxeles.

Liu *et al.* [4] emplearon una arquitectura Faster-RCNN para la detección de peatones en los espectros visible e infrarrojo, con una tasa de error del 37 % sobre la base de datos KAIST [19].

Song *et al.* [11] propusieron una red híbrida basada en Yolo-v3 llamada MSFFN (*multispectral feature fusion network*), la cual está compuesta por una estructura DarkNet-53 y dos subredes MFEV y MFEI, para imágenes en color e infrarrojo, respectivamente. Los mapas de características de MFEV se dividen en tres escalas de (13×13) , (26×26) y (52×52) , de manera análoga para MFEI, para ser fusionados en la parte final de la arquitectura. MSFFN alcanza un mAP de 85.4 %, con respecto al 84.9 % de Faster-RCNN sobre KAIST [19], otro aspecto sobresaliente es los 56 fps de MSFFN, contra los 28 fps de Faster-RCNN.

Cao *et al.* [8] expusieron mejoras en los parámetros para la detección en YOLO-v3, modificando el tamaño de cuadrícula a (10×10) , aplicando Soft-NMS en lugar de NMS, con un umbral de 0.2 de superposición y, finalmente, agregando un nuevo mapa de características de (104×104) . Los experimentos los realizaron sobre INRIA [21], obteniendo una precisión del 93.74 % y un recall de 88.14 %, con una velocidad de procesamiento 9.6 milisegundos por fotograma.

Yu *et al.* [23] modificaron Faster R-CNN, concatenando tres niveles diferentes de VGG16 con las ROI, luego se los normaliza, escala y dimensiona. Con estos cambios se obtienen un *miss-rate* (MR) de 10.31 % sobre la base de datos INRIA [21].

Zhou *et al.* [24] propusieron un sistema para mejorar el rendimiento en la detección con oclusión con su red MSFMN (*Mutual-Supervised Feature Modulation Network*), compuesto por dos ramas supervisadas por anotaciones de cuerpo completo y de partes visibles, que genera ejemplos de entrenamiento mejor enfocados. Además, se calcula la semejanza en la pérdida entre las cajas de cuerpo completo y las partes visibles, permitiendo aprender características más robustas, principalmente para peatones ocluidos. La fusión se realiza al final multiplicando los dos puntajes de clasificación. Los experimentos los desarrollaron sobre la base de datos CityPersons [24] obteniendo un 38.45 % para una fuerte oclusión.

Por otra parte, Tesema *et al.* [25] pusieron en marcha una arquitectura híbrida que recibe el nombre de HCD (SDS-RPN), con un Log-average Miss Rate de 8.62 % sobre Caltech [20]. Por otra parte, Kyrkou [26] presentó el sistema YOLOPED que se basa en la arqui-

tectura DenseNet. En lugar de FPN, cada resolución se redimensiona al tamaño del mapa de características más profundo en la columna, permitiendo combinarlos mediante una concatenación, la cual es usada en la detección de cabecera. Finalmente, se implanta una nueva función de pérdida, combinando las características de YoloV2 [27], SSD [28] y lapNet [29].

Evaluable en PETS2009, se obtiene una precisión del 85.7 %, miss rate del 12 %, con un procesamiento de 33.3 fps. Wolpert *et al.* [12] han propuesto combinar imágenes RGB y térmicas, usando Faster R-CNN sin cajas de anclaje, adaptando la arquitectura CSP-Net [12] para fusionar las imágenes IR en el final de la arquitectura, alcanzando un promedio de MS 7.40 % sobre KAIST [19]. Zhou *et al.* [30] han presentado la red MBNet (*Modality Balance Network*), basada en SSD con un módulo DMAF (*Differential Modality Aware Fusion*), el cual fusiona y complementa la información entre las características RGB y térmicas.

La detección IAFA (*Illumination Aware Feature Alignment*) maneja el equilibrio entre las dos modalidades en la detección, el desempeño alcanza un miss rate de 21.1 % y 8.13 % sobre CVC-14 [10] y KAIST [19] respectivamente. Wang [31] utiliza una arquitectura llamada CSP, compuesta por una parte de extracción de características basada en Resnet-101 y una etapa de detección, la cual a su vez es usada para predecir el centro, escalar y offset. En el cual usan Batch Normalization (BN), para acelerar el proceso de entrenamiento y mejorar el desempeño de las CNN. Otra técnica más reciente es Switch Normalization (SN), la cual emplea un promedio ponderado de la media y la varianza estadística de la normalización por bloques.

Para el modelo CSP se comprobó que usando BN se obtiene 11.29 % MR (miss rate), mientras que, SN obtiene un 10.91 % MR en la base de datos CityPersons. Escalar adecuadamente las imágenes ayudan a disminuir la carga computacional y a eliminar ruido, CSP con SN y una entrada de (1024×2048) , se tiene un 11.41 % MR, mientras que, con una entrada de (640×1280) , se tiene un MR de 10.80 %. Shopovska *et al.* [32] presentaron una arquitectura similar a las redes generativas adversarias (GAN). Esta red tiene dos entradas, una RGB y una térmica, dando como salida una imagen que mantiene los peatones con buena visibilidad, mientras que, con la información obtenida de las imágenes térmicas realza el color de los peatones con mala visibilidad.

Esta imagen es utilizada de entrada para red Faster RCNN VGG16, con lo cual se obtiene un 52.07 % MR y 43.25 % MR, para las imágenes del día y la noche, respectivamente en la base de datos KAIST [19], en CVC-14 [10] se obtienen un 69.14 % MR y 63.52 % MR, para imágenes en el día y en la noche, respectivamente.

2. Materiales y métodos

La Figura 1 muestra el esquema general del sistema multispectral propuesto para la detección de peatones. El sistema toma la información visual, proveniente de las imágenes en color o térmicas, para alimentar dos subredes, denominadas RGB e IR, respectivamente. Luego, la red de fusión concatena las salidas para localizar peatones en el día y en la noche, de manera conjunta o por separado. Las subredes están compuestas por una arquitectura basada en YOLO-v5 (You Only Look Once) [11], [26], [33–35].

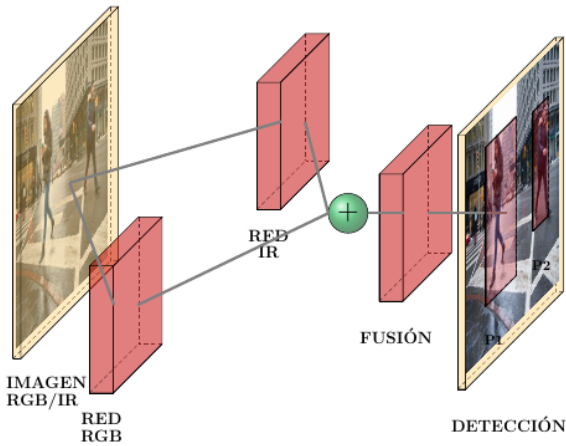


Figura 1. Esquema general del sistema multispectral para la detección de peatones sobre imágenes en color y térmicas, basado en YOLO-v5

2.1. Descripción de la arquitectura YOLO-v5

YOLO es un acrónimo de «You Only Look Once» [11], [27], [33–35]. Es un modelo muy popular y de alto rendimiento en el campo de detección de objetos, es considerado como la tecnología de punta en detecciones en tiempo real (FPS). YOLO-v5 es la quinta generación de los detectores de una sola etapa [36]. YOLO-v5 está implementado en Pytorch. La Tabla 1 muestra la composición de las capas personalizadas que describen la arquitectura, en función de las capas base de Pytorch.

En la Tabla 1, la sigla SF es un acrónimo para *Scale Factor*, por otra parte, el símbolo #s representa parámetros variables que se manejan de acuerdo con los valores establecidos en la columna de parámetros de la Tabla 2, estos definen principalmente el tamaño del Kernel, Stride, Padding y Canales.

Finalmente, el símbolo – representa que no recibe ningún parámetro.

La Figura 2 muestra la arquitectura YOLO-v5, que constituyen las subredes IR y RGB; con las capas mencionadas en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición de las capas personalizadas implementadas en YOLO-v5 [36]

Nombre	Composición	Parámetros		
		Kernel	Stride	Canales
Conv	conv2d	#	#	#
	BatchNom2d	-	-	-
	Hardwish	-	-	-
Focus	Conv	3×3	1	32
	concat	-	-	-
BottleNeckCSP	Conv	3×3	1	#
	Conv	3×3	1	#
	Conv	3×3	1	#
	conv2d	3×3	1	#
	conv2d	3×3	1	#
	concat	-	-	-
	BatchNom2d	-	-	-
	LeakyRelu	-	-	-
	Conv	3×3	1	#
SPP	Conv	3×3	1	512
	-	Kernel	Stride	Padding
	Maxpool2d	5×5	1	2
	Maxpool2d	9×9	1	4
	Maxpool2d	13×13	1	6
	concat	-	-	-
Upsample	nn.Upsample	Size	SF	Mode
		none	2	nearest

2.2. Arquitectura propuesta

La arquitectura propuesta se enfoca en crear un sistema capaz de fusionar dos subredes que trabajan con imágenes RGB e IR, respectivamente. La red de fusión concatena las capas 17 y 40 (peatones pequeños), y las capas 20 y 43 (peatones grandes), descritos en la Tabla 2, para localizar peatones en el día y en la noche, de manera conjunta o por separado.

La Tabla 2 muestra las capas específicas que componen cada una de las subredes; cada capa cuenta con un identificador (id), el cual se utiliza en procedencia para identificar a qué capas están conectadas. La procedencia -1 indica que es una conexión a la capa anterior; el número indica la cantidad de veces que se repite la capa, por último, en parámetros se indica los argumentos que recibe cada capa.

Las capas que contienen los mapas de características de las redes RGB e IR están concatenadas para la fusión de la información, a través, de una capa BottleNeckCSP. Esta información combinada es la que se envía a la capa de detección para la generación de los cuadros delimitadores y la predicción de clase.

Tabla 2. Distribución y conexiones de subredes que conforman la arquitectura del sistema para la detección de peatones en el día y la noche, basado YOLO-v5 [36]

Red	Id	Procedencia	Número	Módulo	Parámetros
RGB	0	-1	1	Focus	[32,3]
	1	-1	1	Conv	[64,3,2]
	2	-1	3	BottleneckCSP	[64]
	3	-1	1	Conv	[128,3,2]
	4	-1	9	BottleneckCSP	[128]
	5	-1	1	Conv	[256,3,2]
	6	-1	9	BottleneckCSP	[256]
	7	-1	1	Conv	[512,3,2]
	8	-1	1	SPP	[512,[5,9,13]]
	9	-1	3	BottleneckCSP	[512,False]
	10	-1	1	Conv	[1]
	11	-1	1	Upsample	[256,False]
	12	[-1,6]	1	concat	[1]
	13	-1	3	BottleneckCSP	[256,False]
	14	-1	1	Conv	[128,1,1]
	15	-1	1	Upsample	[None,2,Nearest]
	16	[-1,4]	1	concat	[1]
	17	-1	3	BottleneckCSP	[128,False]
	18	-1	1	Conv	[128,3,2]
	19	[-1,14]	1	concat	[1]
	20	-1	3	BottleneckCSP	[256,False]
	21	-1	1	Conv	[256,3,2]
	22	[-1,10]	1	concat	[1]
	23	-1	3	BottleneckCSP	[512,False]
IR	24	0	1	Conv	[64,3,2]
	25	-1	3	BottleneckCSP	[64]
	26	-1	1	Conv	[128,3,2]
	27	-1	9	BottleneckCSP	[128]
	28	-1	1	Conv	[256,3,2]
	29	-1	9	BottleneckCSP	[256]
	30	-1	1	Conv	[512,3,2]
	31	-1	1	SPP	[512,[5,9,13]]
	32	-1	3	BottleneckCSP	[512,False]
	33	-1	1	Conv	[1]
	34	-1	1	Upsample	[256,False]
	35	[-1,29]	1	concat	[1]
	36	-1	3	BottleneckCSP	[256,False]
	37	-1	1	Conv	[128,1,1]
	38	-1	1	Upsample	[None,2,Nearest]
	39	[-1,27]	1	concat	[1]
	40	-1	3	BottleneckCSP	[128,False]
	41	-1	1	Conv	[128,3,2]
	42	[-1,37]	1	concat	[1]
	43	-1	3	BottleneckCSP	[256,False]
	44	-1	1	Conv	[256,3,2]
	45	[-1,33]	1	concat	[1]
	46	-1	3	BottleneckCSP	[512,False]
Fusión	47	[17,40]	1	concat	[1]
	48	-1	3	BottleneckCSP	[128,False]
	49	[20,43]	1	concat	[1]
	50	-1	3	BottleneckCSP	[256,False]
	51	[23,46]	1	concat	[1]
	52	-1	3	BottleneckCSP	[512,False]
Detect	53	[48,50,52]	3	Detect	[1, anchors]

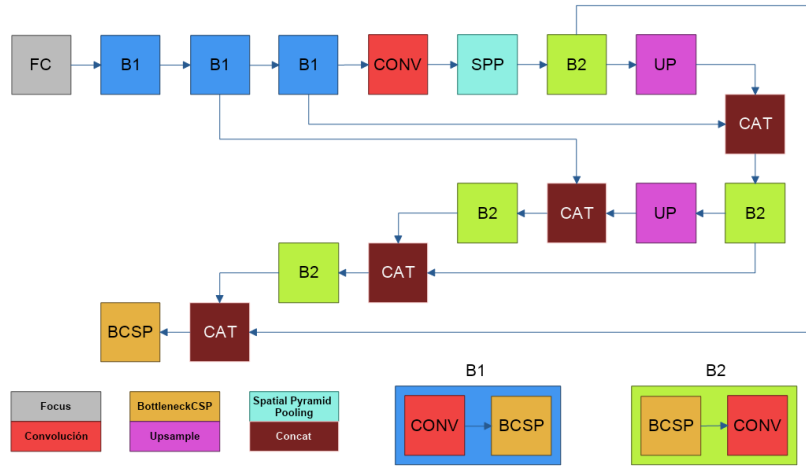


Figura 2. Representación gráfica de la arquitectura YOLO-v5

3. Resultados y discusión

Para llegar al modelo propuesto se han desarrollado múltiples experimentos, usando bases de datos de referencia en el estado de la cuestión y, las métricas estándar de evaluación destinados a la detección de objetos.

3.1. Descripción de las bases de datos

Las bases de datos públicas de peatones, en los espectros visible e infrarrojo, son INRIA [21], CVC 09 [9], CVC-14 [10], LSI *Far Infrared Pedestrian Dataset* (LSIFIR) [37], FLIR-ADAS [38], Nightowls [39] y KAIST [19].

Estas bases de datos fueron elegidas porque están especializadas en aplicaciones vehiculares durante el día y la noche, e incluyen la etiquetación de la región verdadera, B_{gt} , donde se localizan efectivamente los peatones.

- **INRIA** [21]. La base de datos pública INRIA es una de las más utilizadas en detección de peatones. Cuenta con un conjunto de imágenes divididas en «train» y «test»; la carpeta «train» contiene 614 imágenes para el entrenamiento mientras que, la carpeta «test» incluye 288 imágenes para test. En la Tabla 3 se muestra el contenido.

Tabla 3. Contenido de la base de datos INRIA

	Detección
Entrenamiento	614(614) ^a
Prueba	288(288)

^a El valor entre paréntesis representa el número de fotogramas que contienen peatones.

- **CVC-09** [9]. Estas son las bases de datos más utilizadas para la detección de peatones en la noche y en el día, respectivamente. En este caso se la usó para el entrenamiento, y posteriormente para la validación. En la Tabla 4 se describen los conjuntos de entrenamiento y de prueba. Esta base de datos viene etiquetada con los peatones presentes en la escena, B_{gt} .

Tabla 4. Contenido de la base de datos CVC-09 durante la noche

	Positivos	Negativos
Entrenamiento	2200	1002
Prueba	2284	-

- **LSIFIR** [37]. Es otra base de datos importante para el desarrollo de algoritmos de detección de peatones en la noche. En la Tabla 5 se describen los conjuntos de entrenamiento y de prueba, con sus respectivos tamaños. En este caso al igual que CVC09 se la usó para el entrenamiento, validación y prueba de la propuesta.

Tabla 5. Contenido de la base de datos LSI FIR

	Clasificación	Detección
Entrenamiento	43 391(10 209) ^a	2936(3225)
Prueba	22 051(5945)	5788(3279)

^a El valor entre paréntesis representa el número de fotogramas que contienen peatones.

- **FLIR-ADAS** [38]. Esta base cuenta con imágenes térmicas para el desarrollo sistemas de conducción autónoma. El objetivo de estas imágenes es ayudar al desarrollo de sistemas más seguros, que, combinados con imágenes en color, información de sensores LIDAR, se pueda crear un sistema robusto para la detección de peatones. Con unas 8862 imágenes para el entrenamiento y 5838 para el *test*, ver Tabla 6.

Tabla 6. Contenido de la base de datos FLIR-ADAS

Detección	
Entrenamiento	8862(5838) ^a
Prueba	1366(1206)

^a El valor entre paréntesis representa el número de fotogramas que contienen peatones.

- **CVC-14** [10]. Está compuesta por dos secuencias de imágenes térmicas tomadas durante el día y la noche. Con más de 6000 imágenes para el entrenamiento y 700 para validación.
- **Nightowls** [39]. Se enfoca en la detección de peatones en la noche. Las imágenes son capturadas con una cámara estándar, con una resolución de 1024×640 . Las secuencias fueron capturadas en tres países, bajo todas las condiciones climáticas y en todas las estaciones, para obtener una mayor variabilidad de escenas.
- **KAIST** [19]. Base de datos multiespectral que cuenta con un conjunto de imágenes de 640×480 , tomadas por dos cámaras una térmica y otra en color con una frecuencia de 20 Hz. Tomadas durante el día y la noche para considerar distintas condiciones de iluminación. Existen la misma cantidad de imágenes térmicas y en color con un total de 100 368 imágenes para entrenamiento y 90 280 para el test, ver Tabla 7.

Tabla 7. Contenido de la base de datos KAIST

	Detección	
	Color	Térmica
Entrenamiento	50 184(##) ^a	50 184(##)
Prueba	45 140(##)	45 184(##)

^a El valor entre paréntesis representa el número de fotogramas que contienen peatones.

3.2. Métricas de evaluación

Para la evaluación se seguirán los siguientes protocolos:

- Curva P-R (*Precision-Recall*). La precisión (*Pres*) es la fracción de casos relevantes entre los casos recuperados. El recall (*Rec*) es la fracción de casos relevantes que se han recuperado sobre la cantidad total de casos relevantes. Las ecuaciones para estos casos son las siguientes:

$$Pres = \frac{TP}{TP + FP} \quad (1)$$

$$Rec = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2)$$

- AP (*Average Precision*). Este índice fue propuesto para el desafío VOC2007 [40] para evaluar el desempeño de detectores, y está relacionado con el área bajo la curva, de la curva P-R, de una clase. El mAP que es un promedio de los AP de todas las clases.

Para estimar las métricas se necesita un índice que permita identificar una correcta predicción, en este caso es IoU (*Intersection-over-Union*). IoU determina la relación entre las regiones que corresponden a los verdaderos positivos (TP) y falsos positivos (FP), mediante (3).

$$IoU = \frac{Area(B_{det} \cap B_{gt})}{Area(B_{det} \cup B_{gt})} \quad (3)$$

Donde B_{gt} es la ROI verdadera y B_{det} es la ROI detectada. En este caso, se tiene un TP si el valor de IoU mayor a 0.5, caso contrario es un FP. Con estos valores se puede evaluar las ecuaciones (1) y (2).

3.3. Detalles de la implementación

La arquitectura propuesta cuenta con cuatro partes principales que son las subredes IR y RGB, el bloque de fusión de características y el bloque de detección. El entrenamiento de la arquitectura contara con una etapa de entrenamiento de ajuste fuerte y una etapa de entrenamiento de ajuste fino. Para el entrenamiento de ajuste fuerte se utiliza el algoritmo de optimización SGD (*stochastic gradient descent*) y una tasa de aprendizaje (LR, *Learning rate*) de 0.01, esta técnica evita quedarse estancado en un mínimo relativo de la función de optimización, y se fijan 100 épocas para el entrenamiento de la arquitectura completa con las imágenes RGB. A continuación, se congelan los pesos correspondientes a la subred RGB, para fijar 100 épocas de entrenamiento a la arquitectura con las imágenes IR.

Finalmente, para concluir con la etapa de ajuste fuerte congelaremos los pesos correspondientes a las

subredes IR y RGB, entrenaremos 50 épocas las capas de fusión con las imágenes IR y RGB combinadas en partes iguales para evitar que las capas de fusión sean segadas por las características de las imágenes IR o RGB.

En la etapa de ajuste fino se modifica LR a 0.0001, se congelan todos los pesos de la arquitectura excepto los correspondientes a la subred RGB, luego se entrenan 50 épocas con las imágenes RGB, consecuentemente se congelan todos los pesos excepto los de la subred IR y entrenamos 50 épocas con imágenes IR. Como último paso se congelan todos los pesos excepto los de la capa de fusión y se realiza un entrenamiento de 25 épocas con las imágenes IR y RGB en partes iguales.

Al momento, este procedimiento fue aplicado a cada una de las bases de datos anotadas en este trabajo.

3.4. Resultados

En la Tabla 8 se presenta el desempeño del método de detección, al ser evaluado con varias métricas sobre las bases de datos elegidas.

En todos los casos, el tiempo de procesamiento fue de 29.8 milisegundos.

A continuación, en la Figura 3 se exhiben los gráficos de las curvas P-R de la arquitectura propuesta sobre cada una de las bases de datos elegidas. A partir de la Tabla 8 y la Figura 3 se puede concluir que el mejor desempeño se realiza sobre INRIA [21], seguido de CVC09 [9] y LSIFIR [37].

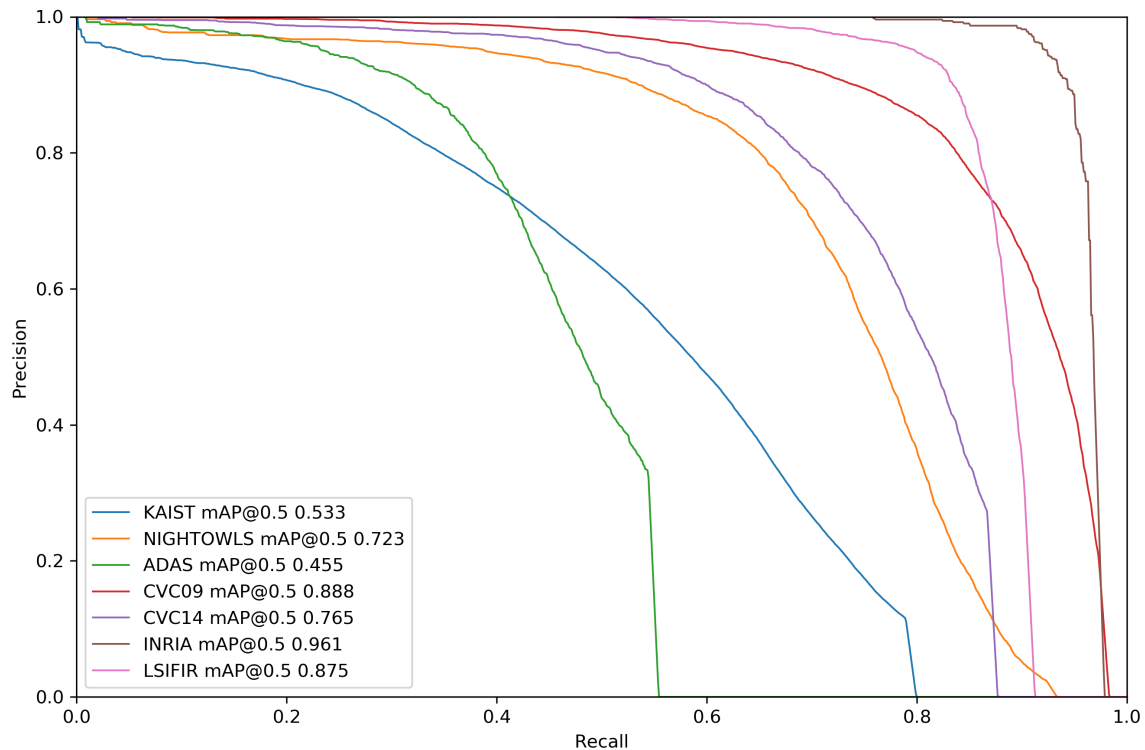


Figura 3. Gráficas de las curvas P-R sobre las distintas bases de datos de peatones

Tabla 8. Evaluación de la arquitectura Yolo-v5 [40], sobre varias bases de datos públicas en el espectro visible e infrarrojo. LAMS es un acrónimo para Log Average Miss Rate

	INRIA	CVC09	LSIFIR	FLIR-ADAS	CVC14	Nightowls	KAIST
mAP@50	96.6	89.2	90.5	56	79.8	72.3	53.3
Precisión	69.8	67.4	89.2	72.1	86.4	80.7	52.5
Recall	90	89	83.4	40.1	61.6	64.6	53.7
LAMS	6	20	17	69	36	36	67

4. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado un sistema para la detección de peatones en el día y en la noche usando modernas técnicas de procesamiento de imágenes y aprendizaje profundo, donde desarrolló una nueva arquitectura DL basada en YOLO-v5, con DenseNet, para la detección de peatones en el día y en la noche usando imágenes en el espectro visible y en el infrarrojo lejano, cuyo mAP es de 96.6 % para el caso INRIA, 89.2 % sobre CVC09, 90.5 % en LSIFIR, 56 % sobre FLIR-ADAS, 79.8 % para CVC14, 72.3 % sobre Nightowls y 53.3 % para KAIST.

Como trabajo futuro se plantea perfeccionar la arquitectura propuesta y probarla sobre las bases de datos más relevantes en este campo del conocimiento.

Agradecimientos

El equipo de computación, GPU, ha sido financiado por la empresa I&H Tech.

Además, deseamos dar las gracias a los investigadores que han publicado sus bases de datos y arquitecturas de aprendizaje profundo, para el uso de la comunidad científica; sin ellos no hubiese sido posible este trabajo.

Finalmente, deseamos expresar nuestros agradecimientos a los revisores anónimos que colaboran.

Referencias

- [1] WHO. (2018) Road traffic injuries. World Health Organization. [Online]. Available: <https://bit.ly/3pmr9Rc>
- [2] ANT. (2015) Estadísticas de siniestros de tránsito octubre 2015. Agencia Nacional de Tránsito del Ecuador. [Online]. Available: <https://bit.ly/3aUIWGv>
- [3] —. (2017) Estadísticas de siniestros de tránsito agosto 2017. Agencia Nacional de Tránsito del Ecuador. [Online]. Available: <https://bit.ly/3aUIWGv>
- [4] J. Liu, S. Zhang, S. Wang, and D. N. Metaxas, “Multispectral deep neural networks for pedestrian detection,” 2016. [Online]. Available: <https://bit.ly/2Z3BLJu>
- [5] D. König, M. Adam, C. Jarvers, G. Layher, H. Neumann, and M. Teutsch, “Fully convolutional region proposal networks for multispectral person detection,” in *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, 2017, pp. 243–250. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CVPRW.2017.36>
- [6] D. Guan, Y. Cao, J. Yang, Y. Cao, and M. Y. Yang, “Fusion of multispectral data through illumination-aware deep neural networks for pedestrian detection,” *Information Fusion*, vol. 50, pp. 148–157, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2018.11.017>
- [7] J. Li, X. Liang, S. Shen, T. Xu, J. Feng, and S. Yan, “Scale-aware fast R-CNN for pedestrian detection,” *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 20, no. 4, pp. 985–996, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TMM.2017.2759508>
- [8] J. Cao, C. Song, S. Peng, S. Song, X. Zhang, Y. Shao, and F. Xiao, “Pedestrian detection algorithm for intelligent vehicles in complex scenarios,” *Sensors*, vol. 20, no. 13, p. 3646, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s20133646>
- [9] Caltech. (2016) Caltech pedestrian detection benchmark. [Online]. Available: <https://bit.ly/3aXuZb4>
- [10] Pascal. (2016) Inria person dataset. [Online]. Available: <https://bit.ly/30APbxi>
- [11] X. Song, S. Gao, and C. Chen, “A multispectral feature fusion network for robust pedestrian detection,” *Alexandria Engineering Journal*, vol. 60, no. 1, pp. 73–85, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.05.035>
- [12] A. Wolpert, M. Teutsch, M. S. Sarfraz, and R. Stiefelhagen, “Anchor-free small-scale multispectral pedestrian detection,” 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3G8k5gI>
- [13] S. Ren, K. He, R. Girshick, and J. Sun, “Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks,” 2016. [Online]. Available: <https://bit.ly/3B167d1>
- [14] C. Ertler, H. Possegger, M. Opitz, and H. Bischof, “Pedestrian detection in RGB-D images from an elevated viewpoint,” in *Proceedings of the 22nd Computer Vision Winter Workshop*, W. Kropatsch, I. Janusch, and N. Artner, Eds. Austria: TU Wien, Pattern Recognition and Image Processing Group, 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/3AYTI9w>
- [15] X. Zhang, G. Chen, K. Saruta, and Y. Terata, “Deep convolutional neural networks for all-day pedestrian detection,” in *Information Science and Applications 2017*, K. Kim and N. Joukov, Eds. Singapore: Springer Singapore, 2017, pp. 171–178. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-981-10-4154-9_21

- [16] L. Zhang, L. Lin, X. Liang, and K. He, "Is faster r-cnn doing well for pedestrian detection?" in *Computer Vision – ECCV 2016*, B. Leibe, J. Matas, N. Sebe, and M. Welling, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 443–457. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-319-46475-6_28
- [17] J. H. Kim, H. G. Hong, and K. R. Park, "Convolutional neural network-based human detection in nighttime images using visible light camera sensors," *Sensors*, vol. 17, no. 5, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s17051065>
- [18] L. Ding, Y. Wang, R. Laganieri, D. Huang, and S. Fu, "Convolutional neural networks for multispectral pedestrian detection," *Signal Processing: Image Communication*, vol. 82, p. 115764, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.image.2019.115764>
- [19] S. Hwang, J. Park, N. Kim, Y. Choi, and I. S. Kweon, "Multispectral pedestrian detection: Benchmark dataset and baseline," in *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2015, pp. 1037–1045. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CVPR.2015.7298706>
- [20] Caltech. (2012) Caltech pedestrian detection benchmark. [Online]. Available: <https://bit.ly/3pkn93o>
- [21] Pascal. (2012) INRIA person dataset. [Online]. Available: <https://bit.ly/3IAO6Hw>
- [22] A. Geiger, P. Lenz, and R. Urtasun, "Are we ready for autonomous driving? The KITTI vision benchmark suite," in *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2012. [Online]. Available: <https://bit.ly/3n6oBnq>
- [23] X. Yu, Y. Si, and L. Li, "Pedestrian detection based on improved faster rcnn algorithm," in *2019 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*, 2019, pp. 346–351. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICCCChina.2019.8855960>
- [24] Y. He, C. Zhu, and X.-C. Yin, "Mutual-supervised feature modulation network for occluded pedestrian detection," 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3C14eyn>
- [25] F. B. Tesema, H. Wu, M. Chen, J. Lin, W. Zhu, and K. Huang, "Hybrid channel based pedestrian detection," *Neurocomputing*, vol. 389, pp. 1–8, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.12.110>
- [26] C. Kyrkou, "Yolopeds: efficient real time single shot pedestrian detection for smart camera applications," *IET Computer Vision*, vol. 14, no. 7, pp. 417–425, Oct 2020. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1049/iet-cvi.2019.0897>
- [27] J. Redmon and A. Farhadi, "Yolo9000: Better, faster, stronger," in *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, July 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/3nuyCv1>
- [28] W. Liu, D. Anguelov, D. Erhan, C. Szegedy, S. Reed, C.-Y. Fu, and A. C. Berg, "SSD: single shot multibox detector," in *Computer Vision – ECCV 2016*, B. Leibe, J. Matas, N. Sebe, and M. Welling, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 21–37. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-319-46448-0_2
- [29] F. Chabot, Q.-C. Pham, and M. Chaouch, "Lap-net : Automatic balanced loss and optimal assignment for real-time dense object detection," 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3FYZDPo>
- [30] K. Zhou, L. Chen, and X. Cao, "Improving multispectral pedestrian detection by addressing modality imbalance problems," 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2Z6qKaV>
- [31] W. Wang, "Detection of panoramic vision pedestrian based on deep learning," *Image and Vision Computing*, vol. 103, p. 103986, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.imavis.2020.10398>
- [32] I. Shopovska, L. Jovanov, and W. Philips, "Deep visible and thermal image fusion for enhanced pedestrian visibility," *Sensors*, vol. 19, no. 17, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s19173727>
- [33] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, and A. Farhadi, "You only look once: Unified, real-time object detection," 2016. [Online]. Available: <https://bit.ly/3aWg3tO>
- [34] D. Heo, E. Lee, and B. Chul Ko, "Pedestrian detection at night using deep neural networks and saliency maps," *Journal of Imaging Science and Technology*, vol. 61, no. 6, pp. 604 031–604 039, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2352/J.ImagingSci.Technol.2017.61.6.060403>
- [35] J. Redmon and A. Farhadi, "Yolov3: An incremental improvement," 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/30Lg81v>
- [36] G. Jocher, A. Stoken, J. Borovec, NanoCode012, A. Chaurasia, TaoXie, L. Changyu, V. Abhiram, Laughing, tkianai, yxNONG, A. Hogan,

- lorenzomamma, AlexWang1900, J. Hajek, L. Diaconu, Marc, Y. Kwon, oleg, wanghaoyang0106, Y. Defretin, A. Lohia, ml5ah, B. Milanko, B. Fineran, D. Khromov, D. Yiwei, Doug, Durgesh, and F. Ingham, “ultralytics/yolov5: v5.0 - YOLOv5-P6 1280 models, AWS, Supervise.ly and YouTube integrations,” Apr. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5281/zenodo.4679653>
- [37] D. Olmeda, C. Premebida, U. Nunes, J. M. Armingol, and A. de la Escalera, “Pedestrian detection in far infrared images,” *Integrated Computer-Aided Engineering*, vol. 20, no. 4, pp. 347–360, 2013. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.3233/ICA-130441>
- [38] Teledyne Flir. (2021) Free flir thermal dataset for algorithm training. Teledyne FLIR LLC All rights reserved. [Online]. Available: <https://bit.ly/2Xxe3F4>
- [39] NightOwls. (2021) About nightowls. NightOwls Datasets. [Online]. Available: <https://bit.ly/3pof6m9>
- [40] M. Everingham, L. Van Gool, C. K. I. Williams, J. Winn, and A. Zisserman, “The Pascal Visual Object Classes (VOC) Challenge,” *International Journal of Computer Vision*, vol. 88, no. 2, pp. 303–338, Jun. 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11263-009-0275-4>



UN ENFOQUE DE APRENDIZAJE PROFUNDO PARA ESTIMAR LA FRECUENCIA RESPIRATORIA DEL FOTOPLETISMOGRAMA

A DEEP LEARNING APPROACH TO ESTIMATE THE RESPIRATORY RATE FROM PHOTOPLETHYSMOGRAM

Lucas C. Lampier^{1,*} , Yves L. Coelho¹ , Eliete M. O. Caldeira¹ ,
 Teodiano F. Bastos-Filho¹

Recibido: 15-05-2021, Recibido tras revisión: 18-08-2021, Aceptado: 20-09-2021, Publicado: 01-01-2022

Resumen

Este trabajo presenta una metodología para entrenar y probar una red neuronal profunda (*Deep Neural Network* – DNN) con datos de fotopletismografías (*Photoplethysmography* – PPG), con la finalidad de llevar a cabo una tarea de regresión para estimar la frecuencia respiratoria (*Respiratory Rate* – RR). La arquitectura de la DNN está basada en un modelo utilizado para inferir la frecuencia cardíaca (FC) a partir de señales PPG ruidosas. Dicho modelo se ha optimizado a través de algoritmos genéticos. En las pruebas realizadas se usaron BIDMC y CapnoBase, dos conjuntos de datos de acceso abierto. Con CapnoBase, la DNN logró un error de la mediana de 1,16 respiraciones/min, que es comparable con los métodos analíticos reportados en la literatura, donde el mejor error es 1,1 respiraciones/min (excluyendo el 8 % de datos más ruidosos). Por otro lado, el conjunto de datos BIDMC aparenta ser más desafiante, ya que el error mínimo de la mediana de los métodos reportados en la literatura es de 2,3 respiraciones/min (excluyendo el 6 % de datos más ruidosos). Para este conjunto de datos la DNN logra un error de mediana de 1,52 respiraciones/min.

Palabras clave: redes neuronales profundas, fotopletismografía, frecuencia respiratoria

Abstract

This article describes the methodology used to train and test a Deep Neural Network (DNN) with Photoplethysmography (PPG) data performing a regression task to estimate the Respiratory Rate (RR). The DNN architecture is based on a model used to infer the heart rate (HR) from noisy PPG signals, which is optimized to the RR problem using genetic optimization. Two open-access datasets were used in the tests, the BIDMC and the CapnoBase. With the CapnoBase dataset, the DNN achieved a median error of 1.16 breaths/min, which is comparable with analytical methods in the literature, in which the best error found is 1.1 breaths/min (excluding the 8 % noisiest data). The BIDMC dataset seems to be more challenging, as the minimum median error of the literature's methods is 2.3 breaths/min (excluding 6 % of the noisiest data), and the DNN based approach achieved a median error of 1.52 breaths/min with the whole dataset.

Keywords: Deep Neural Networks, Photoplethysmography, Respiratory Rate

^{1,*}Postgraduate Program in Electrical Engineering, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória-ES, Brazil
 Autor para correspondencia ✉: lucas.lampier@hotmail.com.

Forma sugerida de citación: Lampier, L. C.; Coelho, Y. L.; Caldeira, E. M. O. y Bastos-Filho, T. F. "Un enfoque de aprendizaje profundo para estimar la frecuencia respiratoria del fotopletismograma," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 27, pp. 96-104, 2022. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n27.2022.09>.

1. Introducción

La frecuencia respiratoria (Respiratory Rate, RR) es un indicador importante del estado fisiológico de una persona, de manera especial en el monitoreo de enfermedades pulmonares. Esta señal fisiológica se mide tradicionalmente por medio de una espirometría, neumografía o electromiografía [1]. Estas metodologías son costosas y utilizadas en ambientes médicos. La fotoplethismografía (Photoplethysmography, PPG) es una técnica que mide la frecuencia cardíaca utilizando un oxímetro, mucho más económico que los métodos tradicionales de medición de la RR. Estudios recientes muestran que puede ser captada aun remotamente utilizando la cámara de un teléfono inteligente [2]. Considerando que la respiración tiene influencia sobre los ciclos cardíacos, la información de la RR también se presenta en la señal PPG [3].

Varias metodologías reportadas en la literatura han estimado exitosamente la RR con un error pequeño a partir de la señal PPG [1], [4–8], sin embargo, la atenuación del ruido es todavía un reto para obtener predicciones robustas a partir de señales PPG de baja calidad. Este artículo presenta una manera alternativa para inferir la frecuencia respiratoria a partir de señales PPG. Las técnicas de aprendizaje profundo (Deep Learning) han sido ampliamente utilizadas en problemas de procesamiento de imágenes, sin embargo, también son una herramienta poderosa en problemas de una dimensión (1D), limitadas principalmente por el tamaño y la calidad del conjunto de datos, y también por el poder computacional disponible durante el proceso de entrenamiento. A medida que crece la data disponible en línea, así como también el poder computacional del hardware, las DNN están siendo probadas en una gran variedad de problemas que anteriormente estaban dominados por procedimientos analíticos.

Con respecto al procesamiento de señales PPG, Ravichandran *et al.* [1] mostraron que una DNN puede utilizarse para extraer la señal RR a partir de señales PPG. Biswas *et al.* [9] extraen el pulso a partir de la PPG utilizando una DNN.

Este trabajo propone el uso de una DNN para extraer mediciones confiables de RR a partir de señales PPG, utilizando procedimientos analíticos para extraer señales secundarias de la PPG y una DNN para inferir la RR.

1.1. Trabajos afines

De acuerdo con Charlton *et al.* [10], los algoritmos PPG-RR pueden resumirse en cinco pasos:

- *Extraer las señales respiratorias.* Consiste en encontrar la variación de la señal PPG relacionada a los ciclos respiratorios.

- *Fusionar las señales respiratorias.* Las diferentes señales extraídas pueden combinarse para crear una señal única con mayor robustez ante el ruido (opcional).
- *Estimar la RR a partir de una ventana.* Se segmenta una ventana de la señal generada y se estima la RR a partir de esa aquella.
- *Combinar las estimaciones.* El resultado de diferentes ventanas puede utilizarse para generar una estimación final (opcional).
- *Filtrado de calidad.* Puede asignarse un score de calidad a la ventana PPG, para excluir predicciones de baja calidad (opcional).

Algunos de los primeros enfoques que estiman la RR a partir de PPG utilizan dos filtros Butterworth de segundo orden, uno pasa-alto y uno pasa-bajo con frecuencias de corte 0,1 Hz y 5 Hz, respectivamente, para eliminar el ruido de la PPG. Luego se estima la señal respiratoria aplicando un filtro pasa-bajo de 0,4 Hz a la señal PPG [11]. Madhav *et al.* [12] aplicaron una relación de valor singular (*Singular Value Ratio*, SVR) para extraer la periodicidad respiratoria de la PPG, y utilizaron análisis de los componentes principales (*Principal Component Analysis*, PCA) para estimar la actividad respiratoria del primer componente principal. En otro enfoque propuesto por Nam y colaboradores [13], se capturó una señal PPG utilizando la cámara de un teléfono inteligente, y luego se estimó la RR encontrando la frecuencia correspondiente al pico más alto del espectro generado por el periodograma de Welch [7].

Se compararon cinco metodologías diferentes en el trabajo realizado por Pimentel y colaboradores [4], incluyendo la desarrollada por los autores. La más antigua fue propuesta por el equipo encabezado por Nilsson [14], y consiste en aplicar un filtro Bessel pasa-banda de orden 16 con frecuencias de corte 0,13 Hz y 0,48 Hz (7,8 a 28,8 respiraciones/min). La segunda propuesta [8], utiliza la transformada de Fourier sobre la señal PPG y obtiene la frecuencia con la mayor amplitud en el ancho de banda entre 0,08 Hz y 0,4 Hz. En la metodología sugerida por Tarassenko [5], los modelos autorregresivos (AR) estiman un filtro utilizando la señal PPG, y de acuerdo con ellos la frecuencia del polo de mayor magnitud dentro del intervalo del ancho de banda de la RR (0,08 Hz a 0,7 Hz) corresponde a la RR. En lugar de utilizar la propia PPG [6] se estiman tres características temporales relacionadas con la RR: variación de la intensidad inducida por la respiración (*Respiratory-Induced Intensity Variation*, RIIV), variación de la amplitud inducida por la respiración (*Respiratory-Induced Amplitude Variation*, RIAV) y variación de la frecuencia inducida por la respiración (*Respiratory-Induced Frequency Variation*,

RIFV). Luego, se calcula el espectro de potencia de cada una y se estima la RR a partir de cada una tomando la frecuencia de mayor amplitud en la banda de frecuencias de la RR (0,067 Hz – 1,08 Hz) y calculando la media de las tres frecuencias. Finalmente, la metodología mostrada por Pimentel *et al.* [4] combina el modelado AR propuesto en Tarassenko [5], con la fusión de resultados de las tres características propuestas por Karlen y su equipo [6].

Los resultados presentados [4] muestran que para el conjunto de datos CapnoBase [15], el método que presentó el error más bajo [6], es decir, con un error absoluto de la mediana (*Median Absolute Error*, MdAE) de 0,8 respiraciones/min utilizando una ventana de 62 s; sin embargo, 46 % de los datos de PPG fueron excluidos debido al ruido. El segundo mejor en este conjunto de datos fue el citado por Tarassenko [5], que alcanzó un MdAE de 1,1 respiraciones/min y conservó 92 % de la data. El conjunto de datos BIDMC parece ser más desafiante, debido a que el mejor MdAE fue obtenido por el método propuesto por Shelley [8] (2,3 respiraciones/min), el cual también fue uno de los métodos que conservó la mayoría de la data (94 %).

Un trabajo reciente ha obtenido resultados aún más precisos [16], en el que un método deriva múltiples ondas de una señal PPG, mide su calidad y luego la utiliza como ponderación para combinarlas utilizando un suavizador de Kalman. Con este enfoque obtuvieron un error mediano de 0,2 respiraciones/min.

1.2. Redes neuronales profundas (Deep Neural Networks, DNN)

Para Goodfellow *et al.* [17], el aprendizaje profundo es un enfoque que puede manejar un paso importante en un problema de aprendizaje de máquina: la extracción de características. Su concepto consiste en concatenar múltiples capas de modelos simples, donde cada modelo «aprende» parte de los problemas-conceptos y, por tanto, un problema complejo puede dividirse en modelos más simples para ser resuelto de mejor manera. Un punto interesante de este enfoque es que realiza las tareas de aprendizaje automático (clasificación, regresión, agrupamiento, etc.) y también la extracción de características, en contraste con las técnicas poco profundas, en el que el paso de extracción de características debe hacerse de manera separada, en una etapa previa, y exige conocimiento del área. La limitación del enfoque de aprendizaje profundo es el conjunto de datos. Normalmente, los modelos de aprendizaje profundo tienen un gran número de valores a ser ajustados y, por tanto, necesitan grandes cantidades de datos para optimizarlos.

Existen algunos enfoques que instrumentaron técnicas de aprendizaje profundo para resolver problemas relacionados con data fisiológica. Biswas *et al.* [9] implementaron una DNN para estimar la frecuencia

cardíaca (*Heart Rate*, HR), teniendo como data de entrada una señal PPG obtenida de un sensor colocado en la muñeca del usuario. El modelo fue probado en un conjunto de datos desafiante, en el cual la señal PPG fue capturada durante varias actividades físicas, las cuales insertan ruido y artefactos en ella. La arquitectura del modelo estaba constituida por dos capas convolucionales de una dimensión seguidas de dos capas de gran memoria de corto plazo (*Long Short-Term Memory*, LSTM) y, finalmente, una capa densa. Esta arquitectura alcanzó un error absoluto medio (*Mean Absolute Error*, MAE) de $1,47 \pm 3,37$ latidos por minuto (*Beats Per Minute*, BPM).

En el trabajo [1] se presenta un enfoque de aprendizaje profundo para extraer la señal RR a partir de la señal PPG. Su modelo consta de varias capas convolucionales conectadas a varias capas deconvolucionales que transforman la señal PPG en la señal respiratoria, y luego calculan a partir de ella la RR. Su método fue probado en dos conjuntos de datos independientes, CapnoBase y Vortal [18], y alcanzó un error cuadrático medio (*Mean Squared Error*, MSE) de 0,262 en el primer conjunto de datos y de 0,145 en el segundo, lo que corresponde a una raíz cuadrada del error cuadrático medio (*Root Mean Squared Error*, RMSE) de aproximadamente 3,1 respiraciones/min y 2,3 respiraciones/min, respectivamente.

2. Materiales y métodos

2.1. Conjuntos de datos

En las pruebas se utilizaron dos conjuntos de datos: el benchmark CapnoBase [15] y el de respiración BIDMC PPG [19]. El primero consta de 42 registros [20], de 8 minutos cada uno, que contienen la PPG y la señal de dióxido de carbono (CO₂) inhalado y exhalado, ambos recolectados a una frecuencia de muestreo de 300 Hz. El conjunto BIDMC PPG [21] contiene 8 minutos de registros de señales PPG y respiración de CO₂ de 53 voluntarios, recolectados a 125 Hz.

2.2. Características respiratorias del fotepletismograma

A partir de la PPG se generaron tres señales relacionadas con la respiración [6]:

1. Variación de la intensidad inducida por la respiración (*Respiratory-Induced Intensity Variation*, RIIV). A medida que la amplitud de la señal PPG varía en sincronía con el ciclo respiratorio, esta característica puede utilizarse para estimar la RR [3]. Esta serie es estimada tomando el valor de la intensidad de cada pico en la señal PPG [4].

2. Variación de la amplitud inducida por la respiración (*Respiratory-Induced Amplitude Variation*, RIAV). Los ciclos respiratorios inducen una variación de amplitud en las ondas PPG, la cual puede estimarse calculando la variación en la diferencia pico-valle en las ondas PPG [6].
3. Variación de la frecuencia inducida por la respiración (*Respiratory-Induced Frequency Variation*, RIFV). La variación en la HR también está altamente ligada a los eventos respiratorios de inspiración y expiración. Las inspiraciones aumentan la HR y las expiraciones la reducen. Esta señal puede representarse por el intervalo de tiempo entre picos consecutivos de la PPG [6].

La Figura 1 muestra una representación gráfica de las características RIIV, RIAV y RIFV.

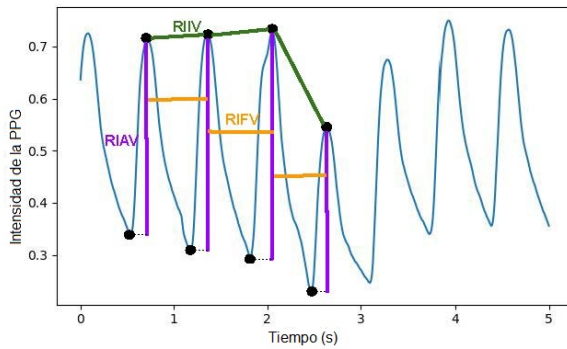


Figura 1. Características relacionadas a la RR extraídas de la PPG

2.3. Índice de calidad de la señal (*Signal Quality Index, SQI*)

El SQI cuantifica la contaminación por ruido y artefactos en la ventana PPG analizada. Este índice se utiliza para excluir las señales que no alcanzan una calidad mínima. En este trabajo, el SQI se calcula abordando dos puntos: «líneas planas» en la señal, y concordancia entre diferentes detectores de picos [4]. Las «líneas planas» se definen como las partes de la señal PPG en las que la diferencia entre muestras consecutivas es cercana a cero. Para detectarlas se realizó el siguiente método:

1. La señal *StdDiff* es calculada como sigue:

$$StdDiff[i - wdw] = \sigma(diff(PPG[i - wdw : i])),$$

$$for i = wdw, wdw + 1, wdw + 2, \dots, N.$$

Donde $\sigma(\cdot)$ es la operación que calcula la desviación estándar, $diff(\cdot)$ es la primera derivada de la operación, PPG es la señal PPG , wdw es la longitud de la ventana, que, en este caso, es la parte entera de $1,5 s \times frecuencia de$

muestreo (1,5 s es el intervalo de tiempo entre picos consecutivos en el valor mínimo de HR, que normalmente es 40 BPM), y N es el número de muestras en la señal PPG .

2. Se inicializa el arreglo Q con unos y el mismo tamaño que la PPG : $Q = ones(N)$
3. Se calcula el valor umbral: $th = \mu(StdDiff) - \alpha \times \sigma(StdDiff)$, donde $\mu(\cdot)$ es la operación que calcula la media y α es un parámetro ajustable.
4. Los valores de k se hacen cero en las ubicaciones correspondientes donde $StdDiff$ es muy bajo:
 $for i = wdw, wdw + 1, wdw + 2, \dots, N : \{$
 $if (StdDiff[i - wdw] < (th)) : \{$
 $Q[i + wdw] = 0$
 $\}$
 $\}$
5. El valor K es la proporción entre los valores iguales a Q dentro de la ventana PPG analizada, y su tamaño total.

La concordancia entre dos detectores de picos fue realizada de la siguiente manera: si la diferencia entre la posición encontrada por los detectores en el mismo pico es menor que 150 ms, se considera que ambos detectores concuerdan en ese pico y, por lo tanto, su posición es correcta; de lo contrario, el pico se considera como un ruido [4]. Entonces se aplica un score F1 para medir la concordancia entre dos detectores de picos en el segmento analizado de la señal. Los métodos de detección de picos fueron proporcionados por dos librerías diferentes de Python: Neurokit2 [22], que implementa el algoritmo de detección de picos PPG descrito en [23] y la librería Heartpy [24], en la que los autores desarrollan su propia técnica de detección de picos.

Finalmente, el SQI se calcula como: $SQI = F1 \times K$, donde F1 es la concordancia entre picos y K es la proporción de «línea plana».

2.4. Arquitectura DNN

La arquitectura del modelo se inspiró en la CorNET [9], que tiene dos bloques convolucionales, cada uno de los cuales contiene una capa convolucional (32 filtros con un kernel de tamaño 40), una capa de normalización *batch*, una capa de activación con unidades lineales rectificadas (*Rectified Linear Units*, ReLU) y, finalmente, una capa *maxpooling* con un tamaño de pool de 4 (para el entrenamiento se utilizó una capa *dropout* con una tasa de eliminación (*drop rate*) de 0.1). Luego de los bloques convolucionales se concatenan dos capas LSTM, cada una con 128 unidades y función de activación tangente hiperbólica (*tanh*). Para la predicción se utilizó una neurona con activación lineal.

La arquitectura propuesta para predecir la RR es el resultado de la optimización mediante algoritmos

genéticos, de los parámetros de la CorNET que se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros probados en la arquitectura DNN

Parámetros	Posibilidades
# de bloques convolucionales	0/1/2
# de filtros convolucionales por capa	128/64/32
Longitud de los filtros convolucionales	11/21/31
# de capas LSTM	1/2/3
# de unidades LSTM por capa	128/64/32
# de capas densas	0/1/2
# de neuronas por capa	128/64/32/16

Los parámetros mencionados arriba son optimizados, mientras que para los parámetros no mencionados se utiliza la definición por defecto en la librería Keras [25]. Considerando que el número de combinaciones es muy grande (2916), los parámetros se optimizan utilizando algoritmos genéticos. Esta estrategia comienza definiendo una población de L modelos con parámetros aleatorios, y luego todos los modelos son entrenados, probados y categorizados de acuerdo con el resultado. Los M modelos con mejor desempeño se conservan mientras que los otros se descartan. El conjunto de los modelos conservados se denomina padres, y luego se generan $M - J$ nuevos modelos tomando valores de tres modelos diferentes (un padre para los parámetros convolucionales, uno para las capas LSTM, y otro para las capas densas). Adicionalmente, existe una probabilidad de H % de que los parámetros de los nuevos modelos cambien aleatoriamente (estos cambios se denominan mutaciones); estos nuevos modelos se denominan descendientes. Asimismo, existen J modelos nuevos generados de forma completamente aleatoria, y a este conjunto se le asigna el nombre de extranjeros. Luego, los conjuntos de padres, descendientes y extranjeros se unen comienza una nueva interacción.

El procedimiento se repite por E épocas (*epochs*). La idea es que los parámetros que disminuyen el error de estimación prevalezcan en el conjunto de padres, y su combinación pueda generar un modelo en el conjunto de descendientes que mejore el resultado de sus padres. Asimismo, nuevos parámetros aleatorios se insertan con las mutaciones y los extranjeros creados en cada iteración. Estas adiciones aleatorias establecen una posibilidad de que la población de modelos salga de un mínimo local subóptimo. Para este experimento, los parámetros de la optimización mediante algoritmos genéticos fueron los siguientes: $L = 45$, $M = 20$, $J = 5$, $E = 20$ y $H = 20$, lo cual redujo el número de modelos entrenados de 2916 a 520 (25 nuevos modelos/época \times 20 épocas + los primeros 20 padres). El mejor modelo encontrado es una DNN con 2 bloques convolucionales con 32 filtros y un MaxPooling de una dimensión (tamaño de kernel 2) en cada capa convolucional, un tamaño de kernel de 21, y activación ReLU. Luego, una capa LSTM con 32 neuronas, y finalmente,

2 capas densas, una con 32 neuronas y activación ReLU y la última con una neurona y activación lineal. La Figura 2 presenta un resumen de la arquitectura DNN final.

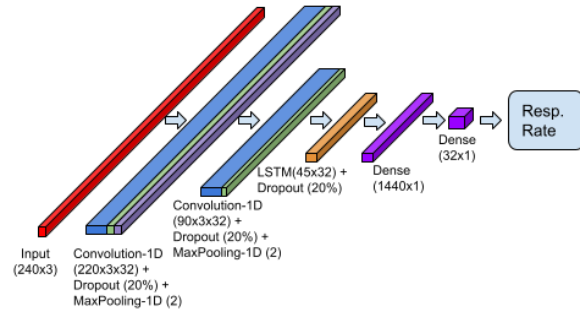


Figura 2. Arquitectura de red neuronal seleccionada

2.5. Procedimiento de entrenamiento y prueba

Se utilizaron dos conjuntos de datos para entrenar y evaluar los modelos BIDMC [19] y CapnoBase [15]. Se empleó el método de validación cruzada con cuatro grupos: para cada base de datos, sus archivos se dividieron en cuatro grupos, cada uno de los cuales contenía el 25 % de los datos en cada conjunto. Luego, se realizó el mismo procedimiento en cada grupo: primero, se encontraron los picos de la PPG utilizando la librería Neurokit2 [22]. Posteriormente, utilizando una ventana deslizante de 64 s con un paso de 4 s, se calcularon las tres señales relacionadas a la RR (RIIV, RIAV y RIFV), que luego se interpolaron a una frecuencia de muestreo artificial de 4 Hz y se extrajeron las primeras 240 muestras (60 s) de la ventana, generando así una muestra con 240 líneas (pasos de tiempo) y tres columnas (correspondientes a RIIV, RIAV y RIFV). El paso final consiste en normalizar la data, de manera que cada canal de la nueva muestra tenga media 0 y varianza 1: $Y = (X - \mu(X))/\sigma(X)$, donde Y es la serie normalizada, X la serie de entrada, $\mu(\cdot)$ es la operación que calcula la media y $\sigma(\cdot)$ es la operación que calcula la desviación estándar.

Para obtener el valor de referencia de la RR, se localiza el pico de CO_2 correspondiente a cada muestra utilizando el módulo Respiratorio de Neurokit2, y luego se calcula la mediana de la RR de la muestra de 64 s, tomando la inversa del valor de la mediana en el intervalo de tiempo entre picos consecutivos.

Posteriormente se dividen los cuatro grupos de muestras normalizadas en conjuntos de entrenamiento y prueba, donde el conjunto de entrenamiento tiene tres grupos y el de prueba tiene uno. Los procedimientos de entrenamiento y prueba se repitieron cuatro veces, para que cada grupo pudiera ser evaluado una vez en el conjunto de prueba. Cada uno de los 4 modelos (uno para cada grupo de prueba) fue entrenado por 1400 épocas utilizando el optimizador Adam con

parámetros estándar de Keras [25]. El procesamiento se realizó en un computador Ryzen 5 3500X con 16 GB de memoria RAM y un NVIDIA GeForce RTX 2060 SUPER con 8 GB de memoria dedicada. Se utilizó la métrica del error cuadrático medio para calcular la pérdida (loss) en cada época. La Figura 3 presenta la curva de pérdida resultante.

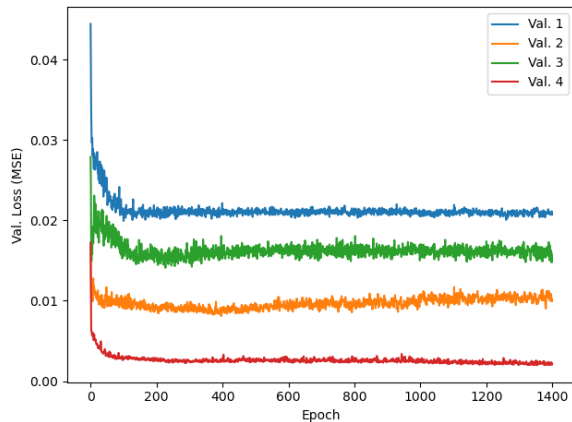


Figura 3. Curva Ts para las 4 instancias de la red

Los grupos de validación 1 y 4 tuvieron una pérdida decreciente hasta la época 1400, el grupo 2 tuvo su pérdida mínima alrededor de la época 400 y el grupo de validación 3 tuvo su mínimo alrededor de la época 200, y luego decreció nuevamente después de la época 800. El gráfico se utilizó para determinar el número de épocas de entrenamiento de las DNN, dado que la mitad de los grupos de validación se mantienen decreciendo hasta la época 1400 y la capa *dropout* parece evitar el sobreajuste en los otros grupos, debido a que la pérdida no se incrementa mucho luego de los mínimos. El proceso se repitió revolviendo la data y los grupos, y entrenando cuatro DNN (una para cada grupo de entrenamiento-prueba) durante 1400 épocas para realizar la validación cruzada.

3. Resultados y discusión

La Tabla 2 y la Tabla 3 presentan el MdAE y la desviación estándar del error, así como también la raíz cuadrada del error cuadrático medio y el umbral SQI utilizado para filtrar las muestras ruidosas. Probando diferentes valores de SQI es posible analizar la influencia de la calidad de la señal en el resultado.

Los resultados de MdAE alcanzados por nuestro modelo sobre el conjunto de datos CapnoBase son compatibles con los de las mejores metodologías comparadas [4], en las cuales el mejor MdAE para una ventana de 64 s fue 0,8 respiraciones/min, obtenidas utilizando el método [6]. Sin embargo, la metodología excluye el 36 % de las muestras que no alcanzan el

mínimo SQI. El segundo mejor fue el método [5], alcanzando un MdAE de 1,1 respiraciones/min para el 92 % de las mejores muestras.

Tabla 2. Medidas de error en las predicciones de la RR utilizando la DNN

Conjunto de datos BIDMC				
SQI	N (%)	MdAE (latidos/min*)	STD (latidos/min)	RMSE (latidos/min)
0,90	87	1,39	6,55	6,59
0,93	80	1,39	6,57	6,62
0,97	66	1,26	6,51	6,55
1,00	37	1,04	4,47	4,47
0,00	100	1,52	6,86	6,94

* latidos/min es igual a respiraciones/min

Para el mismo conjunto de datos, nuestro método obtuvo un MdAE de 1,16 respiraciones/min (calculado concatenando los resultados de todas las cuatro pruebas), y un MdAE de 1,11 respiraciones/min con el 93 % de las muestras con el SQI más alto. Sin embargo, el RMSE del modelo DNN propuesto no alcanzó el error del RespNET [1], que es 3,1 respiraciones/min, indicando que nuestro modelo todavía puede ser refinado para alcanzar mejores resultados.

Tabla 3. Medidas de error en las predicciones de la RR utilizando la DNN

Conjunto de datos CapnoBase				
SQI	N (%)	MdAE (latidos/min*)	STD (latidos/min)	RMSE (latidos/min)
0,90	98	1,16	5,93	5,94
0,93	97	1,16	5,94	5,95
0,97	93	1,11	5,65	5,66
1,00	73	1,06	4,46	4,97
0,00	100	1,16	5,88	5,90

* latidos/min es igual a respiraciones/min

El modelo DNN propuesto alcanzó errores menores en el conjunto de datos BIDMC, que los otros métodos comparados [4]. Con todas las muestras, nuestro método obtuvo un MdAE de 1,52 respiraciones/min en este conjunto de datos, mientras que el error más pequeño obtenido [4] para este conjunto de datos fue para la metodología propuesta [8], con un MdAE de 2,3 respiraciones/min. Esta mejora en el resultado muestra el éxito de los métodos DNN para procesar data fisiológica. En otras palabras, con un conjunto de datos suficientemente grande y con la complejidad adecuada, puede extraerse información importante de la data, mientras se descartan el ruido y los artefactos.

También puede notarse en la Tabla 2 y en la Tabla 3 que el MdAE por sí mismo no mide un buen resultado. Además, al tener un MdAE bajo los resultados presentan un RMSE considerable, ya que se refuerza la alta variación de los resultados y el cálculo de la mediana no toma en cuenta lo mucho que se desvían los resultados extremos del valor deseado, solo se calculan los valores en el centro. Esto puede observarse

en el gráfico de dispersión entre las predicciones y los valores verdaderos presentados en la Figura 4 y en la Figura 5.

Para comparar mejor el desempeño de nuestro método contra la literatura revisada, la Tabla 4 presenta un resumen de los resultados de cada método. El mejor resultado en el conjunto de datos CapnoBase obtenido por el método propuesto por Khreis *et al.* [16], que alcanzó un MdAE de 0,2 respiraciones/min, mientras que los métodos de referencia previos obtuvieron uno de 0,8 respiraciones/min en el mismo conjunto de datos (excluyendo de la data el 36 % más ruidoso). El método desarrollado alcanzó un MdAE de 1,2 respiraciones/min utilizando la data completa.

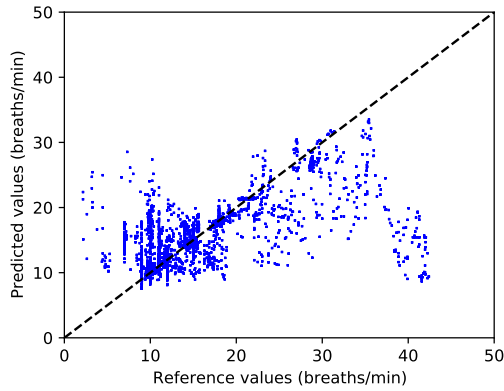


Figura 4. Dispersión de las predicciones y los valores verdaderos de la RR en el conjunto de datos CapnoBase. Las muestras graficadas tienen un SQI por encima de 0,9.

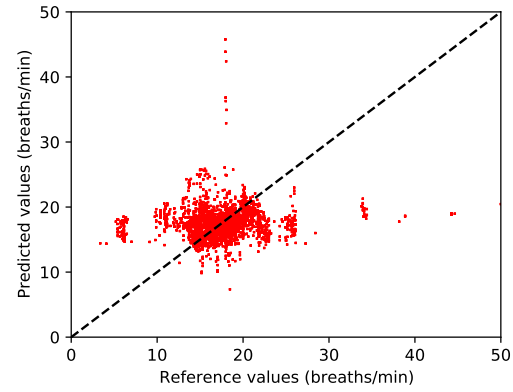


Figura 5. Dispersión de las predicciones y los valores verdaderos de la RR en el conjunto de datos BIDMC. Las muestras graficadas tienen un SQI por encima de 0,9

La base de datos BIDMC parece más desafiante, dado que los métodos probados sobre este conjunto de datos mostraron un MdAE mínimo de 2,3 respiraciones/min, y nuestro método alcanzó un MdAE de 1,5 respiraciones/min. Khreis *et al.* [16] no utilizaron el conjunto de datos BIDMC en su estudio, por lo que no fue posible comparar los resultados con su método sobre este conjunto de datos.

Tabla 4. Medidas de error de diferentes métodos presentados en la literatura. Se incluye N, que es el porcentaje de ventanas PPG utilizadas, el error absoluto mediano (*Median Absolute Error*, MdAE) y sus percentiles P_{25} y P_{75} , la raíz cuadrada del error cuadrático medio (*Root Mean Squared Error*, RMSE) y error absoluto medio (*Mean Absolute Error*, MAE) y su desviación estándar (*standard deviation*, STD)

Método	Conjunto de datos							
	Capnobase				BIDMC			
	N (%)	MdAE (25TH - 75TH)	RMSE	MAE (STD)	N (%)	MdAE (25TH - 75TH)	RMSE	MAE (STD)
Propuesto	100	1,2 (0,4-3,4)	5,9	3,1 (5,0)	100	1,5 (0,6-3,6)	6,9	3,4 (6,0)
Khreis (2020)	100	0,2 (0,1-0,9)	-	-	-	-	-	-
Ravichandra (2019)	-	-	3,1	-	-	-	-	-
Pimentel (2017)	92	1,9 (0,3-3,4)	-	-	94	2,7 (1,5-5,3)	-	-
Shelley (2016)	92	2,2 (0,2-8,3)	-	-	94	2,3 (0,9-7,9)	-	-
Karlen (2013)	64	0,8 (0,3-2,7)	-	-	34	5,7 (1,5-9,7)	-	-
Fleming (2007)	92	1,1 (0,4-3,5)	-	-	94	5,5 (2,7-8,1)	-	-
Nilsson (2000)	92	10,2 (4,8-12,4)	-	-	94	4,6 (2,5-8,5)	-	-

4. Conclusiones

Este trabajo presenta una metodología para utilizar un enfoque DNN para estimar la RR utilizando señales PPG. El modelo se inspiró en una arquitectura exitosa previa, que fue optimizada para nuestro problema utilizando una optimización genética adaptada. Las entradas a la DNN son tres señales respiratorias relacionadas con la RR extraídas de la PPG, y la salida es el valor de RR correspondiente. Para probar la metodología, los archivos de dos conjuntos de datos de acceso abierto se dividieron en cuatro grupos, manteniendo la misma proporción de los archivos de cada conjunto de datos en cada grupo. Se repitió cuatro veces un procedimiento de entrenamiento-prueba, cada uno con tres grupos para entrenar y uno para probar, por lo que cada grupo se utilizó una vez como prueba. Los resultados alcanzados son comparables con la mayoría de las metodologías analíticas de referencia (benchmark) utilizando el conjunto de datos CapnoBase, y la DNN los superó en el conjunto de datos BIDMC, que es más desafiante, mostrando el éxito de la metodología para procesar data fisiológica.

Aunque exitoso, usualmente, el desempeño de los métodos analíticos se acompaña por umbrales heurísticos o un número grande de parámetros libres entonados por un experto, los cuales pueden impedir la generalización de las metodologías desarrolladas. Sin embargo, los enfoques DNN están diseñados para generalizar la data lo mayor posible y tener tan poco preprocesamiento como sea posible.

Agradecimientos

Los autores agradecen al CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), una agencia del Ministerio Brasileño de Ciencia, Tecnología, Innovaciones y Comunicaciones que apoya el desarrollo científico y tecnológico, FAPES (Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo), una agencia del Estado de Espírito Santo, Brasil, que apoya el desarrollo científico y tecnológico, y CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) por el apoyo financiero otorgado a este trabajo.

Referenciass

[1] V. Ravichandran, B. Murugesan, V. Balakarthikeyan, K. Ram, S. P. Preejith, J. Joseph, and M. Sivaprakasam, "RespNet: A deep learning model for extraction of respiration from photoplethysmogram," in *2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, 2019, pp. 5556–5559. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/EMBC.2019.8856301>

[2] A. Floriano, L. Lampier, R. S. Rosa, E. Caldeira, and T. Bastos-Filho, "Remote vital sign monitoring in accidents," *Polytechnica*, vol. 4, no. 1, pp. 26–32, Apr. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s41050-020-00027-1>

[3] D. J. Meredith, D. Clifton, P. Charlton, J. Brooks, C. W. Pugh, and L. Tarassenko, "Photoplethysmographic derivation of respiratory rate: a review of relevant physiology." *Journal of medical engineering & technology*, vol. 36, no. 1, pp. 1–7, jan 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3109/03091902.2011.638965>

[4] M. A. Pimentel, A. E. Johnson, P. H. Charlton, D. Birrenkott, P. J. Watkinson, L. Tarassenko, and D. A. Clifton, "Toward a robust estimation of respiratory rate from pulse oximeters," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 64, no. 8, pp. 1914–1923, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TBME.2016.2613124>

[5] S. G. F. L. Tarassenko, "A comparison of signal processing techniques for the extraction of breathing rate from the photoplethysmogram," *International Journal of Biological and Medical Sciences*, vol. 1, no. 6, pp. 366–370, 2007. [Online]. Available: <https://bit.ly/3Cprqqg>

[6] W. Karlen, S. Raman, J. M. Ansermino, and G. A. Dumont, "Multiparameter respiratory rate estimation from the photoplethysmogram." *IEEE transactions on bio-medical engineering*, vol. 60, no. 7, pp. 1946–1953, jul 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TBME.2013.2246160>

[7] L. Nilsson, T. Goscinski, S. Kalman, L. G. Lindberg, and A. Johansson, "Combined photoplethysmographic monitoring of respiration rate and pulse: A comparison between different measurement sites in spontaneously breathing subjects," *Acta Anaesthesiologica Scandinavica*, vol. 51, no. 9, pp. 1250–1257, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/j.1399-6576.2007.01375.x>

[8] K. H. Shelley, A. A. Awad, R. G. Stout, and D. G. Silverman, "The use of joint time frequency analysis to quantify the effect of ventilation on the pulse oximeter waveform." *Journal of clinical monitoring and computing*, vol. 20, no. 2, pp. 81–87, apr 2006. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10877-006-9010-7>

[9] D. Biswas, L. Everson, M. Liu, M. Panwar, B.-E. Verhoef, S. Patki, C. H. Kim, A. Acharyya, C. Van Hoof, M. Konijnenburg, and N. Van Helleputte, "Cornet: Deep learning framework for PPG-based heart rate estimation and biometric identification in ambulant environment," *IEEE Transactions on*

- Biomedical Circuits and Systems*, vol. 13, no. 2, pp. 282–291, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TBCAS.2019.2892297>
- [10] P. H. Charlton, D. A. Birrenkott, T. Bonnici, M. A. F. Pimentel, A. E. W. Johnson, J. Alastruey, L. Tarassenko, P. J. Watkinson, R. Beale, and D. A. Clifton, “Breathing rate estimation from the electrocardiogram and photoplethysmogram: A review,” *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, vol. 11, pp. 2–20, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/RBME.2017.2763681>
- [11] L. G. Lindberg, H. Ugnell, and P. A. Oberg, “Monitoring of respiratory and heart rates using a fibre-optic sensor,” *Medical & Biological Engineering & Computing*, vol. 30, no. 5, pp. 533–537, 1992. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/BF02457833>
- [12] K. V. Madhav, M. R. Ram, E. H. Krishna, K. N. Reddy, and K. A. Reddy, “Estimation of respiratory rate from principal components of photoplethysmographic signals,” *Proceedings of 2010 IEEE EMBS Conference on Biomedical Engineering and Sciences, IECBES 2010*, no. December, pp. 311–314, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/IECBES.2010.5742251>
- [13] Y. Nam, Y. Kong, B. Reyes, N. Reljin, and K. H. Chon, “Monitoring of heart and breathing rates using dual cameras on a smartphone,” *PLoS ONE*, vol. 11, no. 3, mar 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0151013>
- [14] L. Nilsson, A. Johansson, and S. Kalman, “Monitoring of respiratory rate in postoperative care using a new photoplethysmographic technique,” *Journal of Clinical Monitoring and Computing*, vol. 16, no. 4, pp. 309–315, 2000. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1023/A:1011424732717>
- [15] W. Karlen, “CapnoBase IEEE TBME Respiratory Rate Benchmark,” 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5683/SP2/NLB8IT>
- [16] S. Khreis, D. Ge, H. A. Rahman, and G. Carrault, “Breathing Rate Estimation Using Kalman Smoother with Electrocardiogram and Photoplethysmogram,” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 67, no. 3, pp. 893–904, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TBME.2019.2923448>
- [17] I. Goodfellow, Y. Bengio, and A. Courville, *Deep Learning*. MIT Press, 2016. [Online]. Available: <https://bit.ly/3Eh4Twb>
- [18] P. H. Charlton, T. Bonnici, L. Tarassenko, D. A. Clifton, R. Beale, and P. J. Watkinson, “An assessment of algorithms to estimate respiratory rate from the electrocardiogram and photoplethysmogram,” *Physiological measurement*, vol. 37, no. 4, pp. 610–626, apr 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/0967-3334/37/4/610>
- [19] A. L. Goldberger, L. A. Amaral, L. Glass, J. M. Hausdorff, P. C. Ivanov, R. G. Mark, J. E. Mietus, G. B. Moody, C. K. Peng, and H. E. Stanley, “PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: components of a new research resource for complex physiologic signals,” *Circulation*, vol. 101, no. 23, pp. e215–e220, jun 2000. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1161/01.cir.101.23.e215>
- [20] CapnoBase. (2020) Capnobase is a collaborative research project that provides an online database of respiratory signals and labels obtained from capnography, spirometry and pulse oximetry. [Online]. Available: <https://bit.ly/3EjfhKkm>
- [21] M. A. F. Pimentel, A. E. W. Johnson, P. H. Charlton, D. Birrenkott, P. J. Watkinson, L. Tarassenko, and D. A. Clifton, “Toward a robust estimation of respiratory rate from pulse oximeters,” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 64, no. 8, pp. 1914–1923, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TBME.2016.2613124>
- [22] D. Makowski, T. Pham, Z. J. Lau, J. C. Brammer, F. Lespinasse, H. Pham, C. Schölzel, and S. H. A. Chen, “Neurokit2: A python toolbox for neurophysiological signal processing,” *Behavior Research Methods*, vol. 53, no. 4, pp. 1689–1696, Feb 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3758/s13428-020-01516-y>
- [23] M. Elgendi, I. Norton, M. Brearley, D. Abbott, and D. Schuurmans, “Systolic peak detection in acceleration photoplethysmograms measured from emergency responders in tropical conditions,” *PLOS ONE*, vol. 8, no. 10, pp. 1–11, 10 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0076585>
- [24] P. van Gent, H. Farah, N. van Nes, and B. van Arem, “Heartpy: A novel heart rate algorithm for the analysis of noisy signals,” *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, vol. 66, pp. 368–378, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.trf.2019.09.015>
- [25] F. Chollet, “Keras: Deep learning for humans,” GitHub. Inc, 2015. [Online]. Available: <https://bit.ly/3dA0g57>



ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO DE D-BLAST MIMO SOBRE SDR-USRP

D-BLAST MIMO PERFORMANCE ANALYSIS OVER SDR-USRP

Freddy Cárdenas¹ , Jairo Otáñez¹ , Juan Inga^{2,*} ,
 Esteban Inga³ , Andrés Ortega⁴

Recibido: 13-05-2021, Recibido tras revisión: 29-11-2021, Aceptado: 08-12-2021, Publicado: 01-01-2022

Resumen

Este artículo describe la implementación de la técnica basada en multiplexación espacial D-BLAST sobre equipos de radio definido por *software* (SDR), específicamente usando USRP Ettus Research x310; con el objetivo de afrontar el problema de la diversidad espacial que posee el esquema de MIMO Alamouti, al no poder incrementar el número de antenas del transmisor respecto al del receptor. El escenario de simulación fue en un ambiente *indoor* usando las herramientas de programación gráfica con el *software Labview Communications*, logrando un diseño más robusto de codificación basado en la no linealidad de ecuaciones matriciales, mitigando, de este modo, a través de la redundancia de información los efectos de la interferencia que genera el incremento propio de las antenas en el transmisor. Los resultados experimentales evaluados fueron la tasa de error de bit (BER) y la tasa de error de símbolo (SER) para determinar la efectividad de la diversidad espacial. La ganancia lograda fue alrededor de 10 dB y 7 dB en MIMO 2×2 y MIMO 3×2 respectivamente, usando la técnica D-BLAST simétrica.

Palabras clave: Alamouti, D-BLAST, MIMO, SDR, USRP

Abstract

This paper describes the implementation of technique based on D-BLAST spatial multiplexing over Software Defined Radio (SDR) equipment; specifically, using Universal Software Peripheral Radio (USRP) Ettus Research x310; with the aim of solve the problem of spatial diversity that the MIMO Alamouti scheme has, since it is not possible to increase the number of antennas of the transmitter with respect to the receiver. The simulation scenario was in an indoor environment using graphical programming tools with the *Labview Communications* Software, achieving a more robust coding design based on the nonlinearity of matrix equations, in this way, the effects of interference were mitigating through the redundancy of information due to the increase of the antennas at the transmitter. The experimental results evaluated were bit error rate (BER) and symbol error rate (SER) to determine the effectiveness of spatial diversity. The gain achieved was around 10dB and 7dB in MIMO 2×2 and MIMO 3×2 respectively, using the symmetric D-BLAST technique.

Keywords: Alamouti, D-BLAST, MIMO, SDR, USRP

¹Carrera de Ingeniería Electrónica / GITEI, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.

^{2,*}Carrera de Telecomunicaciones / GITEI, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.

Autor para correspondencia ✉: jinga@ups.edu.ec

³GIREI, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador.

⁴Centro de Estudios y Desarrollo Sostenible (CEDS), Universidad Tecnológica ECOTEC, Guayaquil, Ecuador.

Forma sugerida de citación: Cárdenas, F.; Otáñez, J.; Inga, J.; Inga, E. y Ortega, A. "Análisis del Rendimiento de D-BLAST MIMO sobre SDR-USRP," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 27, pp. 105-116, 2022. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n27.2022.10>.

1. Introducción

El desarrollo de los sistemas MIMO ha ganado gran importancia en los últimos años para la estandarización e implementación de los modernos sistemas de comunicaciones. Los retos para la obtención de una alta calidad de servicio y tasa de datos están siendo explotados desde las técnicas MIMO, a través de la propagación multi-trayecto con el objetivo de incrementar la eficiencia espectral en canales inalámbricos. En este contexto, los sistemas MIMO también pueden incrementar la capacidad del enlace explotando la diversidad de canal [1–5].

El espectro es un recurso escaso, y esto se está evidenciando con la migración espectral desde LTE a 5G [2]. El espectro de las comunicaciones móviles está ya saturado en redes existentes; por esta razón, los principales beneficios que brinda MIMO, a más de la diversidad espacial, es la *multiplexación espacial* y las actuales técnicas de conformación de haces (*beam-forming*), desplegadas en antenas inteligentes para la optimización espectral.

Un codificador espacio-temporal como el esquema Alamouti [6] maximiza la diversidad espacial para un igual número de antenas transmisoras y receptoras. En multiplexación espacial, las señales son transmitidas y recibidas, al mismo tiempo, en el mismo espectro de frecuencia, a altas tasas de datos.

En este contexto, la diversidad espacial puede ser influenciada en términos de tasa de error de bit (por sus siglas en inglés Bit Error Rate, BER) por el número de antenas al receptor. El estudio experimental observado [6], demuestra que el BER con canal de desvanecimiento se acerca a la situación ideal cuando se aumenta el número de antenas en el receptor. También, se debe considerar que el codificador espacio-temporal de Alamouti aprovecha la diversidad espacial que presenta la interferencia por multitrayectos para que el receptor separe los símbolos de información recibidos, los mismos que son mezclados por el canal de tal manera que la energía de un símbolo puede ser recibida por cada una de las antenas del receptor. En el caso de Alamouti esto puede lograrse mientras el número de antenas de recepción sea igual o mayor al número de antenas de transmisión; no obstante, esto no siempre puede darse.

1.1. Multiplexación espacial D-BLAST

La multiplexación espacial (SM) por capas espacio-temporales conocidas como BLAST (*Bell Laboratories Layered Space-Time*), son alternativas válidas para la transmisión de datos con MIMO. En adición, se debe indicar que la multiplexación espacial como D-BLAST permite al receptor trabajar en un escenario MIMO, donde el número de antenas de transmisión pueda ser mayor al número de antenas del receptor a pesar de

que esto demandaría mayor complejidad en el diseño del transmisor y el receptor [4], [7, 8]. De acuerdo con esto, los símbolos de información se demultiplexan en varias capas, donde cada una se transmite de forma independiente. Para lograrlo, se aplica un proceso de rotación o diagonalización de los símbolos de información, donde cada símbolo corresponde al de un flujo de datos independiente [9].

Por esto, es necesario considerar que dentro de las arquitecturas BLAST, D-BLAST propone una arquitectura donde los símbolos a transmitir se multiplexan por cada una de las antenas del transmisor, es decir, al menos en un instante de tiempo, un símbolo de información es transmitido por cada una de las antenas del transmisor, lo cual incrementa la diversidad espacial, factor importante para aprovechar MIMO. No obstante, a diferencia de otros formatos de trabajo como el de Alamouti; D-BLAST permite considerar el escenario en donde el número de antenas del transmisor sea mayor al número de antenas del receptor tal como se mencionó antes [7, 8], [10, 11]. El sistema MIMO D-BLAST es elegido para este trabajo debido a su capacidad de operar en ausencia del conocimiento del estado del canal y la capacidad de aprovechar la diversidad espacial para su trabajo [7], [12].

1.2. Implementación de técnicas MIMO sobre SDR

Los sistemas de radio definida por *software* (SDR) son sistemas de radio comunicación que permiten implementar modulaciones y esquemas de transmisión de capa física a través *software* [13]. Además, el desarrollo tecnológico de los sistemas de comunicaciones está marcado por el diseño y uso de sistemas de prototipado FPGA [14] a través de SDR, donde este *hardware* es controlado mediante diferentes plataformas de desarrollo. Esto permite dotar de flexibilidad a las evaluaciones de los sistemas de comunicaciones digitales. En este entorno de desarrollo, muchas plataformas de *software* están permitiendo acceder con mayor flexibilidad al núcleo del procesador FPGA para manejar con facilidad el procesamiento digital de señales (DSP) en el sistema de comunicación inalámbrico. Así, el presente trabajo usa equipos SDR, de forma concreta equipos periféricos universales de radio por *software* (USRP) [15, 16]. La programación de los USRP ha sido realizada usando lenguaje gráfico, los mismos que van tomando cada vez el control para el procesamiento paralelo de señales en transmisiones de radio; para el desarrollo de este trabajo se usó Labview Communications de National Instruments [16–18].

Para el caso de sistemas MIMO, la comunidad científica ha tenido mucho desarrollo experimental, llegando incluso a probar un MIMO con arreglo de 64 antenas [19]. Esto demanda mayor adquisición de *hardware* y, por ende, mayor costo en la implementación.

Por este motivo, los sistemas de desarrollo buscan plataformas con costos más accesibles para la evaluación de nuevas tecnologías. Por ejemplo, Prieto *et al.* [20], evalúan el esquema STBC-Alamouti MIMO 2×2 a través del uso de equipos USRP-2920 con la plataforma Simulink/MATLAB; donde se llega a comprobar la proporcionalidad del incremento de la capacidad espacial con el número de antenas en el receptor convergiendo a una disminución en el BER a través de la diversidad espacial. Sin embargo, Alamouti no considera el caso en el que el número de antenas en el transmisor sea mayor al del receptor.

Otra aplicación del modelado y aplicación de sistemas MIMO es el caso presentado por Liu *et al.* en [12] mostrando una implementación de MIMO D-BLAST para sistemas de comunicación aéreos. En dicho escenario, las posibles interferencias inalámbricas son mayores al de un escenario de tipo *outdoor*, *indoor*, sumando el efecto de interferencia (*jammings*) situación común en el escenario propuesto. De esta manera, [12] muestra una estrategia para desbloquear o desinhibir antenas debido a la interferencia inalámbrica aprovechando un sistema MIMO y usando un sistema retroalimentado de baja velocidad para la identificación del estado del canal, aspecto que D-BLAST sí permite frente al uso de codificadores espacio-temporales. No obstante, se debe considerar que la retroalimentación del canal no siempre puede ser aprovechada ya que requiere de un canal adicional y tampoco contrasta el sistema implementado con la técnica de codificación espacio-temporal.

Por otro lado, el uso del equipo NI-USRP 2920 [16] para sistemas MIMO ha demostrado incrementar la capacidad en el enlace; sin embargo, el sistema tiene dos desventajas debido a la arquitectura propia del *hardware*: *i.* la velocidad de transmisión de datos, ya que los equipos usan el protocolo de comunicación vía TCP/IP; *ii.* cuando el número de antenas es incrementado, surge la necesidad de usar más equipos SDR ya sea para la transmisión o para la recepción generándose un problema de sincronización entre equipos. Para el caso *i.* se puede mejorar usando equipos que tengan disponible el uso de puertos MXI para conectarse en forma directa a la tarjeta madre del computador a través del módulo PCI-Express. En este sentido, aunque la mejora de velocidad puede ser notable en cuanto al ancho de banda de la transmisión, aún es limitada. El segundo caso *ii.* puede resolverse a través de software para que se generen señales de sincronización de tiempo desde el primer equipo hacia el segundo estableciéndose una conexión en una arquitectura maestro-esclavo usando las entradas y salidas correspondientes para pasar las señales de reloj de un equipo a otro.

El problema de la sincronización, no solo es de software, es un compromiso de *software-hardware*, que puede resultar muy complejo, por ejemplo, para lograr sincronizar los equipos, El Sonic *et al.* [16] solu-

cionaron mediante una red LAN interconectados entre los sistemas de radio mediante un switch LAN. Sin embargo, al incrementar los equipos, disminuirá la velocidad de transmisión por la capacidad que brinda TCP/IP y aumenta la complejidad de configuración de la sincronización de equipos. Cabe mencionar que esta sincronización se refiere a que todos los equipos que constituyen el transmisor o receptor y no a la sincronización del enlace de comunicaciones la misma que para este trabajo se resuelve usando símbolos de entrenamiento en la trama de transmisión. Esto se amplía en las siguientes secciones. De acuerdo con lo mencionado, una opción más simple, pero también más costosa, es trabajar con una versión que integre un arreglo MIMO como es el caso del modelo NI-USRP 2940R equivalente a los equipos USRP Series X300. Este modelo de SDR ya aplica un arreglo de antenas de 2×2 simplificando el proceso de implementación del sistema y permitiendo concentrarse en el procesamiento de las señales de radio en banda base y la sección de comunicaciones digitales del sistema de comunicación. Además, este modelo integra el puerto MXI para incrementar el ancho de banda de comunicación entre el SDR y el computador.

Si el número de equipos es superior a dos, en cualquier caso es más simple resolver el problema de la sincronización de equipos usando un controlador de señal de reloj externo como es el caso del equipo GPS NI-CDA2990. Ya que este trabajo evalúa sistemas comunicaciones donde el número de antenas de transmisión es mayor a dos, se usa la sincronización externa debido a que se usan más de dos equipos en el transmisor; por lo tanto, el uso del equipo NI-CDA2990 es importante en la operación y en la evaluación de MIMO. En la Figura 1 se presenta una imagen correspondiente a la implementación de este trabajo usando los antes citados y donde se puede apreciar cómo están dispuestos los equipos SDR. Debe mencionarse también que, el uso de este reloj externo, puede limitar la distancia del enlace si se usa tanto en el equipo transmisor como en el receptor.

1.3. Objeto de estudio e hipótesis

El objeto de estudio principalmente se enfoca en el proceso de diseño e implementación de la no linealidad de ecuaciones matriciales en el codificador D-BLAST, realizando mediante tres métodos para mejorar la detección de símbolos en el receptor: *i.* Promediar los símbolos transmitidos en las diferentes posiciones de las columnas donde se repite cada símbolo, ya que el mismo se distribuye de forma diagonal con la interferencia de otros símbolos. *ii.* Es igual al método *i.*, pero se resta la interferencia y, finalmente, *iii.* Sabiendo que la mayor interferencia se encuentra en la columna media de la matriz, se desprecia esta columna y se realiza el promedio en las otras columnas, similar a los métodos ya mencionados.

El objetivo es comparar a través de una aplicación práctica con equipos SDR, el rendimiento entre esquemas para MIMO como la multiplexación espacial diagonal o D-BLAST y el codificador espacio-temporal (STBC) de Alamouti instrumentados en un ambiente de interiores (*indoor*) real usando equipos USRP a diferencia de lo puesto en marcha por Soria *et al.* [21] que evalúan la multiplexación espacial de BLAST, pero en el formato vertical.

El artículo se ordena de la siguiente forma: en la sección II se realiza una revisión de trabajos similares en el uso de equipos SDR. La sección III analiza el esquema y modelo matemático del codificador espacio-temporal D-BLAST y describe el proceso de implementación de los algoritmos de decodificación usados en los equipos SDR. La sección IV presenta los resultados obtenidos analizando las figuras de mérito como la tasa de error de bit. En la sección V se presenta las conclusiones.



Figura 1. Implementación de equipos

2. Materiales y métodos

Las consideraciones para la instalación en la arquitectura del sistema MIMO son los equipos USRP X310 de la compañía Ettus Research, debido a la flexibilidad en la velocidad de transmisión de cada equipo de radio. Este modelo de equipo posee el puerto PCI-E para transmitir hasta 1 Gbps; adicionalmente, posee un sistema de sincronización externa disciplinada por GPS (GPSDO), usando el reloj de sincronización del equipo NI-CDA2990 con la posibilidad de expandir hasta 8 antenas en el transmisor y el receptor. La plataforma de desarrollo de *software* fue mediante *Labview NI Communications*. Gracias al uso de este módulo, se facilita el proceso de sincronización para cualquier sistema de comunicación en el que sea necesario más de dos equipos de transmisión o recepción. Gracias a la sincronización, cada uno de los equipos pueden establecer el mismo tiempo de símbolo, de bit y/o de muestreo.

El equipo CDA-2990 permite distribuir una señal de reloj para conectar hasta 8 canales o equipos SDR.

Este equipo puede generar el pulso de reloj de sincronización de forma externa por GPS (GPSDO) o a través de un cristal que permite generar señales de sincronización de entrada de precisión de pulso por segundo (PPS). La configuración y conexión ha sido usada en el desarrollo de este trabajo como corresponde a la Figura 2.

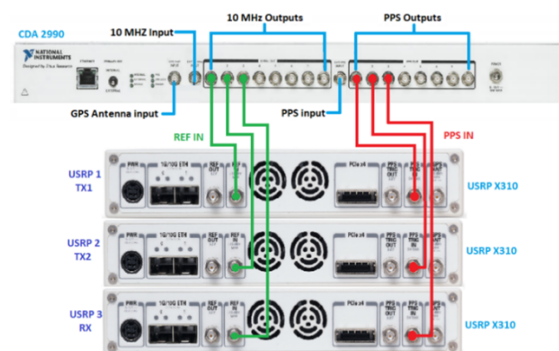


Figura 2. Conexiones del CDA-2990, equipo usado para la sincronización de los equipos de radio NI-USRP

2.1. Arquitectura de multiplexación espacial de D-BLAST

Es una arquitectura que combina varias señales iguales o similares de un bajo ancho de banda para convertir en una señal de mayor ancho de banda [22, 23]. También, similar a lo que sucede con la codificación espacio-temporal, se transmiten datos al mismo tiempo por cada antena y por el mismo canal [4], [22]. No obstante, la multiplexación espacial D-BLAST usa flujos de símbolos de datos con entrelazado de los mismos;

hay que tomar en cuenta que los símbolos pudieron obtenerse de un flujo de bits al cual previamente se aplicó alguna técnica para codificación y corrección de errores hacia adelante (FEC). De acuerdo con esto, primero es necesario organizar los bits de información a transmitir a través de un conversor serie/paralelo acorde al número de antenas del transmisor. Entonces, para cada flujo obtenido de la conversión serie/paralela se aplica la codificación temporal y luego el mapeo de símbolos o modulación lineal, como se observa en la Figura 3.

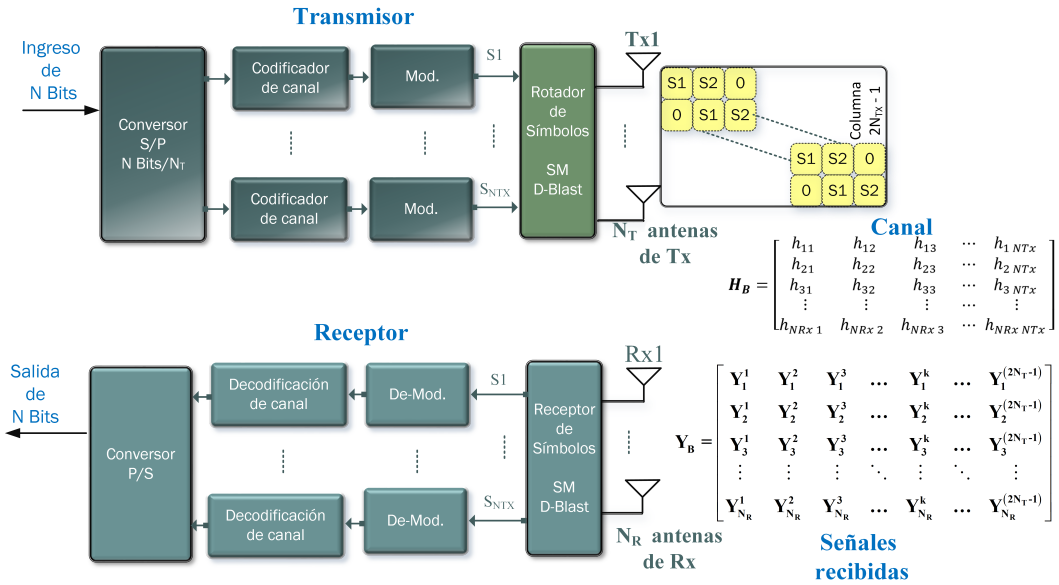


Figura 3. Arquitectura de multiplexación espacial D-BLAST

De esta forma, se crean tramas independientes para cada antena del transmisor previo al proceso de multiplexación espacial en donde estas tramas pasan a través de un bloque que se encarga de rotar los símbolos de cada flujo [24] y las hace girar de forma diagonal para que cada símbolo sea transmitido al menos una vez por cada una de las antenas del transmisor asegurando la diversidad espacial.

Para ejemplificar este proceso, se considera un transmisor con $N_T = 3$ antenas; se asume que previo a la multiplexación espacio-temporal, es decir, en la entrada del bloque que rota los símbolos, se tiene un símbolo por cada flujo, que de forma general s_i representará al i -ésimo símbolo que ingresa a este *rotador*. La salida por su parte estará representada por la ecuación (1) donde los espacios rellenos con «0» corresponden a los instantes de tiempo que no transmiten información, es decir, señales de energía 0. Así, cada símbolo salta de una antena a otra por cada tiempo de transmisión T_k .

$$S_D = \begin{pmatrix} s_1^1 & s_2^2 & s_3^3 & 0 & 0 \\ 0 & s_1^1 & s_2^2 & s_3^3 & 0 \\ 0 & 0 & s_1^1 & s_2^2 & s_3^3 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Las columnas de la ecuación (1) representan cada uno de los instantes o tiempos de transmisión, mientras que las filas corresponden a las antenas de transmisión. En este sentido, s_3^3 corresponde al símbolo 2 transmitido en el instante de tiempo 3 o T_3 y de forma general s_i^j representa al símbolo i que ingresó al rotador y que será transmitido en el instante j .

Entonces, para el trabajo de una multiplexación espacial diagonal D-BLAST, la dimensión de la matriz resultante de la rotación de símbolos del transmisor será de N_T filas \times $2N_T - 1$ columnas, entendiendo que cada grupo de símbolos ingresan y se mapean de acuerdo con la matriz espacio-temporal de forma independiente aplicando la rotación de símbolos y que es descrita ya de forma general en la ecuación (2).

$$S_D = \begin{pmatrix} s_1^1 & s_1^2 & \dots & s_{N_T}^{N_T} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & s_{N_T-1}^{N_T} & s_{N_T+1}^{N_T} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & s_{N_T-2}^{N_T} & s_{N_T+1}^{N_T} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & s_1^{N_T} & s_1^{N_T+1} & \dots & s_{2N_T-1}^{N_T} \end{pmatrix} \quad (2)$$

La matriz con los coeficientes del canal es \mathbf{H}_B que se detalla en la ecuación (3) y la matriz de señales recibidas es \mathbf{Y}_D que se obtiene según la ecuación (4) que está en función del canal \mathbf{H}_B de los símbolos transmitidos \mathbf{S}_D y del ruido del canal representado por \mathbf{n} . Para \mathbf{H}_B , el elemento $h_{i,j}$ representa la respuesta al impulso del canal por el trayecto entre la antena de transmisión i y la antena receptora j .

$$H_B = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & \dots & h_{1N_T} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & \dots & h_{2N_T} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_R \times 1} & h_{N_R \times 2} & h_{N_R \times 3} & \dots & h_{N_R \times N_T} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{Y}_D = \mathbf{H}_B \mathbf{S}_D + \mathbf{n} \quad (4)$$

Para una transmisión continua, antes de aplicar el rotador, se conforma una matriz de los símbolos de información a transmitir donde el número de filas es igual a N_T y el número de columnas será igual a $(R \cdot N)/N_T$ donde N representa la cantidad de bits de información y R es la tasa de codificación FEC. De esta manera, siguiendo el ejemplo antes citado con $N_T = 3$, la segunda columna que ingresa al rotador corresponde a los símbolos s_4 , s_5 y s_6 lo que significa que la matriz de trabajo del rotador usaría los siguientes cinco instantes de tiempo de transmisión con el formato de la matriz presentada en la ecuación (1) de forma independiente a los primeros tres símbolos.

En lo que respecta a la recepción, de acuerdo con la ecuación (4), para cada tiempo de símbolo, se recibe la combinación lineal de los símbolos transmitidos en el instante de tiempo T_k con el canal \mathbf{H}_B , para cada elemento $h_{i,j}$, lo que significa que cada antena del receptor contiene información de todos los símbolos transmitidos en dicho instante de tiempo T_k .

Por otra parte, la Tabla 1 muestra la disposición de los símbolos a transmitir considerando el caso de MIMO 2×2 presentando la rotación de símbolos D-BLAST transmitidas por cada instante de tiempo y por cada antena para los dos primeros bloques de transmisión; para el caso de la recepción de MIMO D-BLAST 2×2 , la Tabla 2 muestra la posición de símbolos recibidos para los dos primeros bloques de recepción identificando los correspondientes tiempos de símbolo.

Tabla 1. Disposición de símbolos para TX con D-BLAST MIMO de 2×2

	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
Antena T_{X1}	s_1^1	s_2^2	$\mathbf{0}$	s_3^4	s_4^5	$\mathbf{0}$
Antena T_{X2}	$\mathbf{0}$	s_1^2	s_2^2	$\mathbf{0}$	s_3^5	s_4^6
	Primer bloque de TX para MIMO 2×2			Segundo bloque de TX para MIMO 2×2		

Tabla 2. Disposición de símbolos para RX con D-BLAST MIMO de 2×2

	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
Antena R_{X1}	Y_1^1	Y_1^2	Y_1^3	Y_1^4	Y_1^5	Y_1^6
Antena R_{X2}	Y_2^1	Y_2^2	Y_2^3	Y_2^4	Y_2^5	Y_2^6
	Primer bloque de RX para MIMO 2×2			Segundo bloque de RX para MIMO 2×2		

Cada uno de los símbolos o señales de recepción descrito en la Tabla 2 corresponden a las señales de salida del canal, las mismas que se detallan en las ecuaciones (5) a la (10), donde la ecuación (5) corresponde a las señales recibidas en el primer instante de tiempo tanto por la antena 1 como por la antena 2 del receptor del ejemplo propuesto.

$$Y_1^1 = h_{11}s_1^1 + h_{12} \cdot 0 + n_1 \quad Y_2^1 = h_{21}s_1^1 + h_{22} \cdot 0 + n_2 \quad (5)$$

$$Y_1^2 = h_{11}s_2^2 + h_{12}s_1^2 + n_3 \quad Y_2^2 = h_{21}s_2^2 + h_{22}s_1^2 + n_4 \quad (6)$$

$$Y_1^3 = h_{11} \cdot 0 + h_{12}s_2^3 + n_5 \quad Y_2^3 = h_{21} \cdot 0 + h_{22}s_2^3 + n_6 \quad (7)$$

$$Y_1^4 = h_{11}s_3^4 + h_{12} \cdot 0 + n_7 \quad Y_2^4 = h_{21}s_3^4 + h_{22} \cdot 0 + n_8 \quad (8)$$

$$Y_1^5 = h_{11}s_4^5 + h_{12}s_3^5 + n_9 \quad Y_2^5 = h_{21}s_4^5 + h_{22}s_3^5 + n_{10} \quad (9)$$

$$Y_1^6 = h_{11} \cdot 0 + h_{12}s_4^6 + n_{11} \quad Y_2^6 = h_{21} \cdot 0 + h_{22}s_4^6 + n_{12} \quad (10)$$

2.2. D-BLAST usando sistemas de radio definido por *software* (SDR)

El diagrama de bloques del sistema de comunicaciones implantado sobre periféricos universales de radio por *software* (USRP, del inglés *universal software radio peripheral*) se muestra en la Figura 4. La arquitectura UHD usada es la disponible para «LabVIEW Communication Design Suite». Las características de los equipos usados, son los USRP Ettus X310 con las siguientes especificaciones:

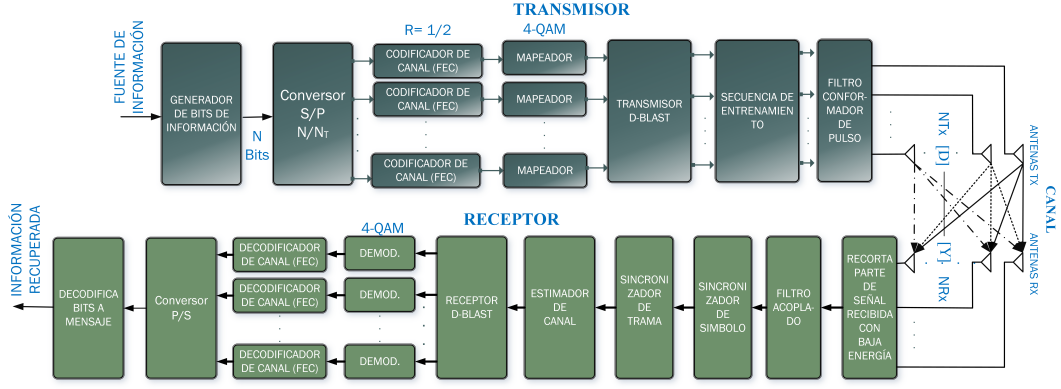


Figura 4. Arquitectura de implementación de D-BLAST sobre equipos SDR-USRP

- Ancho de banda de hasta 40 MHz por cada canal (2 canales).
- La imagen cargada en el FPGA permite conexión Ethernet de 1 Gbps para transmitir 25 Megamuestras/s Full Duplex.
- Arquitectura de reloj flexible con frecuencia de muestreo configurable.

La implementación de MIMO con los equipos SDR, se usó las configuraciones Alamouti 2×2, D-BLAST 2×2 y D-BLAST 3×2, donde la fuente de información es basada en texto, por lo tanto, se implementó un codificador de fuente para obtener el flujo de bits de información adecuado. El primer bloque del transmisor de la Figura 4 representa dicho codificador de fuente. En el caso de la aplicación de la arquitectura D-BLAST, el flujo de bits obtenidos de la fuente de información se pasa de serie a paralelo de acuerdo con el número de antenas de transmisión N_T . Para el caso de este trabajo con $N_T = 2$ y $N_T = 3$ tomando en cuenta que en ambos casos $N_R = 2$.

Luego de obtener flujos de bits multiplexados, para cada subflujo, se aplicó un codificador de canal con la misma estructura al usado en Alamouti y también el mismo esquema de modulación 4-QAM para no diferenciar en los resultados comparativos. En esta arquitectura, el proceso de codificación temporal y modulación es independiente para cada subflujo de datos. A estos subflujos se aplica D-BLAST.

Se insertan a la salida del bloque de transmisión D-BLAST símbolos de entrenamiento para que el receptor pueda sincronizar las tramas de datos recibidas por cada subflujo recibido. Los símbolos de entrenamiento se transmiten de forma secuencial por cada una de las antenas del arreglo, pero la secuencia de cada subflujo se transmite de forma individual. Por lo tanto, para el caso de 3 × 2, por ejemplo, el subflujo es conformado por tres partes, una parte conformada de símbolos en el rango de $\pm \frac{1}{\sqrt{2}} \pm \frac{1}{\sqrt{2}}i$, y las otras dos corresponden a símbolos en cero ($0 + 0i$). Entonces, el conjunto de

símbolos que conforma el preámbulo de cada subflujo fue de 528 símbolos, donde cada una de las partes antes descritas posee 176 símbolos. La disposición de estos símbolos de entrenamiento se presenta en la Tabla 3. Esta estructura permitirá que la secuencia de entrenamiento de cada subflujo de datos no se interfiera con otro y la comunicación sea más estable.

Tabla 3. Distribución de los símbolos de entrenamiento en los subflujos

sub-flujo 0	$\pm \frac{1}{\sqrt{2}} \pm \frac{1}{\sqrt{2}}i$	0+0i	0+0i	S_D
sub-flujo 1	0+0i	$\pm \frac{1}{\sqrt{2}} \pm \frac{1}{\sqrt{2}}i$	0+0i	
sub-flujo 2	0+0i	0+0i	$\pm \frac{1}{\sqrt{2}} \pm \frac{1}{\sqrt{2}}i$	
Longitud total = 528 símbolos				

En los bloques que se muestran en el receptor, se aplican cinco bloques adicionales a diferencia del diagrama de simulación. De acuerdo con esto, según la Figura 4, el primer bloque del receptor, busca eliminar muestras con baja energía que corresponden a los símbolos de relleno en cero. Para esto, se establece un nivel de umbral que permita descartar muestras con muy baja energía o simplemente ruido. De esta manera, el umbral es la energía promedio de todos los posibles valores que se pueden obtener en una modulación digital. En el caso de este trabajo, es el promedio de los cuatro posibles símbolos transmitidos con 4-QAM.

El segundo bloque es un filtro acoplado para maximizar la relación señal a ruido (SNR) de las señales capturadas. El tercer bloque y cuarto bloque del receptor se encargan de la sincronización del tiempo de símbolo y de la sincronización de una trama debida a las señales capturadas por cada una de las antenas del receptor. Para lograrlo, se aprovecha que el receptor conoce los símbolos de entrenamiento, y, que a la salida del cuarto bloque del receptor, son eliminados. El modelo matemático para cada señal recibida antes de

eliminar los símbolos de sincronización se presenta en la Tabla 4 y la Tabla 5 para la construcción de MIMO 2×2 y MIMO 3×2 respectivamente; en ambos casos, estas expresiones resultan de aplicar la ecuación (4). Previo al uso de este tercer bloque del receptor, se aplica el debido submuestreo de símbolos para pasar de muestras a símbolos y, por tanto, al finalizar la sincronización, en la salida del cuarto bloque del receptor se obtienen los símbolos listos para la estimación del canal.

El bloque *estimador de canal* posee un número de entradas igual al número de antenas transmisoras. Además, para efectuar la estimación de los coeficientes del canal, se optó por usar un estimador de baja complejidad computacional basado en mínimos cuadrados (LS, del inglés Least Squares) [25, 26]. Como ya se mencionó, la estimación de canal usada en este trabajo necesita que el receptor conozca los símbolos usados para sincronización y posee la función objetivo descrita por la ecuación $\mathbf{h}_{LS} = \arg \min_h \|\mathbf{y} - \hat{H}\mathbf{A}\|$ donde las secuencias de símbolos de entrenamiento transmitidas son definidas como $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{N_{Tx} \times L}$, y la expresión de la matriz de secuencias de entrenamiento recibidas es \mathbf{y} .

Tabla 4. Señales recibidas para MIMO 2×2 considerando la primera capa de símbolos para D-BLAST

	T_1	T_2	T_3
R_{x1}	$s_1 h_{11} + \mathbf{n}$	$s_1 h_{11} + s_1 h_{12} + \mathbf{n}$	$s_2 h_{12} + \mathbf{n}$
R_{x2}	$s_1 h_{21} + \mathbf{n}$	$s_2 h_{21} + s_1 h_{22} + \mathbf{n}$	$s_2 h_{22} + \mathbf{n}$

Tabla 5. Señales recibidas para MIMO 3×2 considerando la primera capa de símbolos para D-BLAST

		T_1	T_2	T_3	T_4	T_5
Y_B	R_{X1}	$s_1 h_{11}$ $+\mathbf{n}$	$s_2 h_{11}$ $+s_1 h_{12}$ $+\mathbf{n}$	$s_3 h_{11}$ $+s_2 h_{12}$ $+s_1 h_{13}$ $+\mathbf{n}$	$s_3 h_{12}$ $+s_2 h_{13}$ $+\mathbf{n}$	$+s_3 h_{13}$ $+\mathbf{n}$
	R_{X2}	$s_1 h_{21}$ $+\mathbf{n}$	$s_2 h_{21}$ $+s_1 h_{22}$ $+\mathbf{n}$	$s_3 h_{21}$ $s_2 h_{22}$ $+s_1 h_{23}$ $+\mathbf{n}$	$s_3 h_{22}$ $+s_2 h_{23}$ $+\mathbf{n}$	$+s_3 h_{23}$ $+\mathbf{n}$

Es decir, el algoritmo del estimador *LS* busca encontrar los coeficientes \mathbf{h}_{LS} del canal estimado \hat{H} que minimiza el error cuadrático entre los símbolos de sincronización recibidos con la versión aproximada que usa los símbolos conocidos por el receptor. Además, debido a que los símbolos de entrenamiento son conocidos por el receptor, es posible precalcular la matriz \mathbf{A}^\dagger , para almacenar en memoria, y así, el receptor no calcule la matriz pseudo inversa de \mathbf{A} cada vez que el canal sea reestimado $\hat{H} = \mathbf{A}^\dagger \mathbf{y} = (\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H \mathbf{y}$.

A la salida del estimador se retiran las secuencias de entrenamiento. Con el canal estimado y los símbolos sincronizados se procede a separar los símbolos recibidos ya que, debido a los multitrayectos del canal y propios de una transmisión MIMO. La información de cada uno de los símbolos transmitidos durante cada bloque de transmisión (ver Tabla 1) se encuentra dentro de todos los flujos de símbolo recibidos.

2.2.1. Decodificador o demultiplexor espacio-temporal D-BLAST

Para recuperar los símbolos recibidos, es necesario tomar en cuenta que, en el primer instante de recepción T_1 , se encuentra una versión del primer símbolo transmitido, donde cada copia es afectada por el componente de canal correspondiente. Similar a lo indicado sucede en el último instante de transmisión de una capa, donde el último símbolo transmitido estará presente en el receptor en varias copias, de manera que cada copia sea modificada por un componente del canal.

También, a partir del segundo instante de recepción hasta el penúltimo, cada nuevo símbolo que ingrese, será modificado por alguna copia de los símbolos que ingresaron en instantes de tiempo anteriores; además, en el caso de los símbolos intermedios, se verá más acentuada esta interferencia. De acuerdo con esto, en el tercer instante de tiempo, se puede ver cómo el tercer símbolo es ingresado y modificado por los dos símbolos anteriores que ya entraron en la matriz para su proceso de demodulación.

Entonces, la técnica D-BLAST para el sistema MIMO 2×2 realiza un promedio de la diagonal 1 y 2 de la matriz de símbolos Y_B , es decir, que el valor medio entre la señal recibida R_{X1} en el instante de recepción T_1 con la señal recibida por la antena R_{X2} en el instante de recepción T_2 permite decodificar el símbolo s_1 según la ecuación 11. El símbolo 2 s_2 se decodifica determinando el valor medio entre la señal recibida por la antena R_{X1} en el instante de recepción T_2 con la señal recibida por la antena R_{X2} en el instante de recepción T_3 según la ecuación 12.

$$s_i = \frac{(s_1 h_{11} + n) + (s_2 h_{21} + s_1 h_{22} + n)}{2} \quad (11)$$

$$s_{i+1} = \frac{(s_2 h_{11} + s_1 h_{12} + n) + (s_2 h_{22} + n)}{2} \quad (12)$$

Este procedimiento se aplicó en el esquema MIMO 3×2. El promedio para obtener los tres primeros símbolos enviados y el orden que mantienen y que son presentados a continuación son de vital importancia para la correcta estimación de canal. De acuerdo con esto, los coeficientes son:

$$s_i = \frac{(s_1 h_{11} + n) + (s_2 h_{21} + s_1 h_{22} + n)}{2} \quad (13)$$

$$s_{i+1} = \frac{(s_2 h_{11} + s_1 h_{12} + n) + (s_3 h_{21} + s_2 h_{22} + s_1 h_{23} + n)}{2} \quad (14)$$

$$s_{i+2} = \frac{(s_3 h_{12} + s_2 h_{13} + n) + (s_3 h_{23} + n)}{2} \quad (15)$$

Estos símbolos se consideran como estimados debido a que están distorsionados por efecto del canal. Por lo tanto, para eliminar este efecto se utilizan los coeficientes del canal determinados en la estimación de canal multiplicando por la conjugada transpuesta de la matriz con los coeficientes obtenidos del estimador de canal.

En todos los casos donde el número de antenas de transmisión sea mayor al de recepción, se necesitará completar la matriz de canal con tantas columnas como sea la diferencia entre $(N_{Tx} - N - R_x)$ para cumplir con la dimensión $N_{Tx} \times N_{Rx}$.

3. Resultados y discusión

Debido al uso del equipo para sincronización, la distancia entre el transmisor y el receptor estuvo alrededor de 3 metros y para evaluar el comportamiento del sistema se modificó la potencia del transmisor con valores entre -30 dB a 15 dB evitando que se sature el canal. Para verificar la operación se usó un equipo de radio adicional para generar una portadora con mayor potencia para emular efectos de *jammimg* en la transmisión verificar la operación en condiciones de un canal con gran desvanecimiento y múltiples trayectorias. La frecuencia de transmisión es de 2,4 Ghz, por lo que coexiste con la red de wifi del laboratorio en el cual se desarrolló la experimentación, haciendo que el canal varíe constantemente.

Para los efectos de las simulaciones realizadas previo a la implementación se considera un ambiente *indoor* donde los efectos de la distancia no son considerados para contrastarlo con los resultados obtenidos en la implementación. A continuación, se expone la evaluación del rendimiento de simulación y experimentación entre diversidad espacial y multiplexación espacial. Además, en la Tabla 6 se resumen las características de los equipos usados en esta implementación. Es decir, el modelo de canal usado en las simulaciones corresponde a un canal con distribución Rayleigh para considerar los desvanecimientos del canal por multitrayectorias, además de considerar el ruido. El desarrollo de estas simulaciones permitió establecer el procesamiento de las señales de radio para la recuperación del mensaje en el receptor.

Tabla 6. Parámetros usados en la implementación

Parámetro	Valor
Tasa de muestreo IQ:	2,1 MSamples/s
Frecuencia de portadora:	2,4 GHz
Modulación:	4 QAM
Codificador de canal:	Convolutacional, R=1/2
Ganancia del transmisor:	15 dB
Sensibilidad del receptor:	10 dB
Tipo de antenas usadas:	Antenas verticales para banda ISM
Ganancia del antenas:	6 dBi

En las Figuras 5 y 6 se observa el efecto de disparidad cuando $N_{Rx} < N_{Tx}$. Cuando el sistema es MIMO simétrico (igual número de antenas), tanto el rendimiento del BER como el SER es más óptimo respecto a cuando es asimétrico. Comprobamos que en un ambiente de simulación, para MIMO 2×2 basado en Alamouti permite reducir el impacto del BER.

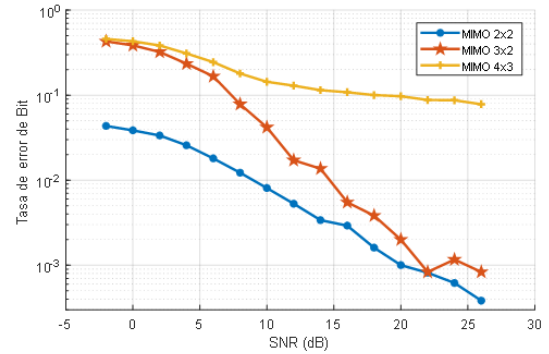


Figura 5. Análisis de rendimiento BER en simulaciones MIMO

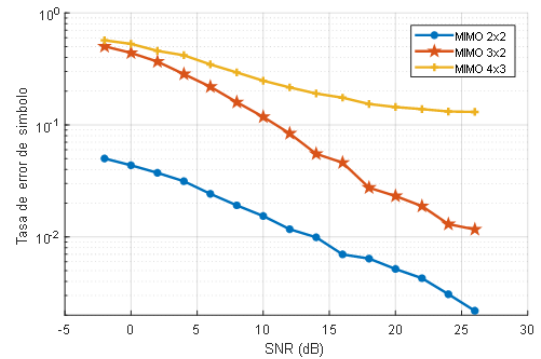


Figura 6. Análisis de rendimiento SER en simulaciones MIMO

Para el enfoque experimental se han validado los mismos términos de rendimiento, pero con diferentes técnicas. Así, las Figuras 7 y 8 podemos comparar la técnica basada en diversidad espacial con MIMO-Alamouti *vs.* Multiplexación espacial con MIMO D-BLAST.

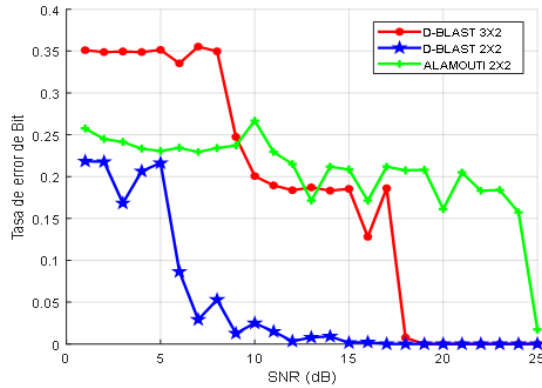


Figura 7. Análisis BER experimental entre MIMO-Alamouti y MIMO D-BLAST

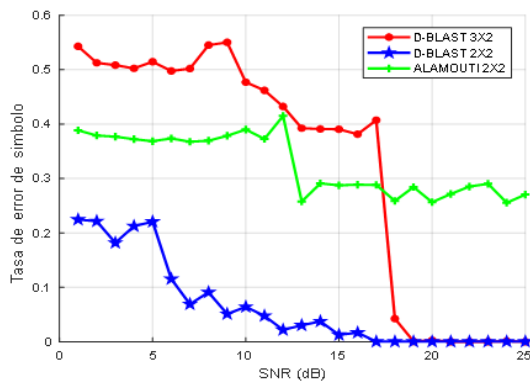


Figura 8. Análisis SER experimental entre MIMO-Alamouti y MIMO D-BLAST

Del mismo modo, podemos observar que la asimetría en MIMO empeora el sistema; no obstante, la técnica con matrices diagonales BLAST es superior a la tradicional codificación espacio-temporal de Alamouti para MIMO en alrededor 10 dB. Sin embargo, un sistema simétrico y asimétrico MIMO D-BLAST es más robusto respecto al MIMO Alamouti; esto se debe al tratamiento matemático y la redundancia que se aplica al sistema para disminuir los efectos de la interferencia.

Otra apreciación importante es que si se compara las gráficas en todos los sistemas MIMO se puede observar que se tiene un valor mayor de tasa de error de símbolo que la tasa de error de bit para un mismo valor de SNR. Esto confirma la efectividad del codificador convolucional pese al incremento de antenas. No obstante, es claro que para sistemas MIMO de mayor tamaño, hay mayor probabilidad de fallo debido a la complejidad del sistema a pesar de que se puede incrementar la cantidad de datos transmitida.

4. Conclusiones

El uso de los sistemas SDR es muy importantes en la actualidad; debido a que esos sistemas son capaces

de procesar grandes cadenas de datos generando un procesamiento en paralelo donde en su arquitectura interna se encuentran los FPGA que son diseñados para solventar este problema. La implementación del sistema D-BLAST 2×2 (simétrico) resultó ser más eficiente en comparación del sistema D-BLAST 3×2 (asimétrico), mostrando una tasa de error de bit menos significativa en los diferentes esquemas de MIMO analizados. Además, un D-BLAST simétrico brinda mejor diversidad espacial debido a que puede crecer en el número de antenas de transmisión y recepción, a diferencia del esquema de Alamouti que solo puede crecer en el número de antenas de recepción.

Para la implementación de D-BLAST u otro tipo de codificación espacio-temporal para MIMO, se recomienda tener en cuenta cada uno de los procesos tanto de codificación como de decodificación descritos en este documento. Uno de estos procesos fundamentales es la estimación de canal, debido a que se requiere de sus coeficientes para una buena comunicación inalámbrica, para cualquier número de antenas que se requiera tanto en el transmisor como en el receptor.

En este sentido, los coeficientes del canal deben tener la disposición y mantener el orden como se muestra en este trabajo. Si estos coeficientes no son los correctos, la estimación de canal será errónea, lo cual llevará a una tasa de error de bit significativa en un bajo nivel de ruido. Se recomienda para trabajos futuros probar otro sistema para la estimación de canal.

Finalmente, se debe indicar que, para la transmisión de datos usando MIMO D-BLAST para transmitir con N_T antenas, será necesario transmitir los símbolos en $2 \times (N_T - 1)$ tiempos de símbolo, por lo cual deberá analizarse para un gran número de antenas si la operación de D-BLAST no entra en conflicto con el tiempo de coherencia del canal inalámbrico. Esto se debe a que en el proceso de dar redundancia en la transferencia de símbolos, se pierde ancho de banda al mismo tiempo.

Referencias

- [1] S. Xu, S. Xu, and Y. Tanaka, "Dynamic resource reallocation for 5G with OFDMA in multiple user MIMO RoF-WDM-PON," 2016, pp. 480–484. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/APCC.2015.7412561>
- [2] M. Danneberg, N. Michailow, I. Gaspar, M. Matthe, D. Zhang, L. L. Mendesy, and G. Fettweis, "Implementation of a 2 by 2 MIMO-GFDM transceiver for robust 5G networks," 2015, pp. 236–240. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ISWCS.2015.7454336>
- [3] N. Prasad and M. K. Varanasi, "Analysis and optimization of diagonally layered lattice

- schemes for MIMO fading channels,” *IEEE transactions on information theory*, vol. 54, no. 3, pp. 1162–1185, 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TIT.2007.915701>
- [4] B. Clerckx and C. Oestges, *MIMO Wireless Networks*. Academic Press Publications, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/C2010-0-66925-2>
- [5] Y. K. Chang, F. B. Ueng, and K. Z. Wu, “A novel MIMO-GFDM receiver for next generation communication,” *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 29, no. 6, pp. 1–15, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/ett.3288>
- [6] M. Gupta and G. Murmu, “Experimental Study of Fading using Alamouti Space-Time Block Code,” no. 1. IEEE, 2018, pp. 0–5. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/SCEECS.2018.8546851>
- [7] A. Paulraj, R. Nabar, and D. Gore, *Introduction to Space-Time Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2011, vol. 158. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6111-2_2
- [8] O. Shental, S. Venkatesan, A. Ashikhmin, and R. A. Valenzuela, “Massive BLAST: An architecture for realizing ultra-high data rates for large-scale MIMO,” *IEEE WIRELESS COMMUNICATIONS LETTERS*, vol. 7, no. 3, pp. 404–407, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/LWC.2017.2780079>
- [9] J. J. Mroczek, M. J. Gans, and L. L. Joiner, “Performance of frequency hopping d-blast mimo architecture using ldpc and bpsk,” in *MILCOM 2015-2015 IEEE Military Communications Conference*. IEEE, 2015, pp. 860–865. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/MILCOM.2015.7357553>
- [10] A. Sibille, C. Oestges, and A. Zanella, *MIMO: From Theory to Implementation*. Academic Press Publications, 2010. [Online]. Available: <https://bit.ly/3s2o9uk>
- [11] G. C. Daily and P. A. Matson, “Ecosystem services: From theory to implementation,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 105, no. 28, pp. 9455–9456, 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1073/pnas.0804960105>
- [12] Y. Liu, B. Chen, J. J. Mroczek, J. E. Malowicki, and R. J. Michalak, “Robust MIMO communications against antenna blockage and interference,” in *MILCOM 2019-2019 IEEE Military Communications Conference (MILCOM)*. IEEE, 2019, pp. 7–12. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/MILCOM47813.2019.9020916>
- [13] V. Garg, “Fourth generation systems and new wireless technologies,” *en. Wireless Communications & Networking. Elsevier*, pp. 1–22, 2007.
- [14] N. T. Hieu, N. T. Tu, L. T. Danh, A. N. Duc, and B. H. Phu, “Design and implementation of MIMO-STBC systems on FPGA hardware,” *International Conference on Advanced Technologies for Communications*, pp. 274–277, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ATC.2012.6404275>
- [15] J. Kaderka and T. Urbanec, “Time and sample rate synchronization of RTL-SDR using a GPS receiver,” in *2020 30th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*, 2020, pp. 4–7. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/RADIOELEKTRONIKA49387.2020.9092398>
- [16] G. Soni, G. Kaur, and V. K. Banga, “Implementation & BER analysis of 2×2 MIMO Using USRP 2920- universal software radio peripheral,” in *2016 Second International Conference on Computational Intelligence Communication Technology (CICT)*. IEEE, 2016, pp. 523–527. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CICT.2016.109>
- [17] V. S. Muradi, R. K. Paithane, A. Ahmed, and A. Pawar, “Spectrum sensing in cognitive radio using Labview and NI USRP,” in *2018 2nd International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC)*. IEEE, 2018, pp. 1316–1319. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICISC.2018.8399019>
- [18] A. Yanza-Verdugo, C. Pucha-Cabrera, and J. Inga-Ortega, “Compressive Sensing Based Channel Estimator and LDPC Theory for OFDM using SDR,” *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, vol. 23, no. 1, pp. 74–85, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17163/ings.n23.2020.07>
- [19] N. Narukawa, T. Fukushima, K. Honda, and K. Ogawa, “64 × 64 MIMO antenna arranged in a daisy chain array structure at 50 Gbps capacity,” in *2019 URSI International Symposium on Electromagnetic Theory (EMTS)*. URSI, 2019, pp. 2019–2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.23919/URSI-EMTS.2019.8931517>
- [20] R. Prieto, A. Abril, and A. Ortega, “Experimental Alamouti-STBC Using LDPC Codes for MIMO Channels over SDR Systems,” in *2017 IEEE 30th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*. IEEE, 2017, pp. 1–5. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CCECE.2017.7946842>

-
- [21] V. Soria, G. V. Arevalo, P. Avila, F. Tello, and C. G. Santamaria, "Performance comparison of 2×2 and 4×4 V-BLAST and Alamouti MIMO systems," in *2018 IEEE 3rd Ecuador Technical Chapters Meeting, ETCM 2018*, 2018, pp. 18–21. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ETCM.2018.8580317>
- [22] J. J. Anguís Horno, *Redes de Área Local Inalámbricas: Diseño de la WLAN de Wheelers Lane Technology College*. Escuela Superior de Ingenieros Universidad de Sevilla, 2008. [Online]. Available: <https://bit.ly/3IFbsM9>
- [23] M. Sellathurai and S. Haykin, *Space-Time Layered Information Processing for Wireless Communications*. Wiley & Sons, 2009. [Online]. Available: <https://bit.ly/3oPIjG3>
- [24] J. R. Hampton, *Introduction to MIMO communications*. Cambridge University Press, 2013. [Online]. Available: <https://bit.ly/3DQyh2>
- [25] V. Puig Borrás, "Simulación computacional y paralelización de un sistema de comunicaciones inalámbrico MIMO: Estimación de canal y decodificación de señales," Master's thesis, Universidad Politécnica de Valencia, 2011. [Online]. Available: <https://bit.ly/3IWlitc>
- [26] Y. S. Cho, J. Kim, W. Y. Yang, and C. G. Kang, *MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB*. Wiley & Sons, 2010, vol. 11, no. 3. [Online]. Available: <https://bit.ly/3m3QgFN>

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). Los artículos enviados a la revista INGENIUS deben ajustarse a los siguientes criterios:

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, incluyen- do título, resúmenes, tablas y referencias.
- **Revisiones:** 6.000 a 7.000 palabras de texto, incluidas tablas y referencias. Se valora especialmente las referencias justi- ficadas, actuales y selectivas de alrededor de unas 40 obras.

La revista INGENIUS publica trabajos origi- nales 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 edito- riales 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 com- promiso de publicación.

Es indispensable presentar una carta de pre- sentación 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 Jour- nal 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>.

3. Presentación y estructura de los ma- nuscritos

Para aquellos trabajos que se traten de in- vestigaciones de carácter empírico, los manus- critos seguirán la estructura IMRDC (Intro- ducción, Materiales y Métodos, Resultados y

Discusión y Conclusiones), siendo opcionales los epígrafes de Notas y Apoyos. Aquellos tra- bajos 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 Discu- sión y Conclusiones. En todas las tipologías de trabajos son obligatorias las Referencias.

Los artículos pueden estar escritos sobre Mi- crosoft 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 Micro- soft Word en: <<https://goo.gl/ZA2XAk>>, mientras que para L^AT_EX en: <[https://goo. gl/Mwv8IC](https://goo.gl/Mwv8IC)>, es necesario que el archivo esté anonimizado en Propiedades de Archivo, de forma que no aparezca la identificación de au- tor/es.

Las Figuras, Gráficos y/o Ilustraciones, así como las Tablas deberán estar numeradas se- cuencialmente incluyendo una descripción ex- plicativa para cada una. Las ecuaciones in- cluidas en el artículo deberán también estar numeradas; tanto las figuras, tablas y ecuacio- nes deben estar citadas en el texto.

Use espacio después de punto, comas y sig- nos de interrogación.

Use “enter” al final de cada párrafo, títu- lo encabezamiento. No use “enter” en ningún otro lugar, deje al programa procesador de palabras romper automáticamente las líneas.

No centre encabezamientos o subencabe- zamientos ya que deben estar alineados a la izquierda.

Las Tablas deben estar creadas en el mismo programa usado para el cuerpo del documen- 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 firmantes, 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 literatura 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. Ta-

boada. “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 subtituladas 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 ar-

chivo 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
- Debe estar en el formato de la revista 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.

La comprobación antes descrita puede llevar hasta 4 semanas.

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 remitir a través de la plataforma OJS. El equipo editorial verificará que las correcciones soli-

citadas 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.

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 Especial: Uso de Técnicas de Ingeniería para combatir COVID-19
N.º 27, enero/junio 2022
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.

