

Número: 20

Redalyc 3.0

ESCI Web of science.

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR

pISSN : 1390-650X

eISSN : 1390-860X

julio/ diciembre 2018

# INGENIUS

Revista de Ciencia y Tecnología



- Implementación de un algoritmo para la detección de señales de tránsito del Ecuador: Pare, Ceda el paso y Velocidad

**Pag. 9**

- Consumo sustentable de agua en viviendas de la ciudad de Cuenca

**Pag.28**

- Módulos elásticos equivalentes para predicción de deformaciones en articulaciones

**Pag. 70**

- Sistema de acceso usando una tarjeta RFID y verificación de rostro

**Pag. 108**

# INGENIUS

INGENIUS • Número 20 • julio/diciembre 2018. Revista semestral 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, Ingeniería de Sistemas e Ingeniería Industrial.

## Consejo de Editores

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

JOHN IGNACIO CALLE SIGÜENCIA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador – Editor Responsable.

MARLON XAVIER QUINDE ABRIL, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador – Editor Adjunto.

## 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.

JOHN MORALES GARCÍA, 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.

FILIFE 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.

FILIFE 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.

**Copyright.** INGENIUS 2018, Universidad Politécnica Salesiana. Se permite la reproducción total o parcial de esta revista citando la fuente.

## 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 Milán, 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.

CELSO 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 Brasilia, 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, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

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

DIEGO CABRERA MENDIETA, MSc, 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, MSc, 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, MSc, 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

JONNATHAN SANTOS BENÍTEZ, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

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

LUIS SERPA ANDRADE, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

CRISTIAN TIMBI SISALIMA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

MILTON TIPAN SIMBAÑA, MSc, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

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

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

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

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

EFRÉN VÁZQUEZ SILVA, PhD, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

JULIO VERDUGO, 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**

JAVIER HERRÁN GÓMEZ, SDB, PHD  
JUAN BOTASSO BOETI, SDB, PHD  
JUAN PABLO SALGADO GUERRERO, MSC  
LUIS ÁLVAREZ RODAS, PHD  
FABRICIO FREIRE, MSC  
JOSÉ JUNCOSA BLANCO, MSC  
JAIME PADILLA VERDUGO, MSC  
FLORALBA AGUILAR GORDÓN, PHD  
SHEILA SERRANO VICENTI, MSC  
JOHN CALLE SIGÜENCIA, MSC  
RENÉ UNDA LARA, MSC  
BETTY RODAS SOTO, MSC  
ANDREA DE SANTIS, MSC  
MÓNICA RUIZ VÁSQUEZ, MSC

### **Editor General**

LUIS ÁLVAREZ-RODAS, PHD

### **Consejo Técnico**

MARCIA PEÑA, Revisora de Estilo,  
Centro Gráfico Salesiano - Editorial Don Bosco  
MARLON QUINDE ABRIL, MSC, Diagramación y Maquetación  
ESTHEFANIA SARANGO COELLO  
ÁNGEL TORRES-TOUKOUMIDIS, PHD

### **Servicio de Publicaciones**

HERNÁN HERMOSA (Coordinación General)  
MARCO GUTIÉRREZ (Soporte OJS)  
PAULINA TORRES (Edición)  
RAYSA ANDRADE (Maquetación)  
MARTHA VINUEZA (Maquetación)

### **Editorial**

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

### **Traductor**

VALENTINA BRAVO

Tiraje: 800 ejemplares

# INGENIUS

REVISTA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Número 20, julio – diciembre 2018

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*.



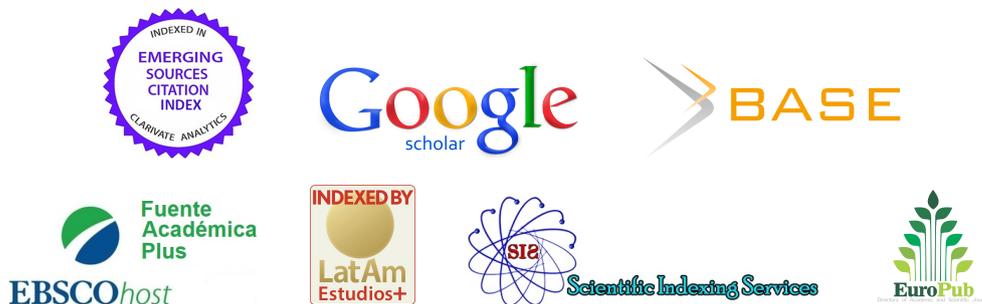
Los artículos de la presente edición pueden consultarse en  
<http://revistas.ups.edu.ec/index.php/ingenius>



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:

La responsabilidad y la ética del trabajo editorial han generado en el equipo de la revista *INGENIUS* la preocupación por fortalecer aquellos aspectos que permiten tanto a los lectores, autores y revisores una interacción pertinente, objetiva y ágil favoreciendo así un trabajo integrado y posibilitando mejorar la calidad de las aportaciones y por ende una mejor difusión de las mismas.

Desde el mes de marzo se ha migrado toda la revista al sistema OJS 3.0 (Open Journal Systems) consiguiendo un proceso eficiente, sin pérdida de datos y minimizando errores en la presentación de los números anteriores. Los cambios generados con esta versión brindan al usuario una nueva interfaz más ágil y simplificada: una comunicación fluida con el equipo editorial con reducción de tiempos. El sistema presenta una nueva arquitectura de software con nuevas características de seguridad lo que lo hace moderno y eficaz. La gestión de los artículos para los lectores posibilita una mejor visualización, es más fácil acceder a los documentos para descargarlos y proporciona estadísticas de cada publicación.

Otro aspecto relevante que afirma el compromiso de calidad de la publicación es la integración de la revista a REDALYC (Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal) y como se manifiesta en su portal web: «La propuesta concreta de redalyc.org se materializa en la creación, diseño y mantenimiento de un sistema de información científica en línea, de acceso abierto, que funciona

como punto de encuentro para todos aquellos interesados en reconstruir el conocimiento científico de y sobre Iberoamérica. El portal de Internet que es la parte más visible de este esfuerzo fue abierto formalmente al público durante el primer trimestre del año 2003, como parte de una iniciativa derivada de un grupo de investigadores y editores preocupados por la escasa visibilidad de los resultados de investigación generados en y sobre la región». Dentro de este gran esfuerzo por seguir avanzando, la revista también fue indexada en Emerging Source Citation Index (ESCI), base de datos donde están todas las revistas que están siendo evaluadas para entrar a formar parte de las bases de datos de Web of Science Core Collections: Science Citation Index (SCIE), Social Science Citation Index (SSCI) y Arts & Humanities Citation Index (AHCI). El objetivo de este índice es el de contribuir a la visibilidad y citación, y favorecer un proceso transparente de selección.

Además, desde este número la publicación se presentará completa en dos idiomas, español e inglés, esto favorecerá el incremento de lectores y autores y posibilitará una mayor cobertura en la difusión de los trabajos de investigación que se publican en *INGENIUS*.

El trabajo desarrollado por todo el equipo de la revista ha empezado a generar sus frutos, pues se ha conseguido un incremento en el número de envíos y se ha logrado una mayor diversificación geográfica de las aportaciones, como se puede verificar en el presente número en donde tenemos participaciones de México, Brasil, Argentina, y Ecuador.

John Calle Sigüencia, MSc  
EDITOR RESPONSABLE

# ÍNDICE

<b>Implementación de un algoritmo para la detección de señales de tránsito del Ecuador: Pare, Ceda el paso y Velocidad</b> .....	9
Implementation of an algorithm for Ecuadorian traffic sign detection: Stop, Give-way and Velocity cases Marco Flores-Calero, Cristian Conlago, Jhonny Yunda, Milton Aldás, Carlos Flores	
<b>Diseño de una red neuronal para la predicción del coeficiente de pérdidas primarias en régimen de flujo turbulento</b> .....	21
Design of a Neural Network for the Prediction of the coefficient of Primary Losses in Turbulent Flow Regime Jairo Castillo-Calderón, Byron Solórzano-Castillo, José Moreno-Moreno	
<b>Consumo sustentable de agua en viviendas de la ciudad de Cuenca</b> .....	28
Sustainable Water Consumption of Dwellings In The Cuenca City Eduardo Molina, Felipe Quesada, Andrea Calle, Jessica Ortiz, Diana Orellana	
<b>Predicción de la reducción del impacto térmico en un edificio con doble pared</b> .....	39
Prediction of thermal impact reduction in a double wall building Marcelo Eduardo Berli, Agustín Brondino, José Di Paolo	
<b>Detección de peatones en la noche usando Faster R-CNN e imágenes infrarrojas</b> .....	48
Pedestrian detection at night by using Faster R-CNN y infrared images Michelle Galarza Bravo, Marco Flores Calero	
<b>Estudio técnico del uso de energía solar y biogás en vehículos eléctricos en Ilhabela-Brasil</b> .....	58
A Technical Study of Solar and Biogas Energy Usage in Electric Vehicles in Ilhabela, Brazil Raul Pereira Micena, Omar R. Llerena P., Wendell de Queiróz Lamas, José Luz Silveira	
<b>Módulos elásticos equivalentes para predicción de deformaciones en articulaciones</b> ...	70
Equivalent elastic modulus for prediction of deformations in joints Franco Marinelli, Brenda A. Weiss, Marcelo E. Berli, José Di Paolo	
<b>Métodos multicriterio aplicados en la selección de un material para discos de freno</b> ..	83
Multi-criteria Methods Applied in the Selection of a Brake Disc Material Mario Chérrez-Troya, Javier Martínez-Gómez, Diana Peralta-Zurita, Edilberto Antonio Llanes-Cedeño	
<b>Estudio cinemático y dinámico del sistema de suspensión de un monoplaza de competencia eléctrico Formula Student</b> .....	96
Kinematic and dynamic study of the suspension system of an electric single seater competition Formula Student Christian Arévalo, Ayrton Medina, Juan Valladolid	
<b>Sistema de acceso usando una tarjeta RFiD y verificación de rostro</b> .....	108
Access System Using an RFiD Card and Face Verification José Ignacio Vega-Luna, Francisco Javier Sánchez-Rangel, Gerardo Salgado-Guzmán, Mario Alberto Lagos-Acosta	
<b>Normas editoriales</b> .....	119
Guidelines	



# IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO PARA LA DETECCIÓN DE SEÑALES DE TRÁNSITO DEL ECUADOR: PARE, CEDA EL PASO Y VELOCIDAD

## IMPLEMENTATION OF AN ALGORITHM FOR ECUADORIAN TRAFFIC SIGN DETECTION: STOP, GIVE-WAY AND VELOCITY CASES

Marco Flores-Calero<sup>1,2,\*</sup>, Cristian Conlago<sup>3</sup>, Jhonny Yunda<sup>3</sup>,  
Milton Aldás<sup>4</sup>, Carlos Flores<sup>5</sup>

### Resumen

Este artículo presenta un prototipo de un sistema embarcado en un vehículo para la detección de señales de tránsito (SDST). Por lo tanto, un nuevo enfoque para la construcción de un SDST se presenta usando las siguientes innovaciones, i) un método eficiente de segmentación por color para la generación de regiones de interés (ROI) basado en los algoritmos  $k$ -NN, con  $K_m - means$ , ii) una nueva versión del descriptor HOG para la extracción de características, y iii) el entrenamiento del algoritmo SVM no-lineal para multclasificación. El enfoque propuesto ha sido probado sobre un subconjunto de las señales de tránsito ecuatorianas de regulación (Pare, Ceda el paso y Velocidad). Varios experimentos han sido desarrollados en condiciones reales de conducción en varias ciudades ecuatorianas, bajo tres condiciones de iluminación: normal, soleado y nublado. Este sistema ha mostrado un desempeño global del 98,7 % para la segmentación, 99,49 % para la clasificación y una precisión global del 96 % en la detección.

**Palabras clave:** accidentes, Ecuador, HOG,  $k - NN$ ,  $K_m - means$ , señales de tránsito, SVM, Pare, Ceda el paso, Velocidad.

### Abstract

This paper presents a prototype for a traffic sign detection system (TSDS) on-board a moving vehicle. Therefore, a new approach to the development of an TSDS is presented, using the following innovations: i) an efficient method of color segmentation for the generation of regions of interest (ROIs) based on  $k$ -NN with  $K_m - means$ , ii) a new version of the HOG descriptor for feature extraction and iii) SVM training for stage multi-classification. The proposed approach has been specialized and tested on a subset of regulatory Ecuadorian signs (Stop, Give-way and Speed). Many experiments have been carried out in real driving conditions, under different lighting changes such as normal, sunny and cloudy. This system has showed a global performance of 98.7% for segmentation, 99.49% for classification and an accuracy of 96% for detection.

**Keywords:** Accidents, Ecuador, HOG,  $k - NN$ ,  $K_m - means$ , SVM, Traffic sign, Stop, Give way, Velocity.

<sup>1,\*</sup>Departamento de Eléctrica y Electrónica, Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE. Sangolquí – Ecuador. Autor para correspondencia ✉: [mjflores@espe.edu.ec](mailto:mjflores@espe.edu.ec), <http://orcid.org/0000-0001-7507-3325>

<sup>2</sup>Departamento de Sistemas Inteligentes, Tecnologías I&H. Latacunga, Ecuador.

<sup>3</sup>Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control, Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE <http://orcid.org/0000-0002-7772-5259>, <http://orcid.org/0000-0003-0498-9656>

<sup>4</sup>Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Universidad Técnica de Ambato, Ambato – Ecuador. <http://orcid.org/0000-0003-2726-4092>

<sup>5</sup>Servicio de Investigación de Accidentes de Tránsito (SIAT), Policía Nacional del Ecuador, Latacunga – Ecuador. <http://orcid.org/0000-0003-2131-6883>

Recibido: 02-04-2018, aprobado tras revisión: 21-05-2018

Forma sugerida de citación: Flores-Calero, M.; Conlago, C.; Yunda, J.; Aldás, M. y Flores, C. (2018). «Implementación de un algoritmo para la detección de señales de tránsito del Ecuador: Pare, Ceda el paso y Velocidad». INGENIUS. N.º 20, (julio-diciembre). pp. 9-20. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n20.2018.01>.

## 1. Introducción

### 1.1. Notación

La notación usada a lo largo de este artículo se presenta en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Notación

Nombre	Siglas
K-nearest neighborhood	k-NN
Método de partición en Km medias	Km-means
Support Vector Machine	SVM
Principal Component Analysis	PCA
Support vector regresion	SVR
Convolutional Neural Network	CNN
Extrem Learning Machine	ELM
Multi-Layer Perceptron	MLP
Adaptive Boosting	Adaboost
Histogram of Oriented Gradient	HOG
Pyramidal Histogram of Oriented Gradient	PHOG
Aggregate Channel Features	ACF
Speeded Up Robust Features	SURF
Integral Channel Features	ICF
Discrimiative Codeword Selection	DSC
Region Of Interest	ROI
Espacio de color Red, Green, Blue	RGB
Espacio de color Luminancia, con crominancia Cb y Cr	YCbCr
Espacio de color Luminance, a* entre rojo y verde y b* entre amarillo y azul	L*a*b*
Espacio de color Hue, Saturation, Intensity	HSI
Espacio de color Hue, Saturation, Value	HSV
Receiver Operating Characteristic	ROC
Area under a ROC curve	AUC
Sistemas de detección de señales de tránsito	SDST

### 1.2. Motivación

Las señales de tránsito tienen como objetivo el ayudar al movimiento ordenado y seguro de los actores, permitir un continuo flujo del tránsito tanto de vehículos como de peatones. Cada una de estas señales presenta instrucciones, las cuales proporcionan información acerca de rutas, destinos, puntos de interés, prohibiciones, alertas, etc. Estas señales deben ser respetadas por todos los usuarios viales con la finalidad de evitar inesperados y lamentables accidentes, y sobre todo, contar con una circulación confiable y segura [1]. El riesgo de que un peatón adulto muera tras ser atropellado por un automóvil es de menos del 20 % a una velocidad de 50 km/h, y de cerca del 60 % a 80 km/h, por lo que es fundamental para los conductores tener en cuenta la velocidad establecida por las señales de tránsito [2].

Actualmente, el Ecuador dispone de la mejor red vial de Sudamérica [3], sobre esta se ubican las señales de tránsito reglamentarias de Pare y Ceda el paso y Velocidad, en las intersecciones viales, redondeles y aproximaciones por vías secundarias. A pesar de esta importante infraestructura vial supera la tasa de muertes en accidentes de tránsito con un 3,14 % sobre

la media de los países de la región andina. Así, los accidentes de tránsito son un problema constante, debido a varios factores críticos, como la imprudencia de los conductores al conducir con exceso de velocidad y al no respetar las señalizaciones de tránsito [4]. En el año 2015, el 13,75 % de todos los accidentes de tránsito sucedieron en las intersecciones viales [5] generando el 8,14 % de las personas fallecidas bajo este percance. Por otra parte, un peatón adulto tiene menos de un 20 % de posibilidades de morir si es atropellado por un automóvil a menos de 50 km/h, pero casi un 60 % de riesgo de morir si lo golpea a 80 km/h [2].

Los SDST toman cada vez mayor importancia [6, 7] porque pueden ayudar en la prevención y en la reducción de los accidentes de tránsito [8]. Sin embargo, estos sistemas aún están lejos de ser perfectos, y deben ser especializados por países, adaptados a las particularidades del diseño de la señalética de tránsito de cada nación [9].

Por lo tanto, en esta investigación se presenta un SDST especializado en tres tipos de señales de tránsito del Ecuador como son Pare, Ceda el paso y Velocidad. El poder detectarlas es importante porque permite alertar al conductor de que atravesará una zona con alto potencial de choque con otro vehículo. En el caso del disco Pare, el conductor debe detenerse completamente; en el caso de Ceda el paso, el conductor debe entrar en vigilia, y en el caso de velocidad el conductor debe respetar los límites de velocidad de 50 km/h y 100 km/h, en zonas urbanas y de autopista, respectivamente. La señal de velocidad de 50 km/h es el límite más cotidiano en ambientes urbanos y la de 100 km/h en autopistas.

Para la implementación de SDST se han utilizado modernas técnicas de visión por computador e inteligencia artificial con el fin de cubrir todos los casos que se presentan en la conducción durante el día, como son: variabilidad de la iluminación, oclusión parcial y deterioro de las señales.

El resto del documento está organizado de la siguiente manera: la segunda sección corresponde a los trabajos previos en la detección de señales de tránsito. En el apartado tres un nuevo sistema para la detección de señales de tránsito para el caso de las señales de tránsito ecuatorianas de Pare, Ceda el paso y Velocidad. Luego, la siguiente sección exhibe los resultados experimentales en condiciones reales de conducción. Finalmente, la última parte está dedicada a las conclusiones y los trabajos futuros.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Trabajos previos

Para el desarrollo de sistemas de detección automática de las señales de tránsito se suele dividir al problema

en dos partes, segmentación y reconocimiento/clasificación [10].

- a) En el caso segmentación, una de las características predominantes, en el espectro visible, es el color, donde se han utilizado espacios de color y distintas técnicas de visión por computador para generar regiones con alta posibilidad de contener una señal de tránsito. Tanto es así que la mayoría de las técnicas basadas en color buscan ser robustas frente a las variaciones de iluminación durante el día, en distintos escenarios como pueden ser soleados, nublados, etc. Así Salti *et al.* [11] han utilizado tres espacios de color derivados de RGB, el primero para resaltar las señales de tránsito con predominancia de los colores azules y rojos, el segundo es para las señales con rojo intenso y el tercero para los azules vivos. Li *et al.* [12] han construido un espacio donde resaltan los objetos dominados por los colores azul-amarillo y verde-rojo, sobre el cual, utilizando el algoritmo de agrupamiento K-means [13] construyen un método de clasificación por color para la generación de ROI. Nguyen *et al.* [6] han utilizado el espacio HSV con varios umbrales para generar un conjunto de ROI buscando colores rojos y azules. Lillo *et al.* [14] han utilizado los espacios  $L^*a^*b^*$  y HSI para detectar señales donde predominan los colores rojo, blanco y amarillo, usando las componentes  $a^*$  y  $b^*$  han construido un clasificador para estos colores. Chen and Lu [15] han utilizado multiresolución y técnicas AdaBoost para fusionar dos fuentes de información, visual y localización espacial; en la visual construyen dos espacios de color basados en RGB denominados mapas salientes de color, en la espacial han usado el gradiente con distintas orientaciones. Finalmente, Han *et al.* [16] han usado la componente H del espacio HSI, para generar un intervalo, donde resaltan las señales de tránsito, y construir una imagen en grises donde se localizan las ROI. Villalón *et al.* [17] han implementado un filtro usando el espacio de color RGB normalizado, sobre el cual, mediante el cálculo de parámetros estadísticos han generado las regiones de color rojo y así han obtenido las ROI.
- b) En el escenario reconocimiento/clasificación se han utilizado algunos métodos para la extracción de características en conjunto con un algoritmo de aprendizaje-máquina [18–20], para así clasificar y reconocer los distintos tipos de señales. Esta etapa se divide en dos partes: i) método de extracción de características y, ii) elección del algoritmo de clasificación. En el primer caso se tiene una amplia variedad de propuestas. Así, Salti *et al.* [11], Huang *et al.* [21], Shi and Li [22]

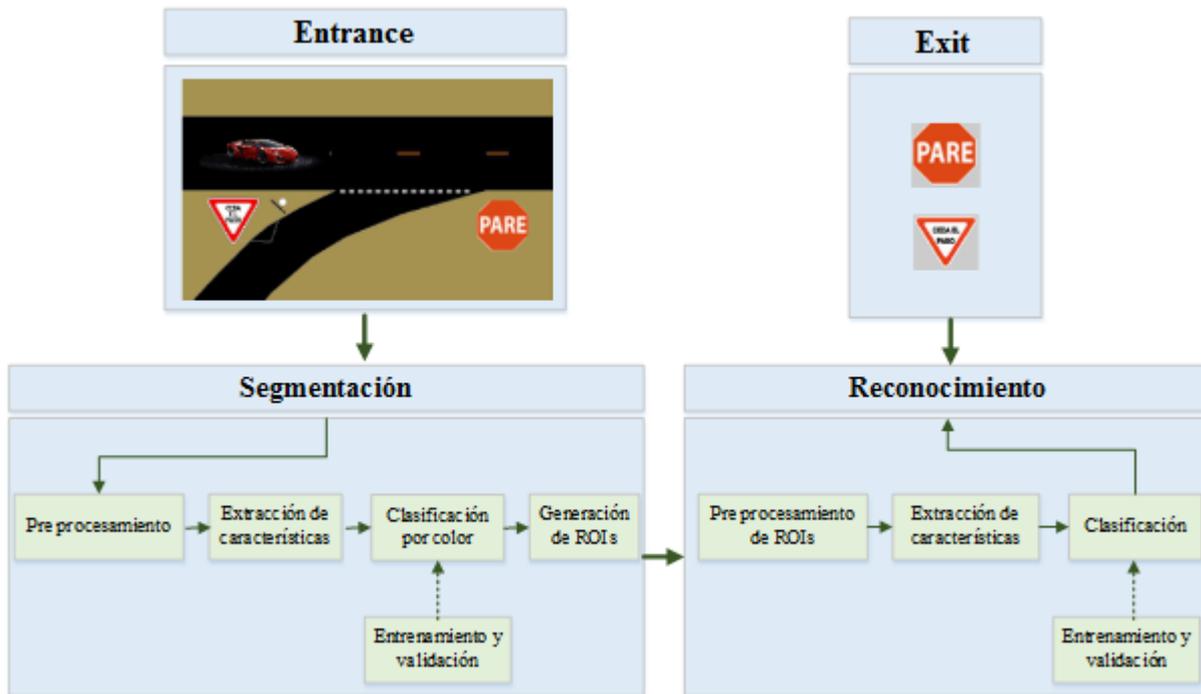
han utilizado el descriptor HOG [23] con tres variantes especializadas en señales de tránsito. Li *et al.* [12] han usado el descriptor PHOG, que es una variación de HOG en sentido piramidal. Lillo *et al.* [14] han implementado la extracción de características usando la transformada discreta de Fourier. Han *et al.* [16] han utilizado el método SURF [24]. Chen and Lu [15] emplearon DSC iterativo para la generación del vector de características. Mongoose *et al.* [9] implantaron en conjunto ICF y ACF para generar las características. Pérez *et al.* [10] han usado la técnica PCA para la reducción de la dimensión y la elección de características dominantes. Finalmente, Lau *et al.* [25] han usado una ponderación de los píxeles vecinos para resaltar las características del objeto de interés. En la segunda cuestión, los algoritmos preferidos son: SVM [20], [13], utilizado en los trabajos de Salti *et al.* [11], Li *et al.* [12], Lillo *et al.* [14] y Shi and Li [26]. SVR usado en Chen and Lu [15], [20] implementado en las investigaciones de Han *et al.* [16]. Redes neuronales artificiales, empleadas por Huang *et al.* [21] con el caso ELM y Pérez *et al.* [10] con la implementación MLP. Adaboost con árboles de decisión utilizados en el trabajo de Mogelmoose *et al.* [9]. Villalón *et al.* [17] han desarrollado una plantilla estadística basada en un modelo en probabilidad ajustado sobre los espacios YCbCr y RGB normalizado. En los últimos años, las técnicas basadas en aprendizaje profundo van ganando mayor importancia, tanto es así que CNN y sus variaciones son utilizadas para la clasificación automática, donde el vector de características se extrae sin la intervención humana directa, en este caso están los trabajos de Lau *et al.* [25], Zhu *et al.* [27] y Zuo *et al.* [28].

- c) Respecto a las bases de datos de señales de tránsito se puede mencionar que cada país tiene sus propias normativas en cuanto a su señalética, divide en las categorías de informativas, obligatorias, prohibitivas y advertencia [9], [11], [14], [15], [27]. En la actualidad, las principales bases de datos, presentes en la bibliografía, corresponden a países como Alemania [10], [21], Italia [11], España [14], Japón [6], Estados Unidos [9], Suecia [27], Malasia [25]; aisladamente se tiene el caso de Chile [17]. Esta revisión bibliográfica demuestra que no existe información importante, y menos aún, confiable de los países en desarrollo, como es el caso del Ecuador, en lo que respecta a las bases de datos de señales de tránsito; esto genera un reto para levantar este tipo de información, que además debe ser relevante para garantizar la seguridad vial y el mantenimiento de la infraestructura vial.

## 2.2. Métodos para la construcción del sistema de detección de señales de tránsito

El esquema del sistema propuesto en esta investigación se presenta en la Figura 1, donde están las etapas de segmentación (localización) y reconocimiento (clasificación). En el proceso de segmentación se genera un

conjunto de ROI, que posteriormente será enviado a la etapa de clasificación para su reconocimiento. En esta propuesta únicamente se trabaja en el caso restringido de las señales de tránsito Pare, Ceda el paso y Velocidad de 50 km/h y 100 km/h. Estas señales tienen en común el color rojo, y pertenecen al tipo prohibición.



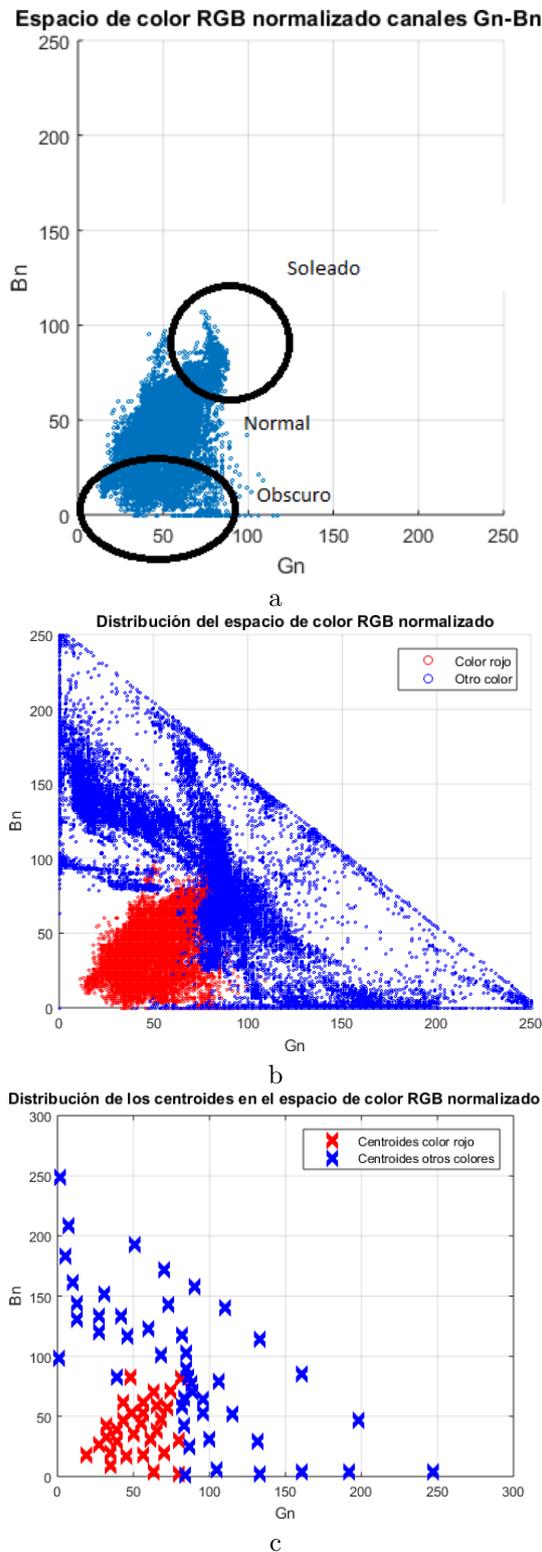
**Figura 1.** Esquema propuesto para la localización y reconocimiento de señales de tránsito en intersecciones viales en el Ecuador en el espectro visible, para los casos Pare y Ceda el paso; y su posterior extensión al caso de velocidad en 50 km/h y 100 km/h.

### 2.2.1. Segmentación por color y generación de ROI

La Figura 1 (izquierda) muestra el esquema de segmentación que se describe a continuación.

La segmentación se realiza discriminando el color rojo del fondo, es decir, del resto de colores. Experimentalmente se ha elegido el espacio de color RGB normalizado (RGBN) porque presenta una distribución más compacta en los canales  $B_n$  y  $G_n$ , cuyos valores se encuentran en los intervalos  $[20; 90]$  y  $[0; 90]$  respectivamente. La Figura 2(a) muestra la distribución del color rojo en función de las condiciones de iluminación, normal, soleado y oscuro. Figura 2(b) muestran las distribuciones de las clases, donde el rojo representa la clase de interés y el azul identifica la clase de no interés.

- 1) **Puntos representativos en el espacio  $B_n$  y  $G_n$ :** Para generar un número reducido de puntos representativos de cada clase se utiliza el algoritmo de agrupación  $K_m$ -means [19]; de esta manera, se obtienen  $K_m$  centroides para cada una de las clases. Utilizando los métodos de Calinski-Harabasz [29], Davies-Bouldin [30], Gap [31] y Silhouettes [32] se ha llegado a determinar experimentalmente el valor eficiente de  $K_m$ , obteniéndose los siguientes valores, 30 y 40 para las clases rojo y no rojo (otros colores), respectivamente. La Figura 2(b) muestra los centroides de las dos clases generadas con  $K_m$ . Para generar esta figura se han utilizado muestras en tres condiciones de iluminación: soleado, normal y oscuro.



**Figura 2.** Distribución del color en el espacio RGB normalizado  $B_n$  y  $G_n$ , (a) distribución en función de las condiciones de iluminación, (b) representación de las clases de interés y no interés, (c) gráfico de los centroides generadas con  $K_m - means$ .

- 2) **Diseño del clasificador basado en  $k - NN$ :**  
Para diseñar este clasificador es importante ele-

gir un valor de adecuado que permita la mejora discriminación entre las clases de interés y el fondo. En este sentido, se ha usado el valor del área bajo la curva, conocido como índice AUC, de la curva ROC [33]. Los valores utilizado para este procedimiento están entre 1 y 8. La Tabla 2 muestra los resultados para elegir el mejor valor de  $k$ .

**Tabla 2.** Elección del parámetro  $k$  en  $k - NN$

$k$	1	2	3	4
AUC	0.985	0.931	0.986	0.987
$k$	5	6	7	8
AUC	0.985	0.983	0.982	0.983

- 3) **Postprocesamiento de cuerpos:** Posteriormente, utilizando los operadores morfológicos de dilatación y erosión [26] se eliminan ciertos cuerpos que no cumplen con características específicas de tamaño para ser candidatos a señales de tránsito. Experimental se ha fijado varios umbrales para este procedimiento.
- 4) **Restricciones geométricas:** Finalmente, se eliminan los cuerpos que no cumplen la relación alto/ancho, usando umbrales determinados experimentalmente; en la Tabla 3 se presentan los parámetros necesarios en función de la distancia de referencia. Esta distancia es parte de la zona de riesgo de colisión de un vehículo.

**Tabla 3.** Características geométricas que debe cumplir una ROI sobre una imagen de tamaño  $640 \times 480$  en función de la distancia de referencia

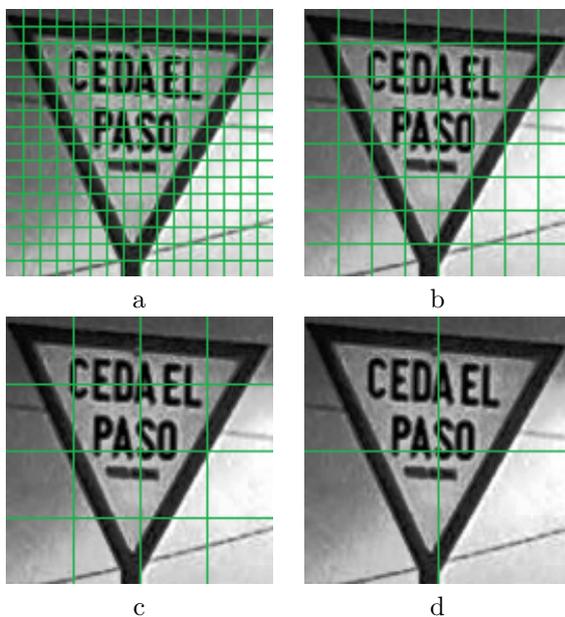
Característica	Valor mínimo	Valor máximo
Área	400 pixeles	10 000 pixeles
Relación ancho / alto	0,6	1,4
Distancia de referencia	20 metros	5 metros

### 2.2.2. Reconocimiento de las señales de tránsito

En esta etapa se clasifican las ROI provenientes de la etapa de segmentación, para determinar si corresponden a una señal de Pare, Ceda el paso, Velocidad u otro objeto que no sea de interés.

En la Figura 1 (derecha) se muestra el esquema de reconocimiento, el mismo que consta de las siguientes partes:

- 1) **Preprocesamiento de los candidatos:** Se transforma las imágenes correspondientes a las ROI a escala de grises, después se normalizan al tamaño  $32 \times 32$  píxeles y posteriormente se realiza la ecualización del histograma para obtener una imagen con una distribución uniforme de los niveles de gris. Este proceso permite aumentar el contraste de la imagen y disminuir los cambios abruptos de iluminación.
- 2) **Extracción de características:** Se utiliza una nueva versión del descriptor HOG [34] para encontrar las características representativas de una señal de tránsito. La innovación desarrollada sobre este descriptor se centra en variar el tamaño de las celdas y las orientaciones, y encontrar la mejor combinación adaptada a las señales de tránsito. En este sentido, las celdas toman valores de  $2 \times 2$ ,  $4 \times 4$ ,  $8 \times 8$ ,  $16 \times 16$  píxeles. La Figura 3 muestra esta forma de división en los cuatro casos. La orientación se obtiene dividiendo al rango de orientación sin signo de  $[-90^\circ; 90^\circ]$  o  $[-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}]$  en 3, 6, 9, 12 y 15 intervalos.



**Figura 3.** Variación del tamaño de celda sobre imágenes de tamaño  $32 \times 32$  píxeles: (a)  $2 \times 2$ , (b)  $4 \times 4$ , (c)  $8 \times 8$  (d)  $16 \times 16$ .

- 3) **Entrenamiento del clasificador basado en SVM:** Se utiliza SVM [18–20] con tres núcleos diferentes para experimentar la mejor opción: lineal, polinómico y RBF. Para el entrenamiento se usan tres conjuntos de datos que corresponden a las señales Pare, Ceda el paso, Velocidad y otros elementos que no pertenecen a los casos anteriores.

Sobre esta gama de parámetros se escoge la mejor opción usando el índice AUC [33]. En total se evalúan 60 casos combinando los puntos 2 y 3, de los cuales se extraen los que generan mejores resultados en la siguiente sección.

### 3. Resultados y discusiones

#### 3.1. Sistema de percepción y procesamiento

El sistema de detección de señales de tránsito total se presenta en la Figura 4. El sistema de percepción está compuesto por una cámara webcam con entrada USB a 25 fotogramas por segundo, una pantalla de visualización y un soporte para la cámara. El sistema de procesamiento es un computador instalado sobre el vehículo experimental ViiA. Este vehículo incorpora una fuente de poder de 12 V-120 AC que suministrar continuamente corriente eléctrica para el funcionamiento del sistema en carretera.



**Figura 4.** Sistema de detección de señales de tránsito del Ecuador, en los casos Pare, Ceda el paso y Velocidad (50 y 100), instalado sobre el parabrisas de un vehículo experimental.

Actualmente, este sistema es de fácil instalación en cualquier tipo de vehículo, y no interfiere con las labores de conducción debido a su reducido tamaño.

#### 3.2. Base de datos de entrenamiento, validación y experimentación

Las bases de datos de entrenamiento y de validación han sido construidas con imágenes de señales de tránsito del Ecuador, tomadas en las ciudades de Latacunga, Ambato, Salcedo, Quito y Sangolquí, en escenarios reales de conducción, en distintas condiciones de iluminación durante el día. Estas condiciones corresponden a los casos de normal, soleado y nublado. Más detalles se encuentran en la Tabla 4.

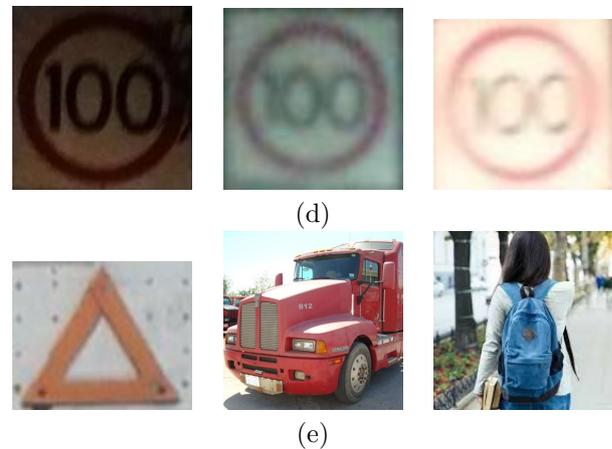
**Tabla 4.** Condiciones ambientales para la adquisición de las imágenes

Ambiente	Tiempo real sobre ciudades y autopistas
Condiciones del clima	Normal, soleado y nublado
Tiempo de captura	5.30 a. m. a 7.30 p. m.
Velocidad de captura de cámara	25 fotogramas por segundo
Tamaño de la imagen	640 x 480 píxeles
Fondo de la imagen	Complejo, no fijo
Tamaño de las señales de tránsito	Diferente
Condiciones de las señales de tránsito	Desvanecido, borroso, dañado, ocluido
Tipo de señales de tránsito	Pare, Ceda el paso y Velocidad de 50 y 100

En la Tabla 5 se indica el tamaño de los conjuntos de entrenamiento y de validación obtenidos por medio del método de Holdout [35] y en la Figura 5 se observan varios ejemplos positivos y negativos.

**Tabla 5.** Tamaño de los conjuntos de entrenamiento y validación por las señales Pare, Ceda el paso y negativas

	Número de muestras					Total
	Pare	Ceda el paso	Vel. 50	Vel. 100	Negativas	
Entrenamiento	700	700	700	700	2800	5600
Validación	300	300	300	300	1200	2400
Total	1000	1000	1000	1000	4000	8000

**Figura 5.** Ejemplos de la base de datos de señales de tránsito del Ecuador en distintas condiciones de iluminación y de estado, (a) Pare, (b) Ceda el paso, (c) límite de 50 km/h, (d) límite de 100 km/h y (e) ejemplos negativos.

Para incrementar el tamaño del conjunto de entrenamiento se rotaron aleatoriamente las imágenes hasta obtener un total de cinco veces el tamaño original. De esta manera, se incrementa la variabilidad de la base de datos.

Posteriormente para verificar el funcionamiento del sistema se construyó una base de datos con videos en situaciones reales de conducción, en el espectro visible bajo distintas condiciones de iluminación. Esta base está constituida por cinco ejemplares en diferentes condiciones de iluminación, donde las señales han sido localizadas manualmente con fines de evaluación [33].

### 3.3. Análisis de resultados

Los resultados se pueden resumir en los siguientes puntos:

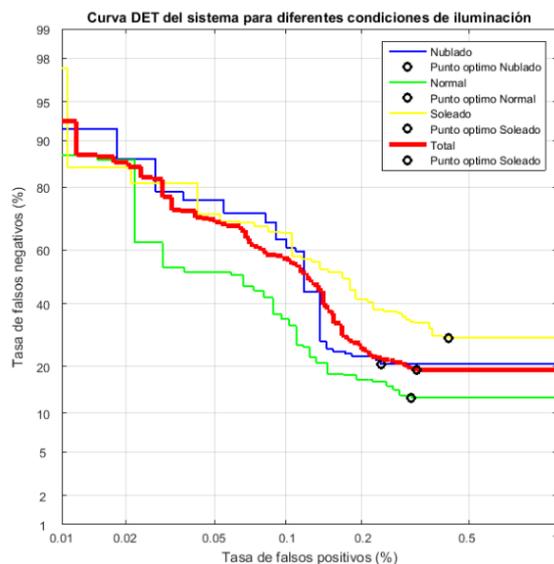
- 1) Para el caso de la segmentación por color, el algoritmo de clasificación genera un AUC de 0,986, con  $k = 4$  y  $K_m = 30$  para la clase de color rojo y  $k = 4$  y  $K_m = 30$  para la clase otros colores.
- 2) Para el caso de la clasificación, los mejores parámetros del descriptor HOG son celdas de  $8 \times 8$  píxeles, bloques de  $2 \times 2$  celdas con solapamiento simple, 9 orientaciones sin signo y SVM polinomial de parámetros  $C = 215$ ,  $r = 0$ ,  $\gamma = 1/m$ , con  $m$  es el tamaño del vector de características. En la Tabla 6 se presentan los resultados para el caso de  $8 \times 8$  píxeles, donde el mejor resultado se encuentra resaltado en negrilla.

**Tabla 6.** Resultados de clasificación con características HOG con celdas de tamaño  $8 \times 8$  píxeles en todas las orientaciones

Orientaciones	Tipo de núcleo		
	Lineal	Polinómico	RBF
3	0,9603	0,9913	0,9755
6	0,9784	0,9947	0,9834
9	0,9798	<b>0,9949</b>	0,9784
12	0,9762	0,9921	0,9827
15	0,9834	0,9971	0,9819

Para medir el poder de detección, la curva de la tasa de falsos negativos (taza de pérdida) *versus* la tasa de falsos positivos, en escala logarítmica en el rango de 0.01–1m [36], se presenta en la Figura 6, en ella se observa que el mejor desempeño se realiza en días normales con una tasa de pérdidas del 13 % y la peor ejecución es en días soleados con una tasa de pérdidas del 28 %.

El sistema tiene un excelente desempeño, con una precisión promedio del 96 %. La peor precisión se logra en condiciones soleadas, ya que el exceso de luz impide una correcta segmentación para la generación de ROIS, ver Tabla 7.



**Figura 6.** Curva DET del sistema de detección de señales de tránsito, separado en los distintos casos de iluminación y globalmente.

**Tabla 7.** Resultados del sistema de detección de señales de tránsito en diferentes escenarios de iluminación durante el día

	TRPa	TFNb	TRNc	TFPd	Exe	Prf
Día normal	0,87	0,13	0,997	0,003	0,98	0,97
Día soleado	0,72	0,28	0,995	0,005	0,97	0,9
Día nublado	0,79	0,21	0,997	0,003	0,97	0,96
Sistema total	0,81	0,19	0,997	0,003	0,98	0,96

a Tasa de reales positivos, b Tasa de falsos negativos  
c Tasa de reales negativos, d Tasa de falsos positivos  
e Exactitud, f Precisión

Varios ejemplos generados por el sistema se los puede observar en las Figuras 7, 8, 9 y 10. Las muestras se encuentran en diversas condiciones de iluminación durante el día, amanecer e inicio de la noche, al recorrer zonas urbanas y zonas de autopista alrededor de las ciudades de Quito y Sangolquí.



(a)



(b)

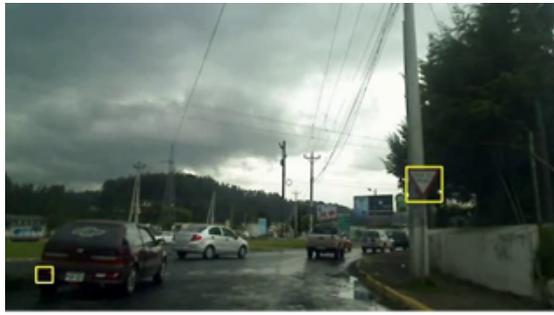


(c)

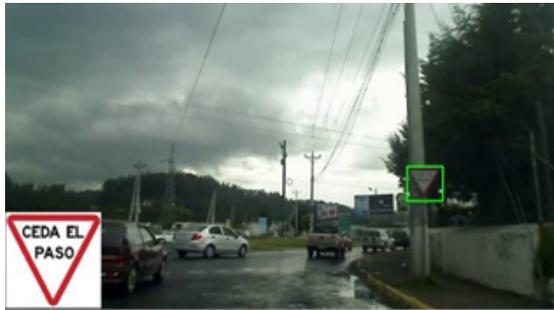
**Figura 7.** Resultados del sistema de detección de señales de tránsito en el caso Pare, durante un día soleado sobre una autopista; (a) imagen de entrada, (b) ROI y (c) detecciones.



(a)



(b)



(c)

**Figura 8.** Resultados del sistema de detección de señales de tránsito en los casos Pare y Ceda el paso, durante un día oscuro en zona urbana; (a) imagen de entrada, (b) ROI y (c) detecciones.



(a)



(b)



(c)

**Figura 9.** Resultados del sistema de detección de señales de tránsito en el caso de velocidad de 50, durante un día oscuro (al amanecer) en zona urbana; (a) imagen de entrada, (b) ROI y (c) detecciones.



(a)



(b)



(c)

**Figura 10.** Resultados del sistema de detección de señales de tránsito en el caso de velocidad de 100, durante un día oscuro en zona urbana; (a) imagen de entrada, (b) ROI y (c) detecciones.

### 3.4. Tiempos de cómputo

En la Tabla 8 se presenta el tiempo de cómputo del sistema global.

**Tabla 8.** Tiempos de cómputo total del sistema de detección de señales de tránsito del Ecuador en el espectro visible en los casos Pare, Ceda el paso.

Etapa	Tiempo promedio (ms)
Captura	1,75
Segmentación	28,79
Reconocimiento	14,05
Visualización	1.75
Tiempo total	46,34

Estos resultados son los valores promedios del procesamiento de imágenes de tamaño píxeles, distribuidos de la siguiente manera: 9999 en soleado, 14 744 en normal y 12 442 en nublado.

A partir de estos resultados experimentales se puede verificar que los tiempos de cómputo; en los casos de segmentación y de reconocimiento, son bastante reducidos y por ende competitivos para ser parte de aplicaciones en sistemas en tiempo real.

## 4. Conclusiones y trabajos futuros

En este trabajo de investigación, en el campo de los sistemas de asistencia a la conducción con énfasis en la detección de las señales de tránsito, se realizaron los siguientes aportes originales:

- La construcción de una nueva base datos para el reconocimiento de señales de tránsito del Ecuador, en los casos Pare, Ceda el paso y Velocidad. Esta información está disponible para el libre uso de la comunidad científica.
- El desarrollo de un nuevo método de segmentación por color para la generación de ROI utilizando el clasificador  $k$ -NN junto con el algoritmo de agrupamiento  $K_m - means$ . Esta implementación cubre eficientemente los escenarios de iluminación normal, soleado y oscuro, durante el día. Además, se incluye la distancia como un parámetro de referencia para la preselección de ROI. De esta manera, esta propuesta alcanza una tasa de clasificación del 98,7 % en los píxeles de interés y el fondo.
- La implementación de una nueva versión del descriptor HOG que consiste en celdas de  $8 \times 8$  píxeles, bloques de  $2 \times 2$  celdas con solapamiento simple y 9 orientaciones sin signo. La tasa de clasificación es del 99,49 usando SVM con núcleo polinómico.

- La construcción de un sistema de detección de las señales de tránsito del Ecuador, especializado en los casos Pare y Ceda el paso. La curva DET indica que su desempeño es del 96 %, de manera que es competitivo respecto a las propuestas presentes en el estado del arte.
- La construcción de un asistente de ayuda a la conducción que trabaja en tiempo cuasirreal, es decir, a 21,58 fotogramas por segundo, es un sistema de fácil instalación en un vehículo de uso cotidiano.

Para el futuro se extenderá esta metodología a todas las señales de tránsito del tipo prohibición del Ecuador, donde se encuentran el resto de las señales de límites de velocidad, para área urbana y autopistas. Finalmente, indicar que se introducirá un método para comprobar y comparar la calidad del clasificador, en este sentido, se está preparando un método basado en ELM.

## Agradecimientos

El vehículo utilizado para el desarrollo de una parte significativa de este proyecto ha sido facilitado por la empresa Tecnologías I&H, a ella nuestro agradecimiento. Además, agradecemos a los revisores anónimos por su valioso aporte ya que han contribuido significativamente en la mejora de este manuscrito.

## Referencias

- [1] INEN, *RTE INEN 004-1:2011. Señalización vial. Parte 1. Señalización vertical*, Instituto Ecuatoriano de Normalización Std., 2011. [Online]. Available: <https://goo.gl/pSQimH>
- [2] OMS. (2018) Lesiones causadas por el tránsito. Organización Mundial de la Salud. [Online]. Available: <https://goo.gl/q1Mbuf>
- [3] K. Schwab, “The global competitiveness report 2015–2016,” World Economic Forum, Tech. Rep., 2015. [Online]. Available: <https://goo.gl/FvJVkb>
- [4] ANT. (2017) Siniestros septiembre 2017. Agencia Nacional de Tránsito, Ecuador. [Online]. Available: <https://goo.gl/MZ1d75>
- [5] ——. (2015) Siniestros octubre 2015. Agencia Nacional de Tránsito, Ecuador. [Online]. Available: <https://goo.gl/Pc4JfM>
- [6] B. T. Nguyen, S. J. Ryong, and K. J. Kyu, “Fast traffic sign detection under challenging conditions,” in *2014 International Conference on Audio, Language and Image Processing*, July 2014, pp. 749–752. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICALIP.2014.7\protect \kern +.1667em\relax 009\protect \kern +.1667em\relax 895>.

- [7] H. Gomez-Moreno, S. Maldonado-Bascon, P. Gil-Jimenez, and S. Lafuente-Arroyo, "Goal evaluation of segmentation algorithms for traffic sign recognition," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 11, no. 4, pp. 917–930, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1109/TITS.2010.2054084>.
- [8] A. Shaout, D. Colella, and S. Awad, "Advanced driver assistance systems - past, present and future," in *Computer Engineering Conference (ICENCO), 2011 Seventh International*, Dec 2011, pp. 72–82. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICENCO.2011.6\protect \kern +.1667em\relax 153\protect \kern +.1667em\relax 935>.
- [9] A. Møgelmoose, D. Liu, and M. M. Trivedi, "Detection of u.s. traffic signs," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 16, no. 6, pp. 3116–3125, Dec 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2433019>.
- [10] S. E. Perez-Perez, S. E. Gonzalez-Reyna, S. E. Ledesma-Orozco, and J. G. Avina-Cervantes, "Principal component analysis for speed limit traffic sign recognition," in *2013 IEEE International Autumn Meeting on Power Electronics and Computing (ROPEC)*, Nov 2013, pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/ROPEC.2013.6\protect \kern +.1667em\relax 702\protect \kern +.1667em\relax 716>.
- [11] S. Salti, A. Petrelli, F. Tombari, N. Fioraio, and L. D. Stefano, "Traffic sign detection via interest region extraction," *Pattern Recognition*, vol. 48, no. 4, pp. 1039–1049, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2014.05.017>.
- [12] H. Li, F. Sun, L. Liu, and L. Wang, "A novel traffic sign detection method via color segmentation and robust shape matching," *Neurocomputing*, vol. 169, pp. 77–88, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2014.12.111>.
- [13] T. Hastie, R. Tibshirani, and J. Friedman, *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*, S. S. B. Media, Ed., 2009. [Online]. Available: <https://goo.gl/5kPw8C>
- [14] J. Lillo-Castellano, I. Mora-Jiménez, C. Figueroa-Pozuelo, and J. Rojo-Álvarez, "Traffic sign segmentation and classification using statistical learning methods," *Neurocomputing*, vol. 153, pp. 286–299, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2014.11.026>.
- [15] T. Chen and S. Lu, "Accurate and efficient traffic sign detection using discriminative adaboost and support vector regression," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 6, pp. 4006–4015, June 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2500275>.
- [16] Y. Han, K. Virupakshappa, and E. Oruklu, "Robust traffic sign recognition with feature extraction and k-nn classification methods," in *2015 IEEE International Conference on Electro/Information Technology (EIT)*, May 2015, pp. 484–488. DOI: <https://doi.org/10.1109/EIT.2015.7\protect \kern +.1667em\relax 293\protect \kern +.1667em\relax 386>.
- [17] G. Villalón-Sepúlveda, M. Torres-Torriti, and M. Flores-Calero, "Sistema de detección de señales de tráfico para la localización de intersecciones viales y frenado anticipado," *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, vol. 14, no. 2, pp. 152–162, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.riai.2016.09.010>.
- [18] C. Cortes and V. Vapnik, "Support-vector networks," *Machine Learning*, vol. 20, no. 3, pp. 273–297, Sep 1995. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00994018>.
- [19] R. O. Duda, P. E. Hart, and D. G. Stork, *Pattern Classification*, 2nd ed., J. W. Sons, Ed., 2012. [Online]. Available: <https://goo.gl/pvWsE9>
- [20] N. Cristianini and J. Shawe-Taylor, *An Introduction to Support Vector Machines and Other Kernel-based Learning Methods*. Cambridge University Press, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511801389>.
- [21] Z. Huang, Y. Yu, and J. Gu, "A novel method for traffic sign recognition based on extreme learning machine," in *Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation*, June 2014, pp. 1451–1456. DOI: <https://doi.org/10.1109/WCICA.2014.7\protect \kern +.1667em\relax 052\protect \kern +.1667em\relax 932>.
- [22] J. H. Shi and H. Y. Lin, "A vision system for traffic sign detection and recognition," in *2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, June 2017, pp. 1596–1601. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISIE.2017.8\protect \kern +.1667em\relax 001\protect \kern +.1667em\relax 485>.
- [23] N. Dalal, "Finding People in Images and Videos," Theses, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2006. [Online]. Available: <https://goo.gl/ZZCd7F>
- [24] H. Bay, A. Ess, T. Tuytelaars, and L. V. Gool, "Speeded-up robust features (SURF)," *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 110, no. 3,

- pp. 346–359, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cviu.2007.09.014>.
- [25] M. M. Lau, K. H. Lim, and A. A. Gopalai, “Malaysia traffic sign recognition with convolutional neural network,” in *2015 IEEE International Conference on Digital Signal Processing (DSP)*, July 2015, pp. 1006–1010. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICDSP.2015.7>
- [26] G. P. Martinsanz and J. M. de la Cruz García, *Visión por computador: imágenes digitales y aplicaciones*, R.-M. S. E. y Publicaciones, Ed., 2008. [Online]. Available: <https://goo.gl/YDjJG6>
- [27] Y. Zhu, C. Zhang, D. Zhou, X. Wang, X. Bai, and W. Liu, “Traffic sign detection and recognition using fully convolutional network guided proposals,” *Neurocomputing*, vol. 214, pp. 758–766, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2016.07.009>.
- [28] Z. Zuo, K. Yu, Q. Zhou, X. Wang, and T. Li, “Traffic signs detection based on faster r-cnn,” in *2017 IEEE 37th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCSW)*, June 2017, pp. 286–288. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICDCSW.2017.34>.
- [29] T. Calinski and J. Harabasz, “A dendrite method for cluster analysis,” *Communications in Statistics*, vol. 3, no. 1, pp. 1–27, 1974. DOI: <https://doi.org/10.1080/03610927408827101>.
- [30] D. L. Davies and D. W. Bouldin, “A cluster separation measure,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. PAMI-1, no. 2, pp. 224–227, April 1979. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPAMI.1979.4766909>.
- [31] T. Robert, W. Guenther, and H. Trevor, “Estimating the number of clusters in a data set via the gap statistic,” *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, vol. 63, no. 2, pp. 411–423. DOI: <https://doi.org/10.1111/1467--9868.00>
- [32] P. J. Rousseeuw, “Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis,” *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 20, pp. 53–65, 1987. DOI: [https://doi.org/10.1016/0377-0427\(87\)90125-7](https://doi.org/10.1016/0377-0427(87)90125-7).
- [33] T. Fawcett, “Roc graphs: Notes and practical considerations for researchers,” Tech. Rep., 2004. [Online]. Available: <https://goo.gl/Sr6tFj>
- [34] N. Dalal and B. Triggs, “Histograms of oriented gradients for human detection,” in *2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR’05)*, vol. 1, June 2005, pp. 886–893. DOI: <https://doi.org/10.1109/CVPR.2005.177>.
- [35] R. Kohavi, “A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection,” in *Proceedings of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence - Volume 2*, ser. IJCAI’95. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1995, pp. 1137–1143. [Online]. Available: <https://goo.gl/j5rXZX>
- [36] A. Martin, G. Doddington, T. Kamm, M. Ordowski, and M. Przybocki, “The det curve in assessment of detection task performance,” 1997, pp. 1895–1898. [Online]. Available: <https://goo.gl/nf6MZu>



# DISEÑO DE UNA RED NEURONAL PARA LA PREDICCIÓN DEL COEFICIENTE DE PÉRDIDAS PRIMARIAS EN RÉGIMEN DE FLUJO TURBULENTO

## DESIGN OF A NEURAL NETWORK FOR THE PREDICTION OF THE COEFFICIENT OF PRIMARY LOSSES IN TURBULENT FLOW REGIME

Jairo Castillo-Calderón<sup>1,\*</sup>, Byron Solórzano-Castillo<sup>1</sup>, José Moreno-Moreno<sup>2</sup>

### Resumen

La presente investigación está orientada al diseño de una red neuronal para la predicción del factor de fricción en régimen de flujo turbulento, siendo este indispensable para el cálculo de pérdidas primarias en conductos cerrados o tuberías. Se utiliza Neural Networks Toolbox de MATLAB® para diseñar la red neuronal artificial (RNA), con retropropagación, cuya base de datos comprende 724 puntos obtenidos del diagrama de Moody. Las variables de entrada de la RNA son el número de Reynolds y la rugosidad relativa de la tubería; la variable de salida es el coeficiente de fricción. Utilizando el algoritmo de entrenamiento de Levenberg-Marquardt se entrena la RNA con distintas topologías, variando el número de capas ocultas y el número de neuronas ocultas en cada capa. Con una estructura 2-30-30-1 de la RNA se obtuvo el mejor resultado, exhibiendo un error cuadrático medio (ECM) de  $1,75 \times 10^{-8}$  y un coeficiente de correlación de Pearson R de 0,99999 entre la salida de la red neuronal y la salida deseada. Además, mediante un análisis descriptivo de variable en el software SPSS®, se obtiene que el error relativo medio es de 0,162 %, indicando que el modelo diseñado es capaz de generalizar con alta precisión.

**Palabras clave:** diagrama de Moody, factor de fricción, pérdida de carga, red neuronal artificial, retropropagación, flujo turbulento.

### Abstract

This investigation is focused on the design of a neural network for the prediction of the friction factor in turbulent flow regime, this factor being indispensable for the calculation of primary losses in closed ducts or pipes. MATLAB® Neural Networks Toolbox is used to design the artificial neural network (ANN) with backpropagation. The database includes 724 points obtained from the Moody diagram. The Reynolds number and the relative roughness of the pipe are the input variables of the ANN, the output variable is the coefficient of friction. The Levenberg-Marquardt algorithm is used for training the ANN by using different topologies, varying the number of hidden layers and the number of neurons that are hidden in each layer. The best result was obtained with a 2-30-30-1 topology, exhibiting a mean squared error (MSE) of  $1.75 \times 10^{-8}$  and a Pearson correlation coefficient R of 0.99999 between the neural network output and the desired output. Furthermore, a descriptive analysis of the variable was performed in the SPSS® software, where the mean relative error obtained was 0.162 %, indicating that the designed model is able to generalize with high accuracy.

**Keywords:** Moody diagram, friction factor, head loss, artificial neural network, backpropagation, turbulent flow.

<sup>1,\*</sup>Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables, Carrera de Ingeniería Electromecánica Universidad Nacional de Loja, Ecuador. Autor para correspondencia ✉: [jairocastillo07@gmail.com](mailto:jairocastillo07@gmail.com).

<https://orcid.org/0000-0002-5321-4518>, <https://orcid.org/0000-0002-0071-2249>

<sup>2</sup>Carrera de Ingeniería Electromecánica, Universidad Nacional de Loja, Ecuador.

<https://orcid.org/0000-0002-0205-2635>

Recibido: 13-02-2018, aprobado tras revisión: 28-05-2018

Forma sugerida de citación: Castillo-Calderón, J.; Solórzano-Castillo, B. y Moreno-Moreno, J. (2018). «Diseño de una red neuronal para la predicción del coeficiente de pérdidas primarias en régimen de flujo turbulento». INGENIUS. N.º 20, (julio-diciembre). pp. 21-27. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n20.2018.02>.

## 1. Introducción

El método más utilizado para transportar fluidos de un lugar a otro es impulsarlo a través de un sistema de tuberías, siendo las de sección circular las más comunes para tal propósito, proporcionando mayor resistencia estructural y una mayor sección transversal para el mismo perímetro exterior que cualquier otra forma [1].

El flujo de un fluido en una tubería viene acompañado de una pérdida de carga que se contabiliza en términos de energía por unidad de peso del fluido que circula por ella [2].

Las pérdidas primarias o pérdidas de carga en un conducto rectilíneo de sección constante son debidas a la fricción del fluido contra sí mismo y contra las paredes de la tubería que lo contiene. Por otro lado, las pérdidas secundarias son pérdidas de carga ocasionadas por elementos que modifican la dirección y velocidad del fluido. Para ambos tipos de pérdida, parte de la energía del sistema se convierte en energía térmica (calor), que se disipa a través de las paredes de la tubería y de dispositivos tales como válvulas y acoplamientos [2,3].

La estimación de las pérdidas de carga debidas a la fricción en tuberías es una tarea importante en la solución de muchos problemas prácticos en las diferentes ramas de la ingeniería; el diseño hidráulico y el análisis de los sistemas de distribución de agua son dos ejemplos claros.

En el cálculo de las pérdidas de carga en tuberías desempeña un papel discriminante que el régimen de corriente sea laminar o turbulento [3]. El régimen de flujo depende principalmente de la razón de fuerzas inerciales a fuerzas viscosas en el fluido, conocida como número de Reynolds ( $N_R$ ) [4]. Así, si el  $N_R$  es menor a 2000 el flujo será laminar y si es mayor a 4000 será turbulento [2]. La mayoría de los flujos que se encuentran en la práctica son turbulentos [2-4], por tal razón la presente investigación se desarrolla en mencionado tipo de régimen de flujo.

La Ecuación 1 planteada por Darcy-Weisbach es válida para el cálculo de las pérdidas por fricción en régimen laminar y turbulento en tuberías circulares y no circulares [2-4].

$$h_L = f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

Donde:

$h_L$  : pérdida de energía debido a la fricción (N.m/N).

$f$  : factor de fricción.

$L$  : longitud de la corriente del flujo (m).

$D$  : diámetro de la tubería (m).

$v$  : velocidad promedio del flujo (m/s).

$g$  : aceleración gravitacional (m/s<sup>2</sup>).

La Ecuación 2, relación implícita conocida como ecuación de Colebrook, es utilizada universalmente para el cálculo del factor de fricción en flujo turbulento [3,4]. Nótese que la misma tiene un enfoque iterativo.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left( \frac{\varepsilon/D}{3.7} \right) + \frac{2.51}{N_R \sqrt{f}} \quad (2)$$

Donde:

$\varepsilon/D$  : rugosidad relativa. Representa la razón de la altura media de rugosidad de la tubería al diámetro de la tubería.

Una opción para el cálculo directo del factor de fricción en flujo turbulento es la Ecuación 3 desarrollada por K. Swamee y K. Jain [2].

$$f = \frac{0.25}{\left[ \log \left( \frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{5.74}{N_R^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (3)$$

Las ecuaciones (2) y (3), y otras tales como la de Nikuradse, Karman y Prandtl, Rouse, Haaland, son obtenidas experimentalmente y su uso puede resultar engorroso. Así, el diagrama de Moody es uno de los medios más empleados para determinar el factor de fricción en flujo turbulento [2-4]. Este muestra el factor de fricción como función del número de Reynolds y la rugosidad relativa. El uso del diagrama de Moody o de las ecuaciones antes mencionadas es un medio tradicional para determinar el valor del factor de fricción al resolver problemas con cálculos manuales. No obstante, esto puede resultar ineficiente. Para la automatización de los cálculos se requiere incorporar las ecuaciones en un programa u hoja de cálculo para obtener la solución.

El trabajo en cuestión presenta una propuesta alternativa para la predicción del factor de fricción empleando inteligencia artificial, concretamente una RNA que permite que el cálculo sea automático y fiable, reduciendo así tiempo y evitando errores que pueden ocasionarse al utilizar los medios citados previamente.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Diseño de la RNA

La red multicapa a desarrollar tiene conexiones hacia adelante (*feedforward*) y emplea el algoritmo de retro-propagación, que es una generalización del algoritmo de mínimos cuadrados. Este trabaja mediante aprendizaje supervisado y, por tanto, necesita un conjunto de instrucciones de entrenamiento que le describa la respuesta que debería generar la red a partir de una entrada determinada [5].

### 2.1.1. Base de datos de la RNA

Los parámetros de inicialización de la RNA se obtienen de un conjunto de 724 datos tabulados en Microsoft Excel. Estos datos fueron adquiridos utilizando el diagrama de Moody, es decir, mediante el método gráfico que contempla una secuencia de pasos basados en [2]. El conjunto de datos considera 43 valores del número de Reynolds, ( $4000 \leq N_R \leq 1 \times 10^8$ ), 20 curvas de rugosidad relativa, ( $1 \times 10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 0,05$ ), y los respectivos factores de fricción.

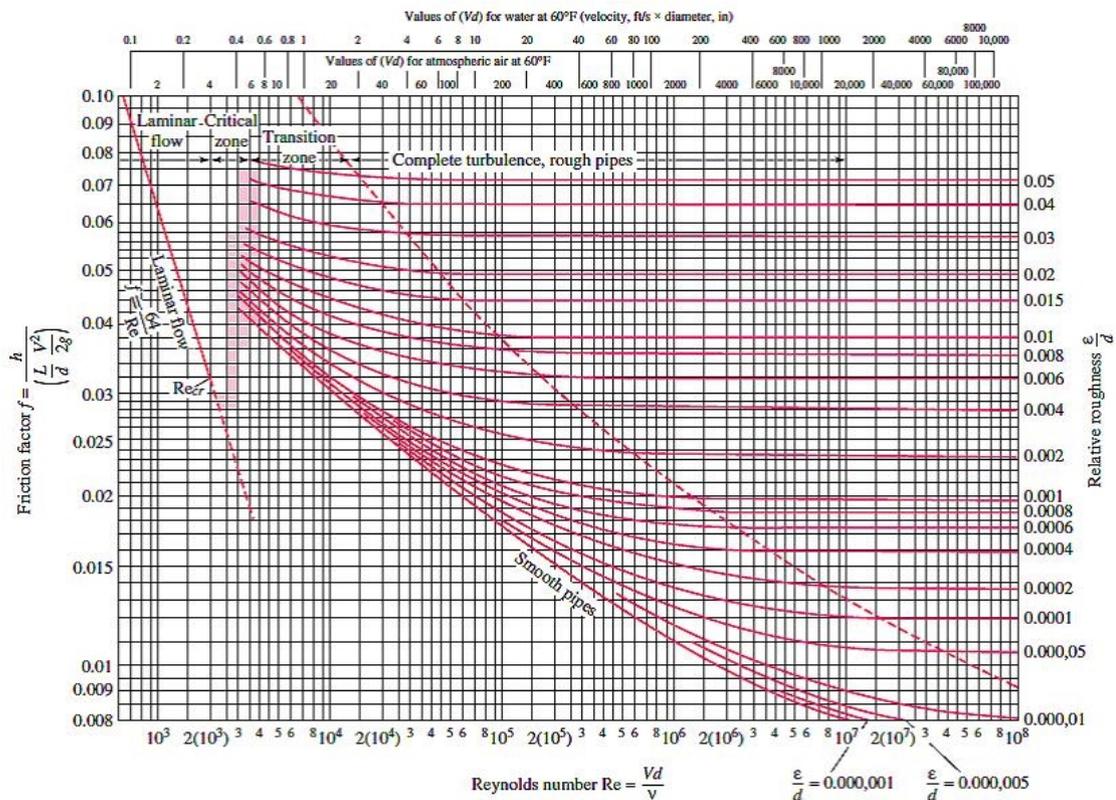
Los números de Reynolds utilizados, expuestos en la Tabla 1, se corresponden con los marcados en la escala de las abscisas de la Figura 1, esto con la finalidad de lograr un cálculo exacto en el diagrama de Moody.

El número de Reynolds y la rugosidad relativa son las variables de entrada de la RNA y el factor de fricción es la variable de salida o variable a predecir. Con el propósito de establecer una adecuada base de datos se considera únicamente los factores de fricción que son consecuencia de una intersección evidente de

cualquiera de los 43 números de Reynolds en cada una de las curvas de rugosidad relativa.

**Tabla 1.** Números de Reynolds utilizados

N.º	Valor $N_R$	N.º	Valor $N_R$	N.º	Valor $N_R$
1	4000	16	100000	31	7000000
2	5000	17	200000	32	8000000
3	6000	18	300000	33	9000000
4	7000	19	400000	34	10000000
5	8000	20	500000	35	20000000
6	9000	21	600000	36	30000000
7	10000	22	700000	37	40000000
8	20000	23	800000	38	50000000
9	30000	24	900000	39	60000000
10	40000	25	1000000	40	70000000
11	50000	26	2000000	41	80000000
12	60000	27	3000000	42	90000000
13	70000	28	4000000	43	100000000
14	80000	29	5000000		
15	90000	30	6000000		



**Figura 1.** Diagrama de Moody para el coeficiente de fricción en conductos de paredes lisas y rugosas [6].

### 2.2. Topología de la RNA

No se pueden dar reglas concretas para determinar el número de capas ocultas y el número de neuronas ocultas que debe tener una red para resolver un problema específico; el tamaño de las capas, tanto de

entrada como de salida, suele estar determinado por la naturaleza de la aplicación [7, 8]. Así, la problemática de la presente investigación sugiere que el número de Reynolds y la rugosidad relativa sean las dos entradas aplicadas en la primera capa y el factor de fricción,

que es la salida, sea considera en la última capa de la red.

El número de neuronas ocultas interviene en la eficiencia de aprendizaje y de generalización de la red; además, en general una sola capa oculta suele ser suficiente para la convergencia de la solución, sin embargo, existen ocasiones en que un problema es más sencillo de resolver con más de una capa oculta [7, 8].

Por lo tanto, el número óptimo de capas y neuronas ocultas se determina a través de la experimentación.

Precisamente, se selecciona la topología más adecuada de la RNA ensayando diferentes configuraciones al variar el número de capas ocultas de una a tres y el número de neuronas dentro de cada capa oculta de 5 a 40 con incrementos de 5.

### 2.2.1. Entrenamiento de la RNA

El aprendizaje supervisado de una RNA implica la existencia de un entrenamiento controlado por un agente externo para que las entradas produzcan las salidas deseadas mediante el fortalecimiento de las conexiones. Una manera de llevar esto a cabo es a partir de la instauración de pesos sinápticos conocidos con anterioridad [5]. Por tal razón, el conjunto de pares entradas-salidas se aplica a la RNA, es decir, ejemplos de entradas y sus salidas correspondientes [5], [8], [9].

La red es entrenada con el algoritmo de retropropagación de Levenberg-Marquardt, pues es estable, fiable y facilita el entrenamiento de conjuntos de datos normalizados [10–12]. El entrenamiento es un proceso iterativo y el *software*, por defecto, divide el conjunto de 724 datos en 3 grupos: el 70 % comprende datos de entrenamiento, el 15 % datos de prueba y el 15 % restante los datos de validación. En cada iteración, al usar nuevos datos del conjunto de entrenamiento, el algoritmo de retropropagación permite que la salida generada de la red se compare con la salida deseada y se obtenga un error para cada una de las salidas. Al propagarse el error hacia atrás, desde la capa de salida hasta la capa de entrada, los pesos sinápticos de cada neurona se modifican para cada ejemplo, con el objeto de que la red converja hacia un estado que permita clasificar exitosamente todos los patrones de entrenamiento [9]. Esto conlleva a decir que el aprendizaje de la RNA se efectúa por corrección de error. A medida que se entrena la red, esta aprende a identificar distintas características del conjunto de entradas, de tal forma que cuando se le presente, luego del entrenamiento, un patrón arbitrario posea la capacidad de generalización, entendida como la facilidad de dar salidas satisfactorias a entradas no presentadas en la fase de entrenamiento [13].

Debido a la naturaleza de los datos de entrada y salida de la red multicapa, las funciones de activación o transferencia deben ser continuas, pudiendo, incluso, ser distintas para cada capa, siempre y cuando sean

diferenciables [9–13]. Así, se aplica la función de activación *tansig* en las capas ocultas y la función de activación *purelin* en la capa de salida. Estas funciones son comúnmente usadas al trabajar con el algoritmo de retropropagación.

El aprendizaje de la RNA se detiene cuando el índice de error resulta aceptablemente pequeño para cada uno de los patrones aprendidos o cuando el número máximo de iteraciones del proceso ha sido alcanzado [10], [14], [15]. La función de rendimiento utilizada para entrenar la RNA es el error cuadrático medio (MSE), denotado por la Ecuación 4 [10–12]. El error relativo, reflejado aritméticamente por la Ecuación 5, es involucrado en el análisis [10–16].

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_{Moody_i} - f_{RNA_i})^2 \quad (4)$$

$$E_{relativo} = \left( \frac{f_{Moody_i} - f_{RNA}}{f_{Moody}} \right) \times 100 \quad (5)$$

Resumiendo lo expuesto, la Tabla 2 contiene las características de diseño de la RNA aplicadas a las distintas topologías ensayadas.

**Tabla 2.** Características de diseño de la RNA

Característica	Descripción
Base de datos	724
Tipo de red	Retropropagación
Variables de entrada	N.º Reynolds; rug. relativa
Variable de salida	Coefficiente de fricción
Algoritmo de entrenamiento	Levenberg-Marquardt
Función de activación (capas ocultas)	<i>tansig</i>
Función de activación (capa de salida)	<i>purelin</i>
Función de rendimiento	MSE (predeterminado)
Iteraciones	1000 (predeterminado)

## 3. Resultados y discusión

### 3.1. Selección de arquitectura de la RNA

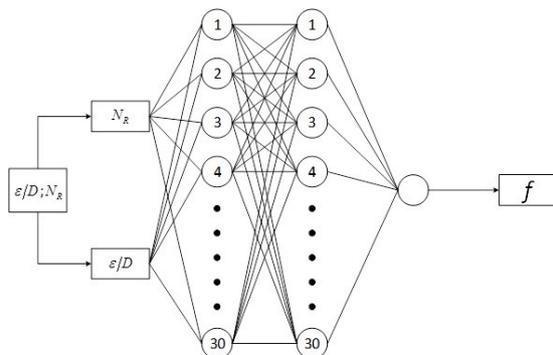
De acuerdo con la metodología planteada se entrenan un total de 24 arquitecturas, cuyos resultados se exhiben en la Tabla 3. Se observa que las topologías 2-30-30-1 y 2-25-25-25-1 presentan mejores resultados, pues poseen un error relativo medio de 0,1620 % y 0,2282 %, respectivamente, y un coeficiente de correlación de Pearson de 0,99999 para ambos casos. Sin embargo, se selecciona la primera de ellas debido a que manifiesta un menor error relativo medio de los

valores pronosticados respecto a los deseados y demanda menor gasto computacional. Un esquema de la estructura de la RNA seleccionada se exhibe en la Figura 2. En ella se muestra las dos entradas externas, número de Reynolds y rugosidad relativa, aplicadas a la primera capa, las 2 capas ocultas con 30 neuronas cada una y en la última capa una neurona, cuya salida es el factor de fricción. Las entradas se limitan únicamente al flujo de información mientras que en las capas ocultas y de salida se realiza el procesamiento [5].

**Tabla 3.** Resultados de las diferentes arquitecturas ensayadas

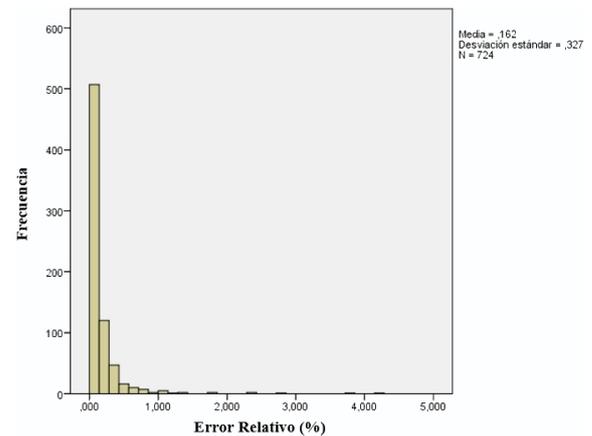
N.º de capas ocultas	N.º de neuronas en cada capa	Error relativo medio (%)	Coefficiente de correlación de Pearson R
1	5	0,7422	0,99985
1	10	0,5995	0,99993
1	15	0,4743	0,99994
1	20	0,4707	0,99995
1	25	0,6497	0,99991
1	30	0,447	0,99996
1	35	0,464	0,99994
1	40	0,4227	0,99995
2	5	0,5362	0,99992
2	10	0,4737	0,99996
2	15	0,3641	0,99996
2	20	0,3587	0,99997
2	25	0,2617	0,99998
2	30	0,162	0,99999
2	35	0,3248	0,99996
2	40	0,4675	0,99984
3	5	0,4722	0,99995
3	10	0,4588	0,99995
3	15	0,2591	0,99998
3	20	0,3169	0,99997
3	25	0,2282	0,99999
3	30	0,2936	0,99997
3	35	0,3581	0,9999
3	40	0,3858	0,99994

Mediante el *software* IBM SPSS Statistics 22® se realiza un análisis descriptivo de la variable error relativo para los 724 datos de la arquitectura seleccionada. El histograma de la Figura 3 representa las distribuciones de frecuencias. Se obtiene que la media es 0,1620 %, el error relativo mínimo es de 0 % y el máximo es de 4,2590 %.



**Figura 2.** Estructura de la RNA diseñada.

Además, la desviación estándar es de 0,327, indicando que la dispersión de los datos respecto a la media es pequeña. La distribución de datos manifiesta que existe un predominio considerable de error relativo menor al 1 % en el 97 % del total de datos analizados. Sustentando lo reflejado en el histograma, en la Tabla 4 se sintetizan los valores de los tres cuartiles obtenidos del análisis estadístico. Por debajo del  $Q_1$  existen errores relativos entre la salida deseada y la salida de la red menores al 0,0313 %. El  $Q_2$ , que es el valor de la mediana, señala que la mitad de los errores relativos están por debajo de 0,0720 %. El  $Q_3$  afirma que las tres cuartas partes de los datos tienen un error relativo menor al 0,1758 %. A partir del  $Q_3$  se obtienen errores relativos bajos, sin embargo, existen valores rezagados que son mayores al 1 %, pero estos representan solo el 3 % del total de datos analizados. Lo expuesto demuestra la calidad de aproximación de los valores pronosticados de la RNA respecto a los del diagrama de Moody.



**Figura 3.** Histograma del error relativo.

**Tabla 4.** Medidas de posición no central del error relativo

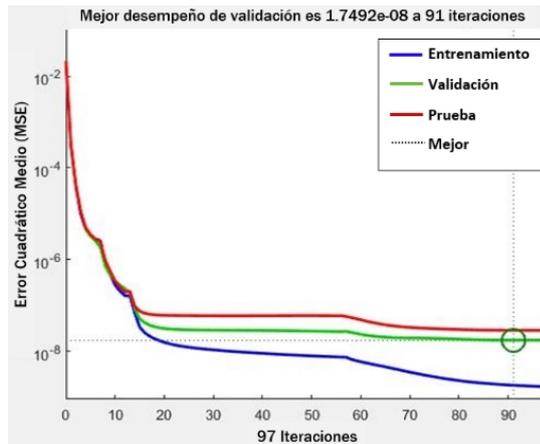
Parámetro estadístico	Valor del error relativo
Primer cuartil ( $Q_1$ )	0,03 %
Segundo cuartil ( $Q_2$ )	0,07 %
Tercer cuartil ( $Q_3$ )	0,18 %

### 3.2. Rendimiento del modelo

El rendimiento de los conjuntos de datos de entrenamiento, pruebas y validación en comparación con la salida deseada es mostrado en la Figura 4. La muestra destinada a la validación es usada para medir el grado de generalización de la red, deteniendo el entrenamiento cuando este ya no mejora, esto evita el sobreajuste (*overfitting*) [12], entendido como un pobre rendimiento del modelo para predecir nuevos valores. Se constata que el proceso de entrenamiento de la

RNA con topología 2-30-30-1 es truncado en 91 iteraciones, pues es cuando se obtiene el menor valor MSE de validación que es de  $1,7492 \times 10^{-8}$ .

Es decir, se ha minimizado la función de rendimiento al máximo y ya no tendrá tendencia a disminuir pasadas las 91 iteraciones. Debido a que el valor MSE es muy pequeño, lo más cercano a cero, el modelo de RNA es capaz de generalizar con gran precisión.

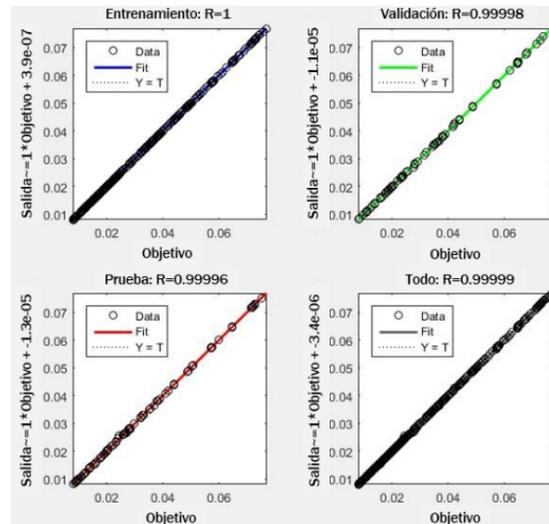


**Figura 4.** Rendimiento del proceso entrenamiento de la RNA.

En la Figura 5 se exhiben los resultados del coeficiente de correlación de Pearson R para la estructura de RNA diseñada. La línea indica los valores esperados y los círculos negros representan los valores pronosticados. La predicción es eficiente y se constata un buen desempeño de la red, pues se obtiene un índice global de 0,99999 que indica una relación lineal fuerte y positiva entre los factores de fricción del diagrama de Moody y los otorgados por la RNA.

Se realizan varias pruebas con combinaciones de pares de entrada que no han sido utilizados durante el entrenamiento con el objeto de verificar el correcto desempeño del modelo. Así, en la Tabla 5 se detallan las 36 combinaciones de datos de entrada aplicados a la RNA y el error relativo alcanzado por cada una de ellas.

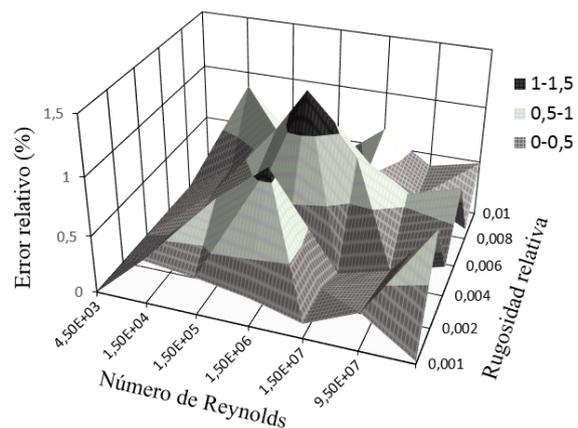
De acuerdo con la Tabla 5 y la Figura 6, el error relativo no se distribuye por igual en el rango de los valores de entrada. En el gráfico de superficie 3D generado se observa el predominio de un error relativo menor al 0,5 %, correspondiente a 24 de las 36 combinaciones de pares de entrada aplicadas a la RNA. Además, únicamente existen 2 errores relativos por encima del 1 %, concernientes a los 2 picos más prominentes de la superficie, siendo el máximo de 1,325 % para  $N_R = 1,5E5$  y  $\varepsilon/D = 0,006$ . Los resultados derivados de estas 36 pruebas corroboran el correcto funcionamiento de la red y su capacidad de generalización al presentarle entradas distintas a las utilizadas en la fase de entrenamiento.



**Figura 5.** Correlación entre los valores esperados y pronosticados.

**Tabla 5.** Resultados del error relativo para datos no considerados en el entrenamiento

$N_R$	$\varepsilon/D$					
	0,01	0,008	0,006	0,004	0,002	0,001
$4,5 \times 10^3$	0,869	0,282	0,252	0,16	0,344	0,382
$1,5 \times 10^4$	0,452	0,72	0,535	0,178	0,757	0,329
$1,5 \times 10^5$	0,325	0,005	1,325	0,27	1,095	0,25
$1,5 \times 10^6$	0,665	0,541	0,818	0,01	0,147	0,131
$1,5 \times 10^7$	0,387	0,32	0,575	0,134	0,237	0,333
$9,5 \times 10^7$	0,487	0,092	0,712	0,267	0,847	0,02



**Figura 6.** Distribución del error relativo.

## 4. Conclusiones

La RNA diseñada en esta investigación representa una alternativa fiable y de gran precisión para predecir el coeficiente de pérdidas primarias en régimen de flujo turbulento, dando un error relativo medio de 0,1620 % y un coeficiente de correlación de Pearson R

de 0,99999 entre los valores del diagrama de Moody y los pronosticados.

El proceso de entrenamiento se detuvo en 91 iteraciones, alcanzando un MSE de 1,7492E-8 que indica la capacidad de generalización de la RNA propuesta.

Los resultados obtenidos demuestran que el conjunto de 724 datos fue suficientemente grande para permitir que la RNA, durante el entrenamiento, sea capaz de aprender la relación entre las entradas y salidas aplicadas.

El modelo desarrollado permite resolver problemas de flujo que involucran cálculos del factor de fricción de una manera automática, aprovechando la rapidez computacional que ofrecen las redes neuronales, reduciendo así tiempo y evitando errores que pueden ocasionarse al utilizar los medios tradicionales para tal efecto.

## Referencias

- [1] J. R. Calderón Córdova and C. X. Pozo Calva, "Diseño y construcción de un banco de pruebas para pérdidas de carga en tuberías y accesorios con simulación," Tesis de Grado. Universidad Politécnica Salesiana. Ecuador, 2011. [Online]. Available: <https://goo.gl/MiF65x>
- [2] R. L. Mott, *Mecánica de Fluidos*, 2006, ch. Ecuación general de la energía; número de Reynolds, flujo laminar, flujo turbulento y pérdidas de energía debido a la fricción, pp. 197–243. [Online]. Available: <https://goo.gl/SkTHPd>
- [3] C. Mataiz, *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*, 1986, ch. Resistencia de superficie: pérdidas primarias en conductos cerrados o tuberías, pp. 203–226. [Online]. Available: <https://goo.gl/mW1mkL>
- [4] Y. A. Cengel and J. M. Cimbala, *Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones*, 2006, ch. Flujo en tuberías, pp. 223–342. [Online]. Available: <https://goo.gl/DMttmi>
- [5] P. Ponce Cruz, *Inteligencia Artificial con Aplicaciones a la Ingeniería*, 2011, ch. Inteligencia Artificial, pp. 1–32. [Online]. Available: <https://goo.gl/XED1Vo>
- [6] F. M. White, *Mecánica de Fluidos*, 5<sup>th</sup> ed., 2003, ch. Flujo viscoso en conductos, pp. 335–435. [Online]. Available: <https://goo.gl/vULEcg>
- [7] A. Campos Ortiz, "Proceso de distribución aplicando redes neuronales artificiales con supervisión," Master's thesis, Universidad Autónoma de Nuevo León, México, 1998. [Online]. Available: <https://goo.gl/io73HZ>
- [8] J. R. Coutiño Ozuna, "Aplicación de redes neuronales en la discriminación entre fallas y oscilaciones de potencia," Master's thesis, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2002. [Online]. Available: <https://goo.gl/yKvEFs>
- [9] N. Peláez Chávez, "Aprendizaje no supervisado y el algoritmo wake-sleep en redes neuronales," Tesis de grado. Universidad Tecnológica de la Mixteca, 2012. [Online]. Available: <https://goo.gl/oeygXA>
- [10] U. Offor and S. Alabi, "Artificial neural network model for friction factor prediction," *Journal of Mechanical Science and Chemical Engineering*, vol. 4, pp. 77–83, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/msce.2016.47011>.
- [11] M. R. G. Meireles, P. E. M. Almeida, and M. G. Simoes, "A comprehensive review for industrial applicability of artificial neural networks," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 50, no. 3, pp. 585–601, June 2003. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2003.812470>.
- [12] D. Brkić and Ćojbašić, "Intelligent flow friction estimation," *Computational Intelligence and Neuroscience*, vol. 2016, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1155/2016/5242596>.
- [13] J. Hilera and V. Martínez, *Redes neuronales artificiales: fundamentos, modelos y aplicaciones*, 1994, ch. Redes neuronales con conexiones hacia adelante, pp. 101–180. [Online]. Available: <https://goo.gl/rovX8y>
- [14] T. Manning, R. D. Sleator, and P. Walsh, "Biologically inspired intelligent decision making," *Bioengineered*, vol. 5, no. 2, pp. 80–95, 2014. DOI: <https://doi.org/10.4161/bioe.26997>, PMID: 24335433. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4161/bioe.26997>
- [15] R. Yousefian and S. Kamalasadán, "A review of neural network based machine learning approaches for rotor angle stability control," *CoRR*, vol. abs/1701.01214, 2017. [Online]. Available: <https://goo.gl/4RYRWs>
- [16] O. E. Turgut, M. Asker, and M. T. Çoban, "A review of non iterative friction factor correlations for the calculation of pressure drop in pipes," *Bitlis Eren University Journal of Science and Technology*, vol. 4, no. 1, pp. 1–8, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.17678/beujst.90203>.



# CONSUMO SUSTENTABLE DE AGUA EN VIVIENDAS DE LA CIUDAD DE CUENCA

## SUSTAINABLE WATER CONSUMPTION OF DWELLINGS IN THE CUENCA CITY

Eduardo Molina<sup>1</sup>, Felipe Quesada<sup>1</sup>, Andrea Calle<sup>1</sup>, Jéssica Ortiz<sup>1,\*</sup>, Diana Orellana<sup>1</sup>

### Resumen

El presente estudio propone y sustenta la aplicación de cuatro criterios para la gestión sustentable de agua potable al interior de la vivienda en la ciudad de Cuenca, Ecuador. Los criterios determinados son el control del consumo de agua, el control de fugas, el uso de dispositivos ahorradores y los sistemas de reutilización de agua. Se definen tres niveles de valoración para cada criterio: estándar, mejores prácticas y superiores prácticas. Para el desarrollo de la investigación se aplican encuestas a la población que permiten sondear la existencia y la predisposición de incorporar prácticas de ahorro de agua potable en las viviendas; además, se realizan mediciones del consumo de agua por usos en diez viviendas durante una semana; conjuntamente se procesa la información oficial del consumo de agua del cantón Cuenca facilitado por la empresa municipal de la ciudad y se analizan varias normas: ISO, INEC y la Norma Técnica Ecuatoriana de la Construcción, entre otras. Finalmente, se concluye con la determinación de un porcentaje de ahorro de agua de hasta el 30 %, que se puede obtener con la aplicación de prácticas sustentables.

**Palabras clave:** consumo de agua, estrategias de ahorro de agua, reutilización de agua, sustentabilidad del agua.

### Abstract

This study proposes and supports the application of 4 criteria for the sustainable management of drinking water in households in the city of Cuenca, Ecuador. The established criteria are: the control of water consumption, the control of leaks, the use of saving devices and water reuse systems. Three levels of assessment are defined for each criterion: standard, best practices and superior practices. For the development of the research, surveys are applied to the population, in order to gauge the existence of and predisposition to incorporate drinking water saving practices in the homes. In addition, measurements of water consumption by uses are made in 10 homes for a week. Official information on the water consumption of the canton Cuenca facilitated by the municipal company of the city is processed, and several standards are analyzed: ISO, INEC and the Ecuadorian Technical Construction Standard, among others. Finally, the conclusion presents a percentage of water savings of up to 30%, which can be obtained through the application of sustainable practices.

**Keywords:** Water consumption, water saving strategies, water recycling, water sustainability.

<sup>1,\*</sup>Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Cuenca, Ecuador.

Autor para correspondencia ✉: [jessicam.ortizf@ucuenca.edu.ec](mailto:jessicam.ortizf@ucuenca.edu.ec) , <http://orcid.org/0000-0002-7298-1827>

<http://orcid.org/0000-0002-6931-0192> , <http://orcid.org/0000-0003-0762-3772>

<http://orcid.org/0000-0002-6167-6720> , <http://orcid.org/0000-0002-4684-6613>

Recibido: 03-05-2018, aprobado tras revisión: 12-06-2018

Forma sugerida de citación: Molina, E.; Quesada, F.; Calle, A.; Ortiz, J. y Orellana, D. (2018). «Consumo sustentable de agua en viviendas de la ciudad de Cuenca». *INGENIUS*. N.º 20, (julio-diciembre). pp. 28-38. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n20.2018.03>.

## 1. Introducción

El 70 % del planeta Tierra está cubierto por agua, cuyo 98 % es agua salada y la tecnología actual para potabilizarla todavía es muy restringida debido a sus altos costos. Cerca del 2 % del agua dulce se localiza en los casquetes polares o en los acuíferos, por lo cual, solo queda disponible el 0,014 % en los lagos y ríos de la superficie terrestre [1].

En el mundo, la cobertura de agua potable sigue siendo un problema, tanto en las ciudades como en el entorno rural. A mediados del presente siglo, 7000 millones de personas en 60 países sufrirán escasez de agua, en el peor de los casos, y en el mejor se tratará de 2000 millones de personas en 48 países. Las estimaciones recientes sugieren que el cambio climático será responsable de alrededor del 20 % del incremento de la escasez global de agua [2]. Una de las alternativas impulsada en los años recientes es el enfoque del derecho humano al agua, así en la resolución a/res/64/292 de la Asamblea General de la ONU, se declara explícitamente «el derecho al agua potable y el saneamiento como un derecho humano esencial para el pleno disfrute de la vida y de todos los derechos humanos» [3, 4].

Por lo tanto, las poblaciones se verán favorecidas en la medida en que se minimice el uso del agua y exista un compromiso por parte de la ciudadanía de mantener el líquido que hoy poseen para satisfacer sus necesidades básicas y garantizar su oferta a poblaciones futuras [1]. De esta manera, el consumo sustentable del agua se define como «el uso de agua que permite sostener a una sociedad para que perdure y se desarrolle en un futuro indefinido sin alterar la integridad del ciclo hidrológico y de los ecosistemas que dependan de él» [5, 6].

En el ámbito internacional se encuentran varios métodos de certificación para la vivienda sustentable que incorporan indicadores para el ahorro de agua potable, entre los métodos más reconocidos están: VERDE NE Residencial Oficinas [7], LEED® for Homes Rating System [8] y Manual BREEAM ES VIVIENDA [9].

Estos métodos contemplan varias estrategias como la detección de fugas mediante el registro histórico, lo cual permite llevar un balance entre el agua suministrada y el agua consumida [10–12]; la instalación de dispositivos ahorradores, que permite disminuir hasta el 30 % del consumo [1, 13]; el aprovechamiento del agua lluvia, que puede almacenarse para ciertos usos de la vivienda [14, 15]; la utilización de técnicas de reciclaje de agua, que consiste en la reutilización de las aguas residuales domésticas, permitiendo por ejemplo, volver a cargar los inodoros con aguas grises [16, 17]; y la implementación de medidores de chorro único chorro múltiple, con el fin de controlar el consumo permitiendo alcanzar un ahorro de hasta el 20 % [18, 19].

### 1.1. Agua potable en la ciudad de Cuenca

Según la Organización Mundial de la Salud, el acceso óptimo al agua con el fin de atender todas las necesidades básicas de consumo e higiene, para no tener efectos en la salud, debería ser superior a 100 l/habitante/día [20], mientras que la Norma Ecuatoriana de la Construcción 2011 establece que la dotación para una vivienda debe ser entre 200 a 350 l/habitante/día, reflejando un rango muy amplio, lo cual impide la existencia de un control de consumo [21].

Esta falta de control genera que los niveles de consumo se incrementen con el paso del tiempo, tal es el caso de Cuenca, que para garantizar la continuidad de servicio de agua, cuenta con una captación de 120 000 m<sup>3</sup> [22] para una población de 524 563 habitantes [23]. Tomando en cuenta que la proyección de población para el año 2050 llegará a 901 499 habitantes [24], será necesario captar 4610 l/s de agua, si se mantiene el consumo y demanda de agua potable actual, lo que equivale a un aumento del 71,85 % de la captación.

Obtener este porcentaje de nueva demanda pone en riesgo los recursos hídricos considerando, además, que en la actualidad ya se explotan tres de los cuatro ríos de la ciudad. En términos monetarios el requerimiento de obras de infraestructura para el 2050 implica una inversión de 6865 millones de dólares [24].

Esto ocasionaría que la dotación de agua potable en la ciudad de Cuenca, incremente y se compare al de otras localidades latinoamericanas, como Buenos Aires-Argentina donde existe una dotación de 356 l/habitante/día, San Pablo-Brasil de 227 l/habitante/día, y Santiago de Chile 203 l/habitante/día [25].

Por lo tanto, es necesario un manejo sustentable del agua en las viviendas de Cuenca con el fin de disminuir estos porcentajes.

Con estos antecedentes, el presente estudio plantea la posibilidad de reducción del consumo de agua potable en viviendas de esta ciudad, sin afectar la calidad ni estilo de vida de sus habitantes, mediante la aplicación de criterios sustentables como incorporar agua lluvia para ciertos usos domésticos, emplear aparatos sanitarios ahorradores y técnicas de reciclaje de agua.

## 2. Materiales y métodos

La metodología de la presente investigación es de tipo no experimental y cuantitativa, comprende dos etapas:

### 2.1. Determinación de criterios de evaluación para disminuir el consumo de agua potable

Para la determinación de criterios se realiza una comparación de cuatro métodos de evaluación interna-

cionales, donde se estudia la temática referente a la gestión sustentable del agua potable dentro de la vivienda, con el fin de encontrar convergencias entre los mismos y establecer los criterios que se considerarán. Los métodos analizados son GEA VERDE NE [7], LEED® for Homes Rating System [8], CASBEE FOR NEW CONSTRUCTION [26] y MANUAL BREEAM ES VIVIENDA [9].

Para determinar si los criterios de evaluación son factibles de aplicar en la realidad local de Cuenca se establecen los siguientes juicios de selección [27]:

1. El criterio de evaluación es compatible con las características que poseen las viviendas y/o la ciudad.
2. El criterio de evaluación contribuye a superar los problemas existentes en las viviendas y/o la ciudad.
3. El método para evaluar fue factible de aplicar.
4. Los niveles de exigencia están en línea con las condiciones locales.
5. El tipo de evaluación que se realiza se basa en desempeños.
6. El criterio de evaluación contribuye a mejorar el confort de las viviendas y/o las condiciones de la ciudad.

## 2.2. Determinación de niveles de valoración

Uno de los mayores retos de la investigación es determinar los valores mínimos o estándares a cumplir en cada criterio evaluado, que responda a la realidad local. El proceso utilizado en esta etapa comprende los siguientes tres apartados:

### 2.2.1. Encuestas a 280 viviendas de la ciudad de Cuenca

Se aplica una encuesta que permita sondear la existencia de prácticas de ahorro de agua potable y la predisposición de la población para incorporar estrategias sustentables. Para la encuesta se toma una muestra de 280 viviendas repartidas en el área urbana de Cuenca.

El diseño específico de muestreo estadístico es de tipo probabilístico, polimetálico y aleatorio. El número de sectores seleccionados se realizó en función del número de viviendas que existen en cada parroquia y de la distribución por nivel socioeconómico (A; B; C+; C-; D). Para determinar el estrato socioeconómico se utilizó la encuesta del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC). La muestra tiene un nivel de confianza de 95 % y un error absoluto de 0,06.

Para estimar el tamaño de la muestra se utilizó la fórmula:

$$np' = \frac{K^2 \times N \times PQ}{K^2 \times PQ + NE^2}$$

Donde:

- np' = tamaño de muestra para estimar
- K = coeficiente de confianza
- N = tamaño del universo
- PQ = varianza de la proporción
- E = error máximo admisible

La encuesta considera lo siguiente:

- ¿Utiliza algún equipo, dispositivo o sistema para ahorrar el agua?
- Para usted, ¿cuál es la importancia que tiene una vivienda que ahorre energía y agua; que en su proceso de construcción consuma menos recursos, o cause un mínimo impacto sobre el medioambiente?
- ¿Estaría usted dispuesto a invertir en una vivienda con las características de la pregunta anterior?

### 2.2.2. Medición del consumo de agua en 10 viviendas

Con el fin de determinar el consumo de agua en los distintos usos, se realiza un análisis específico en diez viviendas. Los criterios de selección de estas viviendas fueron la dispersión geográfica y la variedad en la tipología de la edificación, además, se considera la limitación del número de equipos de medición, pero principalmente la predisposición de los propietarios a colaborar con la investigación.

Para la medición se utilizan contadores de agua, modelo S120, de tipo velocimétrico, los cuales consisten en un medidor inferencial de chorro único, transmisión magnética, lectura directa y relojería súper seca, cumple con las exigencias metrológicas de las clases A y B de la Resolución 246; 2000 del INMETRO, de las normas MERCOSUR NM 212 e ISO 4064 [28–30].

Estos medidores fueron instalados en las diversas salidas de agua (usos): grifos en lavabos, cocinas y lavanderías, duchas, calefones y sanitarios. Se registra el consumo diario durante una semana completa para obtener datos del comportamiento de una familia en días laborables y no laborables.

Finalmente, se aplica una encuesta, la misma que se basa en la desarrollada por el Instituto Ecuatoriano de Obras Sanitarias [31] y forma parte del código ecuatoriano de la construcción [32], además, ha sido aplicada en investigaciones similares [17], [33]. Las preguntas son:

- ¿Cuántas veces utiliza el sanitario al día un miembro de su familia que habita en la vivienda?

- ¿Estaría dispuesto a utilizar el agua de lluvia en su vivienda para usos en sanitarios, riego y limpieza?
- ¿Cuánto dinero estaría dispuesto a invertir mensualmente en equipos que permitan un ahorro y uso sustentable del agua?

### 2.2.3. Datos de consumo de agua potable en Cuenca

Se solicita a la Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca (ETAPA EP) las planillas de consumos de agua potable mensuales de todas las acometidas residenciales a las que brinda el servicio, con el fin de calcular la media aritmética de consumo de agua por instalación residencial existente.

Con estos resultados y con los datos de censos de población y vivienda del INEC [34], se obtiene la media aritmética de consumo de agua potable por habitante en l/habitante/día.

Además, se solicitaron los consumos de agua mensuales de las acometidas residenciales de los diez casos de estudio durante un año, con el fin de valorar las medidas obtenidas en las lecturas y determinar variaciones máximas y mínimas.

Con base en los datos que se obtienen de los puntos anteriores, se definen los estándares y estrategias para el consumo sustentable de agua en las viviendas de la ciudad de Cuenca, permitiendo determinar los porcentajes de ahorro que pueden conseguirse en consumo y costos.

## 3. Resultados y discusión

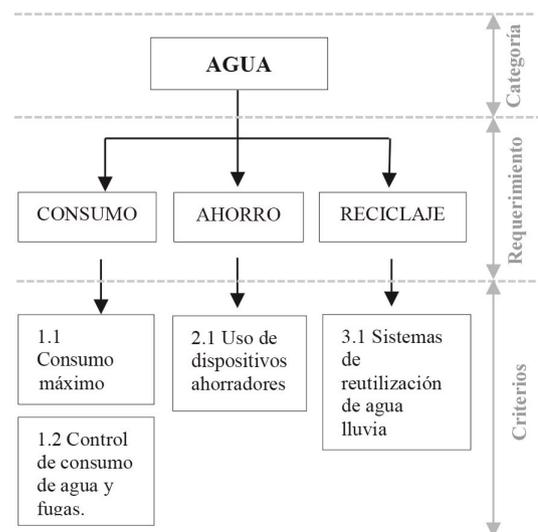
### 3.1. Determinación de criterios de evaluación para disminuir el consumo de agua potable

En la Tabla 1 se presentan los resultados de la valoración de los 6 juicios sobre los 17 criterios de evaluación determinados en los métodos internacionales, se observan que no todos los criterios de evaluación fueron compatibles con la realidad local, ya que en algunos casos se cumple con menos de 4 juicios de selección.

En la Figura 1 se aprecian los cuatro criterios seleccionados: consumo máximo, control de consumo de agua y fugas, uso de dispositivos ahorradores y sistemas de reutilización de agua lluvia, los cuales cumplen con todos los juicios de selección. A estos se los agrupa por requerimientos de acuerdo con el consumo, ahorro y reciclaje.

**Tabla 1.** Juicios para la selección de los criterios de evaluación

Criterios de evaluación	Juicios de selección					
	1	2	3	4	5	6
<b>1. Consumo</b>						
<b>BREEAM</b>						
Contadores de agua	x	x	x	x		x
<b>LEED</b>						
Consumo de agua al interior de la vivienda	x	x	x			x
<b>VERDE</b>						
Consumo de agua en aparatos sanitarios	x	x	x	x	x	x
<b>2. Ahorro</b>						
<b>BREEAM</b>						
Consumo de agua	x	x	x	x	x	x
Sistema de riego	x	x	x	x		x
<b>CASBEE</b>						
Ahorro de agua	x	x	x	x	x	x
<b>LEED</b>						
Landscaping	x	x	x	x	x	x
Ahorro de agua al interior del edificio	x	x	x	x	x	x
Sistema de irrigación	x	x	x	x	x	x
<b>VERDE</b>						
Consumo de agua para riego de jardines	x	x	x	x	x	x
<b>3. Reciclaje</b>						
<b>BREAM</b>						
Reciclaje de agua	x	x	x	x	x	x
Tratamiento sostenible de agua en el emplazamiento					x	x
Recolección de agua lluvia en suelo artificializado	x	x	x	x	x	x
<b>LEED</b>						
Reciclar agua	x	x	x	x	x	x
<b>VERDE</b>						
Retención de aguas lluvias para su reutilización	x	x	x	x	x	x
Recuperación y reutilización de aguas grises	x	x				x
<b>CASBEE</b>						
Reciclaje de agua lluvia	x	x	x	x	x	x



**Figura 1.** Criterios seleccionados

### 3.2. Determinación de niveles de valoración

#### 3.2.1. Encuestas a 280 viviendas de la ciudad de Cuenca

Los resultados demuestran que apenas el 24 % de las viviendas aplican alguna estrategia de ahorro de agua potable (Tabla 2).

**Tabla 2.** Juicios para la selección de los criterios de evaluación

Equipo o dispositivo	Porcentaje
Inodoros ahorradores de agua	6 %
Dispositivos ahorradores en los grifos	2 %
Lavadora de ropa ahorradora de agua	14 %
Lavavajillas ahorradores de agua	0 %
Reutiliza las aguas grises o agua lluvia para el riego del jardín	1 %
Ninguno	76 %
<b>Total</b>	<b>100 %</b>

Además, en la Tabla 3 se muestra que el 61 % de los encuestados considera que el ahorro de agua es importante o muy importante.

**Tabla 3.** Importancia que tiene una vivienda que ahorre energía y agua; que en su proceso de construcción consume menos recursos o cause un mínimo impacto sobre el medioambiente para los habitantes en la ciudad de Cuenca

Nivel de importancia	Porcentaje
Nada importante	13 %
Poco importante	3 %
Indiferente	23 %
Importante	29 %
Muy importante	32 %
<b>Total</b>	<b>100 %</b>

El 34 % de los encuestados estaría dispuesto a invertir en una vivienda con características de ahorro de agua y energía (Tabla 4).

**Tabla 4.** ¿Estaría dispuesto a invertir en una vivienda con las características anteriores?

Disposición	Porcentaje
<b>Sí</b>	34 %
<b>No</b>	66 %
<b>Total</b>	<b>100 %</b>

#### 3.2.2. Medición del consumo de agua en 10 viviendas

##### Resultados de las mediciones

La media aritmética de los resultados de las mediciones en distintos usos de las 10 viviendas se presenta en la Tabla 5. Se observa que el 54,45 % de consumo

de agua potable se debe a usos en sanitarios, lavado de ropa y otros usos como riego de jardines, lavado de patios y autos.

**Tabla 5.** ¿Estaría dispuesto a invertir en una vivienda con las características anteriores?

Descripción	Media aritmética (l)	Porcentaje %
Total por habitante (l/habitante/día)	179,508	100
Cocina	33,531	18,68
Higiene personal ducha	37,386	20,83
Higiene personal lavabos	10,856	6,05
Sanitarios	50,218	27,98
Lavado de ropa y otros usos como riego de jardines, lavado de patios y autos	47,518	26,47

##### Resultados de las encuestas

Según los resultados de la media aritmética realizada a los encuestados de las diez viviendas, se determina que utilizan el sanitario 3,3 veces al día (Tabla 6). Este valor de percepción de uso del sanitario está por debajo del uso real que es en promedio 5 veces por día [35], por lo que para la investigación se toman los datos medidos de uso real en las viviendas.

**Tabla 6.** ¿Cuántas veces utiliza el sanitario al día un miembro de su familia que vive en la vivienda?

Vivienda	Uso de sanitario al día
1	3
2	4
3	4
4	4
5	3
6	2
7	5
8	3
9	4
10	1
<b>Media aritmética</b>	<b>3,3</b>

Ninguna de las viviendas encuestadas dispone de algún sistema para recolectar agua lluvia y 90 % estaría dispuesto a utilizar el agua de lluvia para usos en sanitarios, riego y limpieza (Tabla 7). El monto mensual que estarían dispuestos a invertir en equipos que permitan un uso sustentable de agua se muestra en la Tabla 8.

**Tabla 7.** ¿Estaría dispuesto a utilizar el agua lluvia en su vivienda para usos en sanitarios, riego y limpieza?

Disponibilidad	Porcentaje
Sí	90
No	10
<b>Total</b>	<b>100</b>

**Tabla 8.** Monto mensual que estarían dispuestos a invertir en equipos que permitan un uso sustentable de agua

Rango	Porcentaje
De \$0,00 a \$10,00	50
De \$10,00 a \$20,00	30
De \$20,00 a \$50,00	10
De \$50,00 a \$100,00	0
Más de \$100,00	10
<b>Total</b>	<b>100 %</b>

### 3.2.3. Datos de consumo de agua potable en Cuenca

En la Tabla 9 se presenta el consumo de agua de todas las acometidas domiciliarias de Cuenca durante un año.

**Tabla 9.** Monto mensual que estarían dispuestos a invertir en equipos que permitan un uso sustentable de agua

Mes	Consumo total (m <sup>3</sup> )	Consumo industrial y comercial (m <sup>3</sup> )	Consumo residencial (m <sup>3</sup> ) residenciales	Número de instalaciones
dic-15	2 613 187,00	357 176,00	2 256 011,00	104 392,00
nov-15	2 473 961,00	343 162,40	2 130 798,60	104 171,00
oct-15	2 551 035,00	368 922,00	2 182 113,00	104 041,00
sep-15	2 558 923,00	357 506,80	2 201 416,20	103 956,00
ago-15	2 453 018,00	342 898,40	2 110 119,60	103 493,00
jul-15	2 512 488,00	311 477,40	2 201 010,60	105 028,00
jun-15	2 466 598,00	310 049,10	2 156 548,90	104 482,00
may-15	2 556 930,00	308 137,60	2 248 792,40	104 076,00
abr-15	2 774 639,00	274 218,85	2 500 420,15	103 645,00
mar-15	2 657 568,00	257 141,45	2 400 426,55	103 415,00
feb-15	2 752 265,00	260 831,70	2 491 433,30	98 420,00
ene-15	2 760 075,00	261 616,50	2 498 458,50	103 038,00
<b>Total</b>	<b>31 130 687,00</b>	<b>3 753 138,20</b>	<b>27 377 548,80</b>	<b>1 242 157,00</b>
<b>Media aritmética</b>	<b>2 594 223,92</b>	<b>312 761,52</b>	<b>2 281 462,4</b>	<b>103 513,08</b>

Se observa que la ciudad cuenta con una media aritmética de 103 513 instalaciones domiciliarias residenciales, por otra parte, el total del consumo de agua es 31 130 687,00 m<sup>3</sup>, donde el consumo de agua residencial representa 27 377 548,80 m<sup>3</sup>. Si la media aritmética de las instalaciones existentes se multiplica por 3,73 que corresponde al número de habitantes promedio por hogar, según los datos que establece el INEC [34], se obtiene un total de 386 103 personas. Luego si se divide el consumo residencial total para el número de personas servidas y se transforma a días, se determina un promedio de consumo de agua de 194,27 l/habitante/día.

Además, en la Tabla 10 se muestran las variaciones de consumo de agua durante un año de las diez viviendas. La tabla muestra una media aritmética de variación del 15,12 %, lo cual permite deducir que, si la variación es mayor a esta, pueden existir fugas.

**Tabla 10.** Monto mensual que estarían dispuestos a invertir en equipos que permitan un uso sustentable de agua

Vivienda	Media aritmética consumo (m <sup>3</sup> )	Varianza	Desviación estándar	Coefficiente variación en %
1	30,44	23,24	4,82	15,83
2	21,53	62,48	7,9	36,69
3	75,29	96,56	9,83	13,06
4 y 5*	30	10,12	3,18	10,6
6	17,8	1,76	1,33	7,47
7	30,71	21,14	4,6	14,98
8	39,41	23,66	4,86	12,33
9	9,65	2,11	1,45	15,03
10	12,94	1,68	1,3	10,05
<b>Media aritmética</b>				<b>15,12 %</b>

\* La vivienda 4 y 5 comparte un medidor general.

### 3.2.4. Definición de niveles de valoración para cada criterio de evaluación

Con los resultados obtenidos se determinan tres niveles de valoración, un básico, un intermedio y un superior, para cada uno de los cuatro criterios de evaluación definidos en el análisis comparado de métodos internacionales, basado en la investigación de Quesada (2014) [27].

#### • Criterio de consumo máximo

##### Nivel básico

La media aritmética del consumo de agua potable por habitante obtenido de la medición de 10 viviendas es de 179,51 l/habitante /día (Tabla 5) y el consumo en la ciudad según los datos de la empresa municipal durante un año es de 194,27 l/habitante/día. Ambos datos son inferiores a la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-11 [21], la cual establece que para viviendas la dotación se puede tomar entre 200 a 350 l/habitante/día.

Por lo tanto, dado que los valores obtenidos en los casos de estudio y de consumo real, están cerca de 200 l/habitante/día, se establece como estándar dentro del nivel básico, a este valor.

##### Nivel intermedio

Se considera que en las encuestas realizadas a las 280 viviendas existe solo un 6 % que usan sanitarios ahorradores (Tabla 2); en los datos obtenidos de las diez viviendas (Tabla 5), se observa que el uso de agua potable en sanitarios representa un 27,98 % del total del consumo.

Por ello, como nivel intermedio se establece la utilización de sanitarios ahorradores con una descarga de 4,8 litros, y considerando que una persona utiliza el sanitario 5 veces al día, reflejaría un consumo de 24 l/habitante/día en sanitarios.

De esta manera, si se toma el 27,98 % de consumo por sanitarios del valor total de 200 l/habitante/día, se obtiene un consumo de 55,96 l que comparado frente a los 24 l que representa un inodoro ahorrador, se refleja un ahorro de 31,96 l/habitante/día.

A este dato se suman 40 l más de ahorro por la reutilización de aguas lluvias (la justificación de este dato se detalla en el criterio de reutilización de agua), obteniendo finalmente una factibilidad de ahorro de 71,96 l/habitante/día. Por ello, se establece para el nivel intermedio un consumo entre 160 a 120 l/habitante/día.

### Nivel superior

Para alcanzar el nivel superior se pide demostrar un consumo de agua potable menor a 120 l/habitante/día por vivienda.

- **Control de consumo de agua y fugas**

### Nivel básico

Es necesario establecer un plan de control de fugas, que consiste en el registro de agua consumida, utilizando un medidor al ingreso de la vivienda, el cual permite generar un historial de consumo.

El medidor debe contar con las siguientes características: ser de chorro múltiple y que cumplan con las exigencias metrológicas de las clases A y B de la Resolución 246; 2000 del INMETRO, de las normas MERCOSUR NM 212 e ISO 4064. NTE INEN-OIML R 49-1:2009 [29], [36].

En la Tabla 10 se observa que la media aritmética de variación del consumo es de 15,12 %, por lo que se puede decir que una variación de más del 15 % con respecto a la media aritmética del consumo mensual, es indicador de posibles fugas de agua en la vivienda.

Además, debe darse un mantenimiento adecuado a las instalaciones de agua, a través de un plano que indique el lugar exacto donde se encuentran instaladas las tuberías. Debe cumplirse las normas INEN 1373 requeridas para tubería de PVC, INEN 2955 y 2956 para tubería de termofusión y demás normas para tuberías de agua y accesorios. Cada aparato sanitario debe contar con una llave angular o una llave de paso, con el fin de facilitar el mantenimiento y reemplazo de los equipos [37].

Por lo tanto, se establece dentro del nivel básico, la utilización de tuberías y equipos sanitarios que cumplan las normas antes señaladas, instalados de acuerdo con especificaciones técnicas de cada equipo y accesorio; además, cada equipo debe contar con una llave angular o una llave de paso que facilite su reemplazo y mantenimiento.

También se evalúa la existencia de un plan de gestión, que comprenda:

- un contador de consumo que cumpla las características antes señaladas, y
- un registro mensual que permita detectar posibles fugas.

- **Criterio sobre el uso de dispositivos ahorradores**

### Nivel básico

Se define el nivel básico de acuerdo con lo que estipula la norma local NTE INEN 1571:2011 segunda revisión 2011-07, sección 3.1.6.7, para inodoros y sanitarios.

El consumo promedio de agua máximo por descarga a una presión de 0,3 MPA debe ser:

- 6,2 litros por descarga para inodoros de bajo consumo
- 3,8 litros por descarga para urinarios de bajo consumo

Para dispositivos ahorradores como grifos y duchas con aireadores, no existe norma local que establezca un consumo promedio, por lo que se considera los métodos de evaluación:

- Grifos de un caudal máximo menor o igual a 5 / 6 litros a una presión hidráulica de 0,3 MPa.
- Duchas de un caudal máximo menor o igual a 6 / 9 litros a una presión hidráulica de 0,3 MPa.

La presión que ETAPA EP maneja en la ciudad es de servicio continuo alrededor de 0,5 y 0,7 MPa a la salida del medidor de control. Desde el medidor hasta los puntos de abastecimiento, debido a la pérdida de presión por el recorrido, puede alcanzar los 0,3 MPa que se establece para los dispositivos ahorradores.

Del mismo modo, por falta de normativa local sobre el consumo de agua para electrodomésticos se considera a los métodos de evaluación, y se establece para la lavadora un consumo no mayor a 40 / 45 litros por uso y para el lavavajillas no más de 7 / 10 litros por uso.

### Nivel intermedio

Para alcanzar el nivel intermedio, además de cumplirse las condiciones del nivel básico, debe disminuirse el consumo de agua en inodoros y urinarios. Los valores que se exigen son tomados de la norma local NTE INEN 1571:2011:

- 4,8 litros por descarga para inodoros de alta eficiencia.
- 1,9 litros por descarga para urinarios de alta eficiencia.

En el caso de inodoros de doble descarga, el consumo de agua máximo debe ser 4,8 litros por descarga en promedio.

### Nivel superior

Para el nivel superior, se debe cumplir con las exigencias del nivel intermedio y demostrar un mejoramiento en el ahorro de agua, es decir, emplear aparatos que tengan un consumo menor que los anteriores.

- **Criterio sobre sistemas de reutilización de agua lluvia**

### Nivel básico

Se considera que el 61 % de personas de las 280 viviendas cree en la importancia de ahorrar agua potable. Además, en los diez casos de estudio el 90 % de los propietarios estarían dispuestos a utilizar agua de lluvia en aseo de la vivienda, lavado de vehículos y otros usos.

Por lo tanto, se evalúa como nivel básico que la vivienda cuente con un sistema de recolección de aguas lluvias, donde el agua captada pueda ser usada en riego, aseo de la vivienda, lavado de vehículos y sanitarios.

### Nivel intermedio

Para determinar un rango de consumo máximo dentro del nivel intermedio, se considera el cálculo de abastecimiento de aguas lluvias que se podría conseguir con la cubierta de un lote mínimo. La fórmula que se aplica es la siguiente [38]:

$$\text{Abastecimiento} = 0,8 \times \text{área efectiva de captación} \times \text{cantidad de lluvia}$$

La media aritmética de área construible en lotes mínimos adosados en el cantón Cuenca, es de 71,17 m<sup>2</sup> (Tabla 11) según datos tomados del plan de ordenamiento [39], por lo que se establece para el estudio como lote mínimo un área de terreno de 120 m<sup>2</sup>, donde se puede emplazar una edificación continua con retiro frontal y posterior de 3 m, ya que es la tipología de implantación con retiros mínimos en la ciudad. Considerando este lote, se propone una cubierta con una longitud de aleros de 0,6 m respetando los retiros, con lo cual se contaría con un área total de cubierta de 85,4 m<sup>2</sup>.

**Tabla 11.** Características de lotes mínimos en sectores de tipología continua, tomado del Plan de Ordenamiento del cantón Cuenca

Frente mínimo	Área mínima (m <sup>2</sup> )	Retiro frontal (m)	Retiro posterior (m)	Área construible (m <sup>2</sup> )
6	75	0	3	57
7	90	3	3	48
7	100	3	3	58
7	120	3	3	78
9	150	5	3	78
9	180	5	3	108
<b>Media aritmética</b>				<b>71,17</b>

En cuanto a la cantidad de agua lluvia, la Tabla 12 evidencia mes a mes la media aritmética de pluviosidad en Cuenca. Estos datos corresponden al registro de los últimos 30 años de la Dirección de Aviación [40]. La media aritmética de pluviosidad por año es de 869,9 mm, lo que significa que puede captarse por cada metro cuadrado de superficie, una cantidad de 869,9 litros de agua de lluvia al año.

**Tabla 12.** Media aritmética de los resultados mensuales de la pluviosidad en mm/m<sup>2</sup> en la ciudad de Cuenca de 1977 a 2015. Tomado de la Dirección General de Aviación Civil

Mes	Media aritmética
Enero	62,4 mm
Febrero	85,9 mm
Marzo	113,7 mm
Abril	120 mm
Mayo	85,5 mm
Junio	44,9 mm
Julio	29,8 mm
Agosto	22,3 mm
Septiembre	48,5 mm
Octubre	92,5 mm
Noviembre	84,2 mm
Diciembre	80,5 mm
<b>Total</b>	<b>869,9 mm</b>
<b>Media aritmética</b>	<b>72,49 mm</b>

Aplicando la fórmula, se obtiene para el mes de enero un abastecimiento de 4,26 m<sup>3</sup>:

$$\begin{aligned} \text{Abastecimiento} &= 0,8 \times 85,4 \text{ m}^2 \times 62,4 \text{ mm} \\ &= 4,26 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

En la Tabla 13, en la columna de abastecimiento parcial, se presentan las cantidades de agua lluvia que se podrían captar mensualmente. En la columna siguiente se muestra la cantidad acumulada por mes y en la última columna se determina la diferencia de captación con respecto al mes anterior. Como se observa, es posible captar un total de 59,45 m<sup>3</sup> de agua lluvia al año. Si a este dato se lo divide para 3,73 habitantes por hogar, y se lo convierte a l/habitante/día, se determina que pueden utilizarse 43,66 l/habitante/día de agua lluvia. Por lo que puede establecerse una dotación diaria de agua lluvia de 40 l/habitante/día, este dato corresponde a un 20 % de la demanda total de agua de 200 l/habitante/día, y representa 4,5 m<sup>3</sup> de agua que podría usarse para cubrir usos en sanitarios, lavado de ropa y aseo de vivienda.

Si al mismo ejemplo de cubierta mínima, se le incorpora como área de recolección al patio de lavandería y garaje, se incrementaría un área de 21 m<sup>2</sup> de captación, por lo que se podría incorporar un total de 55 l/habitante/día de agua lluvia.

Por lo tanto, se define para el nivel intermedio que se utilice entre 40 l/habitante/día y 55 l/habitante/día de agua lluvia en usos de lavado de ropa, riego de jardines, aseo de vivienda y uso en sanitarios.

Tabla 13. Cálculo del volumen de captación

Mes	Media aritmética (mm)	Abastecimiento (m <sup>3</sup> )		Demanda (m <sup>3</sup> )		Diferencia (m <sup>3</sup> )
		Parcial	Acumulado	Parcial	Acumulado	
Enero	62,4	4,26	4,26	4,5	4,5	-0,24
Febrero	85,9	5,87	10,13	4,5	9	1,13
Marzo	113,7	7,77	17,9	4,5	13,5	4,4
Abril	120	8,2	26,1	4,5	18	8,1
Mayo	85,5	5,84	31,94	4,5	22,5	9,44
Junio	44,9	3,07	35,01	4,5	27	8,01
Julio	29,8	2,04	37,05	4,5	31,5	5,55
Agosto	22,3	1,52	38,57	4,5	36	2,57
Septiembre	48,5	3,31	41,88	4,5	40,5	1,38
Octubre	92,5	6,32	48,2	4,5	45	3,2
Noviembre	84,2	5,75	53,95	4,5	49,5	4,45
Diciembre	80,5	5,5	59,45	4,5	54	5,45

### Nivel superior

Como nivel superior se establece que la vivienda demuestre que cuenta con un sistema de recolección de aguas lluvias, que pueda incorporar una cantidad superior a 55 l/habitante/día en usos de lavado de ropa, riego de jardines, aseo de vivienda y uso en sanitarios.

### 4. Conclusiones

Se demuestra la posibilidad de reducir el consumo de agua potable hasta un 30 % en viviendas en la ciudad de Cuenca, sin afectar la calidad de vida de sus habitantes, mediante la aplicación de estrategias sustentables.

Proyectando el porcentaje de ahorro en consumo (30 %) a toda la ciudad de Cuenca, el consumo actual de 27 377 549 m<sup>3</sup> (Tabla 9) se reduciría a 19 164 284 m<sup>3</sup>, situación que garantizaría que la infraestructura existente preste el servicio de agua potable por más años de lo que se prevé, evitando costos a corto plazo por nueva infraestructura y los consecuentes daños al ecosistema.

Realizando una valoración económica, un consumo de 200 l/habitante/día (nivel básico) para una vivienda de cuatro habitantes, consume un promedio de 24 m<sup>3</sup> a una tarifa de \$0,60 por m<sup>3</sup> más \$3,00 de cargo, resulta en un costo de \$17,40. Sin embargo, si se cumplen los requisitos de nivel intermedio de los criterios analizados, se reduciría el consumo en el peor de los casos a 140 l/habitante/día, con lo cual, una familia de cuatro habitantes consumiría un promedio de 16,8 m<sup>3</sup>, generando un costo de \$9,72, lo cual representa un ahorro de \$7,68 mensuales, equivalente al 44 %.

Finalmente, el presente estudio podría tomarse como referencia para establecer una reducción del estándar de consumo de agua en la norma local, pues se observó que en Cuenca el consumo es de 194,27

l/habitante/día, valor relativamente por debajo del establecido por la norma nacional, y si a esto se suma el ahorro por el uso de inodoros eficientes, tomando en cuenta que el empleo de este tipo de inodoros es cada vez más común, se obtendría un consumo aproximado a 162 l/habitante/día, valor que se encuentra 20 % por debajo de la norma nacional.

### Referencias

- [1] A. A. Bohórquez Panche, K. P. Zabaleta Rodríguez, and A. Chávez Porras, "Programa de ahorro y uso eficiente del agua para la empresa Empucol del Municipio El Colegio, Cundinamarca," *Universidad Militar de Nueva Granada*, 1996. [Online]. Available: <https://goo.gl/K3cJ8M>
- [2] UNESCO, "Agua para todos, agua para la vida," Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, 2003. [Online]. Available: <https://goo.gl/wqfjHN>
- [3] ONU, "El derecho humano al agua y al saneamiento," Organización de las Naciones Unidas, 2010. [Online]. Available: <https://goo.gl/mXL8TG>
- [4] J. Frausto Ortega, "Abasto del agua en la frontera norte de Tamaulipas," *Frontera norte*, vol. 28, no. 55, pp. 153–182, 2016. [Online]. Available: <https://goo.gl/NgiVBF>
- [5] J. Morrison, S. L. Postel, and P. Gleick, "Sustainable use of water in the lower colorado river basin," Pacific Institute, 1996. [Online]. Available: <https://goo.gl/Jh4JF7>
- [6] L. E. Cervera Gómez, "Indicadores de uso sustentable del agua en Ciudad Juárez, Chihuahua,"

- Estudios fronterizos*, vol. 8, no. 16, pp. 9–41, 2007. [Online]. Available: <https://goo.gl/VJDaQo>
- [7] GBC España, “Residencial oficinas. Guía para los evaluadores acreditados. Nueva edificación residencial oficinas,” 2015. [Online]. Available: <https://goo.gl/BPNDBZ>
- [8] U.S. Green Building Council, “Leed@for homes rating system multifamily mid-rise | October 2010,” in *California Version, 2011 Update*, 2011. [Online]. Available: <https://goo.gl/nMzXX9>
- [9] BRE Global Ltd., *Manual BREEAM es vivienda 2011*, BREEAM Vivienda, 2011. [Online]. Available: <https://goo.gl/DEDQVF>
- [10] V. Corral Verdugo, B. S. Fraijo Sing, and C. Tapia Fonllem, “Un registro observacional del consumo individual de agua: Aplicaciones a la investigación de la conducta sustentable,” *Revista mexicana de análisis de la conducta*, vol. 34, no. 1, pp. 79–96, 06 2008. [Online]. Available: <https://goo.gl/ZmdLuX>
- [11] M. C. Bustamante Martínez, K. L. Cárdenas Chalá, and J. L. Corredor Rivera, “Formulación del programa de ahorro y uso eficiente de agua para la empresa de servicios públicos del Municipio Gachetá-Cundinamarca,” *Revista Gestión Integral en Ingeniería Neogranadina*, vol. 3, no. 2, 2011. [Online]. Available: <https://goo.gl/gEgNey>
- [12] F. Suárez, J. Santamarta, and A. Suárez, *Hidrología y recursos hídricos en islas y terrenos volcánicos: Métodos, Técnicas y Experiencias en las Islas Canarias*, 05 2013, ch. El transporte hidráulico, pp. 251–263. [Online]. Available: <https://goo.gl/pGi92j>
- [13] P. H. Gleick, D. Haasz, C. Henges-Jeck, V. Srinivasan, K. Kao Cushing, and A. Mann, *Waste Not, Want Not?: The Potential for Urban Water Conservation in California*, E. Pacific Institute for Studies in Development and Security, Eds. Pacific Institute, 2003. [Online]. Available: <https://goo.gl/tyXwQk>
- [14] M. Pacheco Montes, “Avances en la gestión integral del agua lluvia (giall): Contribuciones al consumo sostenible del agua, el caso de Lluviatl en México,” *Revista Internacional de Sostenibilidad Tecnología y Humanismo*, no. 3, pp. 39–57, 2008. [Online]. Available: <https://goo.gl/AcsQwi>
- [15] A. Khastagir and N. Jayasuriya, “Optimal sizing of rain water tanks for domestic water conservation,” *Journal of Hydrology*, vol. 381, no. 3, pp. 181–188, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.11.040>
- [16] J. Gamboa, “Diseño de una instalación sanitaria automática para ahorro de agua en una batería de baño público institucional,” Tesis de grado. Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia, 2014. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/11059/5130>
- [17] P. J. Kestler Roja, “Uso, reuso y reciclaje del agua residual en una vivienda,” Tesis de grado. Universidad Rafael Landívar. Guatemala, 2004. [Online]. Available: <https://goo.gl/MfSmFg>
- [18] D. G. Manco Silva, J. Guerrero Erazo, and A. M. Ocampo Cruz, “Eficiencia en el consumo de agua de uso residencial,” *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, vol. 11, no. 21, pp. 23–38, 2012. [Online]. Available: <https://goo.gl/zXNm1W>
- [19] M. A. Reyes Fillo, J. Lara Ávila, and L. Sánchez, “Tecnología de pruebas de medidores de agua de tipo domiciliario en el IMTA,” IMTA. Instituto Mexicano de Tecnología del agua, Tech. Rep. 40, 2010. [Online]. Available: <https://goo.gl/MA48wP>
- [20] G. Howard and J. Bartram, “Domestic water quantity, service level and health,” WHO. World Health Organization, Tech. Rep., 2003. [Online]. Available: <https://goo.gl/5hxpGM>
- [21] MIDUVI, *Norma Hidrosanitaria NHE agua*, Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. Ecuador Std., 2011. [Online]. Available: <https://goo.gl/YdmRda>
- [22] ETAPA EP. (2016) Agua potable. Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Cuenca – Ecuador. [Online]. Available: <https://goo.gl/bch4Mt>
- [23] SENPLADES. (2010) Proyecciones referenciales de población cantonal según años en grupos de edades. Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo. Ecuador. [Online]. Available: <https://goo.gl/fzNeRw>
- [24] B. G. Municipal, *Cuenca. Ciudad sostenible / plan de acción*, Banco Interamericano de Desarrollo. Gobierno Autónomo Descentralizado de la ciudad de Cuenca. Ecuador, 2014. [Online]. Available: <https://goo.gl/vQVKVQ>
- [25] E. Lentini and G. Ferro, *Políticas tarifarias para el logro de los Objetivos de Desarrollo del Milenio y el derecho humano al agua y al saneamiento*, C. C. Económica para América Latina y el Caribe, Ed. Serie. Recursos Naturales e Infraestructura, 2014. [Online]. Available: <https://goo.gl/Kpdxvr>

- [26] JSBC/IBEC. (2010) Comprehensive assessment system for built environment efficiency (casbee). Japan Sustainable Building Consortium. Institute for Building Environment and Energy Conservation. [Online]. Available: <https://goo.gl/V1T4Fg>
- [27] F. Quesada Molina, “Métodos de evaluación sostenible de la vivienda?: Análisis comparativo de cinco métodos internacionales,” *Revista Habitat Sustentable*, vol. 4, no. 1, pp. 56–67, 2014. [Online]. Available: <https://goo.gl/s3evad>
- [28] Elster, *Medidor Unijato Residencial Agua Caliente*, Elster. Vital Connections, 2010. [Online]. Available: <https://goo.gl/KTtA8t>
- [29] ——. Medidor elster m170. Elster Iberconta. [Online]. Available: <https://goo.gl/t71mEX>
- [30] INEN, *Medidores de agua para agua potable fría y agua caliente. Parte 2: Métodos de ensayo*, Instituto Ecuatoriano de Normalización Std., 2016. [Online]. Available: <https://goo.gl/7XH2q5>
- [31] IEOS, *Normas para estudio y diseño de sistemas de agua potable y disposición de aguas residuales para poblaciones mayores a 1000 habitantes*. Instituto Ecuatoriano de Obras Sanitarias, 1992. [Online]. Available: <https://goo.gl/vo4k67>
- [32] ——. *Norma de diseño para sistemas de abastecimiento de agua potable, disposición de escretas y residuos líquidos en el área rural*. Instituto Ecuatoriano de Obras Sanitarias, 2014. [Online]. Available: <https://goo.gl/y7kG7w>
- [33] A. Jiménez Marín and M. Marín Arias, “Diseño de un programa de uso eficiente y ahorro del agua para el acueducto ‘Asamun’ de la vereda mundo nuevo de la ciudad de Pereira,” Tesis de grado. Universidad Tecnológica de Pereira, 2007. [Online]. Available: <https://goo.gl/uigpq4>
- [34] INEC, “Promedio de personas por hogar a nivel nacional,” Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. Ecuador, Tech. Rep., 2010. [Online]. Available: <https://goo.gl/5SXiUT>
- [35] F. I. Arreguin Cortés, “Uso ediciente del agua,” *Ingeniería Hidráulica en México*, no. 2, pp. 9–22, 1991. [Online]. Available: <https://goo.gl/zCmYxz>
- [36] INEN, *Medidor de agua para agua potable fría y caliente. Parte 1: Requisitos Metrológicos y Técnicos*, Instituto Ecuatoriano de Normalización Std., 2009. [Online]. Available: <https://goo.gl/7XH2q5>
- [37] G. Vázquez Arenas, “Manual de instalaciones de fontanería, evacuación y saneamiento y energía solar en edificación,” Universidad Politécnica de Cartagena, 2011. [Online]. Available: <https://goo.gl/gA4uSL>
- [38] I. Adler, G. Carmona, and J. A. Bojalil, “Manual de captación de aguas de lluvia para centros urbanos,” El portal del agua desde México, 2013. [Online]. Available: <https://goo.gl/zbe3hb>
- [39] GAD Cuenca, “Reforma, actualización, complementación y codificación de la ordenanza que sanciona el plan de ordenamiento territorial del cantón Cuenca: Determinaciones para el uso y ocupación del suelo urbano,” 2003. [Online]. Available: <https://goo.gl/S7rc4f>
- [40] DGAC, “Pluviocidad histórico del cantón Cuenca,” Dirección general de Aviación Civil. Cuenca – Ecuador, 2016.



# PREDICCIÓN DE LA REDUCCIÓN DEL IMPACTO TÉRMICO EN UN EDIFICIO CON DOBLE PARED

## PREDICTION OF THERMAL IMPACT REDUCTION IN A DOUBLE WALL BUILDING

Marcelo Eduardo Berli<sup>1,\*</sup>, Agustín Brondino<sup>1</sup>, José Di Paolo<sup>1</sup>

### Resumen

En la ciudad de Santa Fe de la Vera Cruz, Argentina, se está construyendo un edificio de altura que incluye elementos de arquitectura sustentable, eficiencia energética y confort logrado con la utilización de recursos naturales. Particularmente, un diseño de doble fachada en los frentes que dan al exterior para lograr una cámara de aire que impida la transferencia térmica desde el exterior al interior en verano y al revés en invierno. Este trabajo presenta un estudio numérico de la evaluación del desempeño térmico de la cavidad interpuesta en la doble fachada del edificio, para distintas condiciones climáticas, considerando dos alternativas de diseño: cámara de aire cerrada y cámara de aire conectada con el exterior. Ambos casos se comparan con la situación de inexistencia de la cámara, cuya transferencia de energía térmica se constituye en el caso patrón. Los resultados muestran que para las condiciones de verano, la cavidad con conexión al exterior sería la más recomendable, mientras que para el invierno, la cavidad cerrada es más apta para el ahorro de energía.

**Palabras clave:** acondicionamiento de ambientes, arquitectura sustentable, ahorro de energía, simulación computacional.

### Abstract

In Santa Fe de la Vera Cruz city, Argentina, a building that includes elements of sustainable architecture, energy efficiency and comfort based on the use of natural resources is being built. Specifically, a double facade design on the front walls is meant to achieve an air chamber that prevents heat transfer from the outside to the inside in summer and vice versa in winter. In this work, a numerical study is presented for the evaluation of the thermal performance of a cavity (air chamber) interposed in a double facade of the building for different climatic conditions, considering two air chambers alternatives: connected and non connected to the outside. Both cases are energetically compared with the standard facade design without chamber. The results show that for summer conditions, a chamber connected to the outside would be the most efficient design, while for winter, the closed cavity is the best saving-energy alternative.

**Keywords:** computer simulation, energy saving, environment conditioning, sustainable architecture.

---

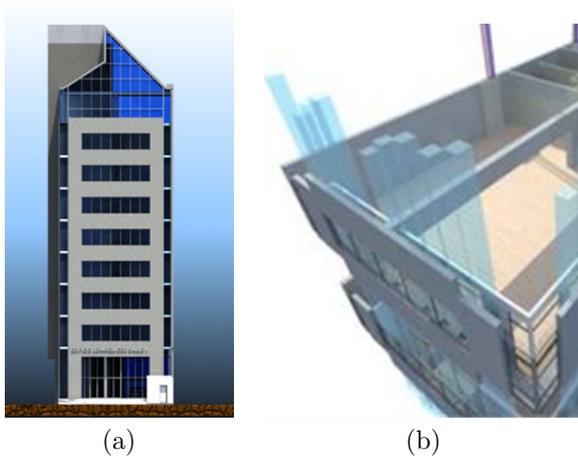
<sup>1,\*</sup>PID-UTN AMUTIFE 3457, Grupo de Investigación en Mecánica de los Fluidos, Universidad Tecnológica Nacional, Santa Fe – Argentina. Autor para correspondencia ✉: [mberli@santafe-conicet.gob.ar](mailto:mberli@santafe-conicet.gob.ar),  
 <https://orcid.org/0000-0001-9404-6787>, <https://orcid.org/0000-0001-5211-6396>  
 <https://orcid.org/0000-0002-6964-1864>

Recibido: 14-05-2018, aprobado tras revisión: 18-06-2018

Forma sugerida de citación: Berli, M. E.; Brondino, A. y Di Paolo, J. (2018). «Predicción de la reducción del impacto térmico en un edificio con doble pared». INGENIUS. N.º 20, (julio-diciembre). pp. 39-47. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n20.2018.04>.

## 1. Introducción

La mutual Jerárquicos Salud de la ciudad de Santa Fe de la Vera Cruz, Argentina, está construyendo un edificio administrativo de altura que incluye elementos de arquitectura sustentable, energéticamente eficiente y con un confort logrado en base a la utilización de la mayor cantidad de recursos naturales posibles (Figura 1-a). Para este fin, se diseñaron las caras externas este, oeste y sur del edificio con una doble fachada que lo recorre desde la planta baja hasta el último piso, que consiste en una pared externa y una interna de distinto material, separadas ambas por un espacio de aire de 50 cm de espesor, como se ve en el detalle de la Figura 1-b. De esta manera, se genera una cámara de aire que separa físicamente la fachada externa e interna y tiene el objetivo de lograr un aislamiento térmico entre el exterior y el interior del edificio. La cámara de aire de cada piso se comunica con las cámaras de los pisos superior e inferior mediante orificios de circulación realizados en la losa.



**Figura 1.** a) Esquema del edificio con doble fachada. b) Vista en corte y perspectiva de la doble fachada.

Debido a que las cámaras de aire de cada piso están interconectadas, existe la posibilidad de que pueda generarse un flujo de aire que recorra total o parcialmente la altura del edificio. Este flujo sería beneficioso desde el punto de vista térmico, sobre todo para las épocas estivales, ya que la circulación de aire se comporta como una barrera que reduce la transmisión de calor desde la cara externa hacia la interna y transporta una cantidad importante de energía térmica hacia el exterior del edificio, evitando su ingreso. La traducción en confort térmico y reducción del consumo energético en el interior es directa, pudiendo, además, regular con mayor eficacia las condiciones ambientales de los lugares de trabajo.

No obstante, los potenciales beneficios térmicos y energéticos del diseño actual, su efectivo funcionamiento y las posibles modificaciones ante el grado

de avance actual de la obra, para optimizar su comportamiento térmico, no son directamente predecibles, requiriéndose en esta etapa de herramientas predictivas experimentales y/o computacionales.

El abordaje del estudio experimental de las cámaras interconectadas de aire y su desempeño térmico requiere de una inversión en materiales, tiempo y recursos humanos elevados. Por otro lado, los estudios realizados mediante simulación computacional arrojan predicciones numéricas cuyos resultados permiten obtener inferencias que dirigen la experimentación hacia valores más certeros. Los resultados numéricos orientan al diseño y el éxito de su poder predictivo se basa no solo en su sustento en las leyes físicas, sino también en su capacidad para adaptarse a nuevas ideas y explorar un gran número de alternativas.

Este trabajo presenta el estudio numérico del desempeño térmico de una cavidad interpuesta en la doble fachada del edificio, a través de simulaciones computacionales para distintas condiciones climáticas, considerando dos alternativas de diseño: cámara de aire cerrada y cámara de aire con conexión con el aire exterior.

Los resultados muestran que para las condiciones de verano, el diseño de la cavidad implica una importante reducción en la energía térmica que ingresaría al edificio. Entre las alternativas analizadas, los diseños de la cavidad con conexión al exterior serían lo más recomendable en verano y la cámara cerrada sería la más apta para el invierno.

## 2. Materiales y métodos

El trabajo se constituye en una obra teórica computacional, basada en hipótesis acerca del fenómeno de transferencia térmica en la cámara de aire producida por la doble fachada. Estas consideraciones se resumen en flujo turbulento y transferencia térmica dominada por la convección [1-4] y se listan a continuación:

- 1) Estado estacionario debido a que las condiciones atmosféricas a que está expuesto el edificio varían muy lentamente durante un día, es aceptable esta aproximación para la cual se utilizarán las condiciones más exigentes de las estaciones verano e invierno.
- 2) La transferencia térmica entre los pisos se realiza solamente a través de los orificios de circulación, asumiendo que las losas son aislantes perfectos. Esto significa que al calcular la energía térmica que ingresa a cada piso la misma podrá provenir solamente desde las fuentes que se conecten con la cámara, esto es, desde el exterior y desde las cámaras de aire de los pisos contiguos.
- 3) No hay aporte de energía térmica por artefactos, personas, luminarias ni otra fuente. Esta sim-

plificación se realiza para estudiar solamente el ahorro de energía que implica la existencia de la cámara.

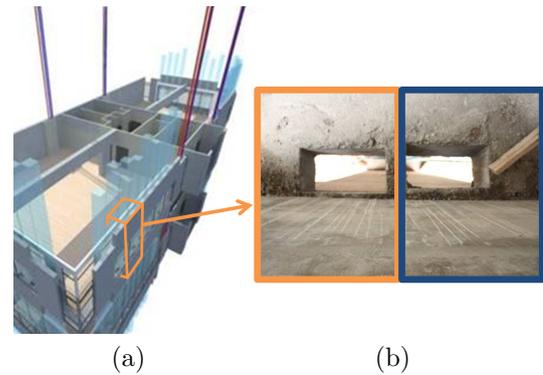
- 4) Se desprecia el aporte de energía térmica por radiación desde la pared externa hacia la interna.
- 5) El contenido de humedad del aire que circula por las cavidades es despreciable.
- 6) El flujo de aire en las cavidades se desarrolla en régimen turbulento. Debido a que no se desea tener información detallada de la capa límite en el contacto entre las paredes y el aire, se utilizó un modelo de turbulencia del tipo  $k-\epsilon$ , aplicado en un *software* de simulación avanzado.
- 7) Las paredes internas y externas se asumen lisas.

## 2.1. Definición del sector donde se realizarán las simulaciones

Como se ha mencionado en la introducción, este trabajo consiste en el estudio de un modelo físico representativo de la cavidad cuyo desempeño térmico desea ser estudiado. Como es sabido, la disponibilidad de herramientas informáticas de alta capacidad de cómputo facilita la solución de problemas complejos como el abordado en este trabajo. No obstante, al ser limitada la disponibilidad de recursos, el tamaño del problema en estudio debe reducirse de forma tal que pueda resolverse y que al mismo tiempo la porción estudiada sea representativa del problema completo. En el caso de la cavidad en estudio, la simulación del problema en la totalidad de sus dimensiones es computacionalmente muy costosa. Por tal motivo, es posible seccionar el problema en una porción cuyas dimensiones contengan todas las características geométricas que condicionan el flujo del aire en la cámara, de manera que el comportamiento del resto de la cavidad pueda considerarse como una repetición de la porción estudiada. La selección de dicha porción puede observarse en la Figura 2-a (prisma transparente de aristas anaranjadas). El prisma que delimita la zona seleccionada consta de una porción de la cámara correspondiente a un piso cualquiera del edificio. Si tomásemos una fotografía de una vista superior de dicha cámara, tendríamos una imagen como la mostrada en el recuadro naranja de la Figura 2-b, donde puede observarse la presencia del orificio de circulación realizado en la losa del piso correspondiente y que conecta la cámara de aire con la del piso anterior.

Observando la Figura 2-b puede notarse que la sección rectangular contigua (recuadro en azul) y la seleccionada (recuadro en naranja) están dispuestas en espejo. Desde el punto de vista físico, este hecho implica una simetría en la geometría, indicando que la solución del problema en la sección de recuadro

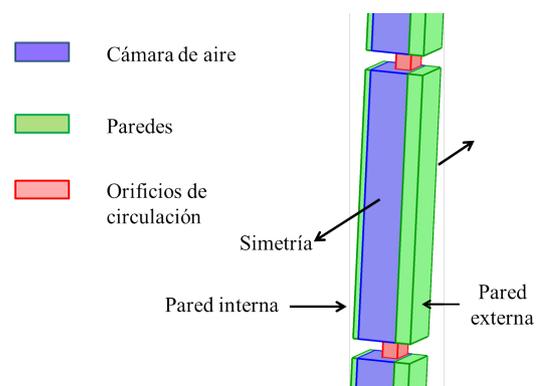
anaranjado es la misma que en su contigua (recuadro azul), pero espejada. Matemáticamente hablando, esto quiere decir que las derivadas de las variables involucradas, respecto a la dirección horizontal son nulas. Luego, el esquema de los dos orificios de la Figura 2-b se repite en las mismas posiciones de cada losa que divide dos pisos contiguos.



**Figura 2.** a) Porción seleccionada para la simulación. b) Orificios de circulación realizados en la losa.

Como existe un esquema repetido, es aceptable resolver el problema en la porción considerada con recursos computacionales estándares. Si a esta selección se le adicionan las porciones de pared interior y exterior, entre las cuales se ubica la cámara de aire, y los orificios en las losas, se llega a la definición de un módulo de simulación, el cual puede verse en la Figura 3. Las dimensiones y materiales de cada módulo son los siguientes:

- Pared externa: construida de concreto, con 20 cm de espesor, 3,45 m de altura y 70 cm de ancho.
- Pared interna: construida de concreto de 7 cm de espesor y las demás dimensiones iguales que la pared externa.
- Cámara de aire: 50 cm de espesor y demás dimensiones iguales a la pared exterior.
- Orificios: 20 cm x 40 cm de sección horizontal y un espesor (en la losa) de 25 cm.



**Figura 3.** Esquema geométrico del módulo de simulación.

La sumatoria de todos los módulos a través de los orificios de circulación, definirán la geometría total para la simulación del problema a resolver. Es decir, 8 módulos como el de la Figura 3, interconectados por los orificios de circulación.

## 2.2. Modelo en ecuaciones y metodología de resolución

El movimiento del aire dentro de la cavidad se debe principalmente a fuerzas de flotación, asociadas a los gradientes de densidad que se originan por la diferencia de temperaturas entre las paredes que generan la cavidad. Este fenómeno se conoce como convección natural y su dinámica ha sido descrita en trabajos anteriores mediante la aproximación de Boussinesq. Esta aproximación considera la variación de la densidad únicamente en las fuerzas volumétricas, mediante una función lineal con el cambio de temperatura y con validez para flujo laminar incompresible y bajos gradientes térmicos.

En la cavidad simulada, los gradientes térmicos suelen ser superiores a los límites de validez de la aproximación de Boussinesq [5]. Por ello, a los fines de avanzar hacia simulaciones más realistas, en este trabajo se utiliza un modelo de flujo compresible, asumiendo flujo turbulento en estado estacionario y despreciando los efectos de la radiación en la transferencia de energía. De esta manera, las ecuaciones diferenciales que describen el flujo de convección natural son las siguientes:

*Continuidad*

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

*Cantidad de movimiento*

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot \left[ -P \mathbf{I} + (\mu + \mu_T)(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3}(\mu + \mu_T)(\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} - \frac{2}{3} \rho k \mathbf{I} \right] + (\rho - \rho_0) \mathbf{g} \quad (2)$$

*Energía*

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k_A \nabla T) \quad (3)$$

Donde  $\mathbf{u}$  es el vector velocidad,  $\rho$  es la densidad del aire,  $\rho_0$  es la densidad del aire a la temperatura ambiente (externa),  $P$  es la presión modificada,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $\mu$  la viscosidad del aire,  $\mu_T$  la viscosidad turbulenta,  $k$  la energía cinética turbulenta,  $C_p$  la capacidad calorífica del aire,  $k_A$  la conductividad térmica del aire y  $T$  la temperatura.

Para describir el flujo turbulento se utilizó el modelo de k- $\epsilon$ , que se ha demostrado es el más preciso

para el cálculo del movimiento de aire dentro de habitaciones en viviendas y edificios [6]. No obstante, debe destacarse que dicha precisión disminuye muy cerca de las paredes, donde modelos como el k- $\epsilon$  de bajo número de Reynolds prometen una mejor descripción de los perfiles de velocidad y temperatura [7]. Sin embargo, este estudio se orienta a mostrar las bondades generales del sistema y no una predicción exacta de los valores que se calculan cerca de las paredes, en cuyo caso la descripción del modelo k- $\epsilon$  es muy útil para una primera estimación y permite obtener resultados con mucho menos costo computacional y más rápidamente, siendo lo último deseable en estudios requeridos para la toma de decisiones de las empresas constructoras. Así, además de las ecuaciones de conservación se suman: la ecuación (4) de la variación de energía cinética turbulenta y la ecuación (5) de la velocidad de disipación turbulenta:

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) k = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \epsilon \quad (4)$$

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \epsilon = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \left( \mu_T \cdot \left[ \nabla \mathbf{u} : (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u}^2) \right] - \frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot \mathbf{u} \right) - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

La viscosidad turbulenta  $\mu_T$  se define por la Ecuación (6).

$$\mu_T = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (6)$$

Los parámetros de las ecuaciones (4) a (6) se consideran constantes, con los siguientes valores [5]:

$$\begin{aligned} C_{\epsilon 1} &= 1,44 \\ C_{\epsilon 2} &= 1,92 \\ C_\mu &= 0,09 \\ \sigma_k &= 1 \\ \sigma_\epsilon &= 1,3 \end{aligned}$$

### 2.2.1. Condiciones de contorno

El modelo de flujo turbulento k- $\epsilon$  empleado, no resuelve el perfil de velocidades contra la pared sólida sino que utiliza funciones de pared que modelan los altos gradientes de velocidad y temperatura que se producen en esa zona. Para ello, además de la condición de impermeabilidad de la pared definida por la Ecuación (7) y del flujo de energía cinética nulo, definido por la Ecuación (8), se utilizó la Ecuación (9) que utiliza una función de pared:

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (7)$$

$$\nabla k \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (8)$$

$$\left[ (\mu + \mu_T)(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3}(\mu + \mu_T)(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I} - \frac{2}{3}\rho k \mathbf{I} \right] \mathbf{n} = -\rho \frac{u_\tau}{\delta_w^+} \mathbf{u}_{tang} \quad (9)$$

Con

$$\epsilon = \rho \frac{C_\mu k^2}{K_v \delta_w^+ \mu}$$

Donde  $\mathbf{u}_{tang}$  es la velocidad tangencial, definida como  $\mathbf{u}_{tang} = \mathbf{u} - (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n})\mathbf{n}$ ,  $u_{tau}$  la velocidad de fricción,  $K_v$  es la constante de Von Kármán y  $\delta_w^+$  es el espesor adimensional de la función de pared. Además, en los orificios de entrada y salida se asumió tensión normal igual a cero,  $\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{u}$ , y la presión en la entrada inferior se definió arbitrariamente igual a 0.

Para el análisis térmico se consideraron constantes en cada simulación, las temperaturas de las paredes que delimitan la cavidad, así como condiciones de simetría en los cortes que se ven en la Figura 3. La temperatura del aire que ingresa a la cavidad también se supone constante e igual a la temperatura del ambiente ( $T_a$ ).

Las ecuaciones diferenciales presentadas y sus correspondientes condiciones de contorno se resuelven de forma numérica mediante el método de los elementos finitos utilizando el *software* comercial con licencia, COMSOL 4.4.

### 2.2.2. Verificación del régimen de flujo

Trabajos anteriores [1–4, 8, 9] han abordado el análisis del fenómeno de convección natural en cavidades representativas con aire (techos entre otros) mediante modelos de flujo laminar. No obstante, debido a las dimensiones de las cavidades en este trabajo y las propiedades del aire, es razonable esperar que en condiciones normales el flujo pueda ser turbulento, lo cual fue necesario corroborar previo a la selección del modelo. Con este fin, se utilizaron como parámetros adimensionales el número de Reynolds y el de Grashof, los cuales fueron estimados utilizando las propiedades físicas del aire seco presentadas en la Tabla 1. Estas propiedades se adoptaron para presión atmosférica normal ( $10^5$  Pa) y 30 °C [10], correspondiente a la temperatura ambiente (de referencia) utilizada en el modelo.

**Tabla 1.** Propiedades físicas de aire seco a 30 °C y presión atmosférica

Descripción	Valor
Densidad ( $\rho$ )	1,205 [kg/m <sup>3</sup> ]
Viscosidad ( $\mu$ )	1,82e-5 [N s/m <sup>3</sup> ]
Conductividad térmica ( $k_A$ )	0,0257 [W/(m K)]
Capacidad calorífica ( $C_p$ )	1,005 [kJ/(kg K)]
Coefficiente de expansión térmica ( $\beta$ )	3,43e-3 [1/K]

El número de Reynolds compara la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas y se define por la relación  $Re = \rho U_c L / \mu$ , siendo  $U_c$  y  $L$  la velocidad y longitud características del modelo. Por otro lado, el número de Grashof indica la relación entre las fuerzas de flotación y las fuerzas viscosas y se define por la relación  $Gr = \rho^2 g \beta \Delta T L^3 / \mu^2$ , siendo  $\Delta T$  la diferencia de temperatura característica del sistema en estudio. Cuando las fuerzas de flotación son grandes comparadas con las viscosas el régimen se considera turbulento. La transición entre estos dos regímenes para placas verticales se da para un Gr del orden de  $10^9$  [10].

Si se definen como parámetros característicos, la velocidad de flujo de flotación  $U_c = (g \beta \Delta T L)^{1/2}$ , la longitud  $L = 3m$  igual a la altura de cada cámara entre dos pisos contiguos y la diferencia de temperatura entre las paredes de la doble fachada,  $\Delta T = 56$  °C, los valores resultantes de  $Re \approx 10^6$  y  $Gr \approx 10^{11}$ , indican claramente la existencia de un régimen turbulento o de transición, pero no laminar. Luego, los resultados que se presentan en la siguiente sección se corresponden a un flujo de aire dentro de la cavidad que se encuentra en régimen turbulento para todas las condiciones simuladas.

## 3. Resultados y discusión

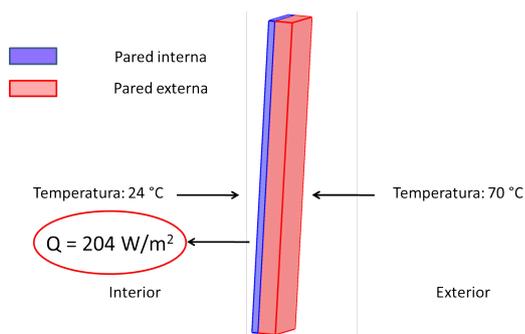
La primera condición exigente a estudiar responde a las condiciones extremas en verano. La parte de pared externa en contacto con el exterior tiene una temperatura de 70 °C, suponiendo a la misma expuesta a la incidencia del sol en las horas de máxima temperatura. Por otro lado, la parte de la pared interna en contacto con el interior del edificio, tiene una temperatura para la cual se considera un ambiente de trabajo agradable, esto es, 24 °C. Como el objetivo es estudiar el desempeño térmico de la cavidad, es razonable considerar primero la situación de ausencia de cavidad asumiendo las paredes externa e interna en contacto directo, suprimiendo también los orificios de circulación. Cabe aclarar que para el caso de ausencia de cavidad se conservan ambas paredes y no solamente la externa,

ya que de contar solo con esta última los posteriores resultados se modificarían no solamente por la inclusión de la cavidad sino también por el agregado de otra pared, en cuyo caso el análisis no podría focalizarse solamente en la existencia o ausencia de la cavidad.

### 3.1. Situación testigo: ausencia de cavidad

La Figura 4 muestra un esquema de las condiciones en que se realizó la simulación.

Debido a que no existen los orificios de circulación, la consideración 2) del inciso 2 permite el cálculo de la transferencia de energía térmica de un módulo en forma independiente de los demás. Ante esta situación, en cada módulo se ha calculado un ingreso de energía térmica de  $204 \text{ W/m}^2$ , valor que será utilizado en los siguientes casos. Cabe aclararse que, a diferencia de los casos venideros, el único mecanismo de transmisión térmica es el de conducción, motivo por el cual se puede comprobar el valor obtenido utilizando la ley de Fourier.



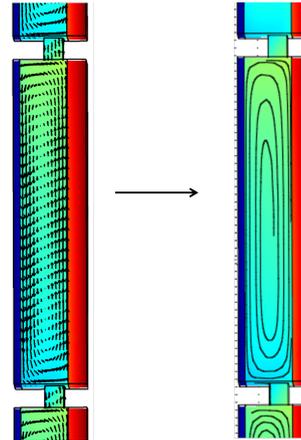
**Figura 4.** Condiciones de simulación y energía térmica para ausencia de cavidad.

### 3.2. Cavidad sin conexión con el exterior

El segundo caso analizado consiste en la cámara de aire, pero sin conexión con el exterior. Esto es, si bien las cámaras de todos los pisos están interconectadas mediante los orificios, ninguna de las cámaras tiene alguna abertura que la conecte con el ambiente externo al edificio. El aire quedará así atrapado en las cámaras y solo puede haber circulación a través de los orificios. La diferencia de temperatura entre las paredes externas e internas genera variaciones en la densidad del aire y por ende convección natural [8,9] como muestra la Figura 5.

Puede observarse que el aire en contacto con la pared más caliente (en rojo) asciende y aumenta su temperatura (las zonas en verde implican mayor temperatura que las celestes), mientras que en las cercanías de la pared fría (en azul) el aire desciende y va cediendo su temperatura. De esta forma, se produce un movimiento del aire por el fenómeno físico de convección natural, mediante el cual el aire transmite energía

térmica no solamente por conducción, sino también por efecto convectivo.



**Figura 5.** Vista lateral de un módulo mostrando la circulación del aire. Izquierda: vectores de velocidad. Derecha: líneas de corriente.

Al cuantificar el calor transmitido para este esquema, surge que el mismo es  $51 \text{ W/m}^2$ , es decir, que la reducción de la energía térmica que ingresaría desde el exterior es del 75 % respecto a los valores del inciso 3.1.

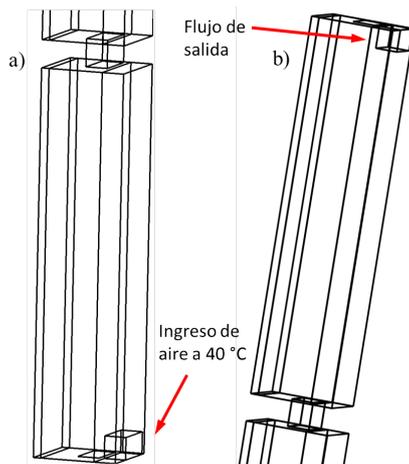
Ante este resultado puede cuestionarse si es razonable la reducción obtenida. Para poder responder esta incógnita, puede suponerse el caso de que el aire atrapado en la cámara estuviera estancado sin efectuar los movimientos de recirculación, en cuyo caso la energía transferida al interior sería de  $2,3 \text{ W/m}^2$  (cálculo que también puede realizarse con la ley de Fourier), implicando una reducción del 99 %. Estos valores concuerdan con el hecho de que el aire es un mal conductor del calor, teniendo un coeficiente de transmisión térmica de  $0,025 \text{ (W/mK)}$  en comparación, por ejemplo, con el concreto cuyo coeficiente es de  $1,5 \text{ (W/mK)}$ , 60 veces superior que el del aire. El hecho de que la reducción sea del 75 % y no del 99 % es porque el movimiento del aire transfiere calor adicional por convección.

Cabe aclarar que al carecer de conexión con el exterior, pudo constatarse que el aire recircula dentro de un módulo y, por lo tanto, no hay flujo a través de los orificios de circulación, no existiendo transferencia de energía entre los módulos. Esto deriva en que el flujo de energía térmica hacia el interior es idéntico en cada módulo. Claro está que esta es una situación idealizada en la cual todos los pisos están a una misma temperatura interna y en consecuencia no existen diferencias de temperaturas que pudieran ocasionar un movimiento convectivo entre los pisos.

Este resultado indica que la sola existencia de la cámara de aire podrá impactar en un ahorro significativo de energía para mantener un ambiente interno agradable.

### 3.3. Cavity con conexión con el exterior y flujo natural

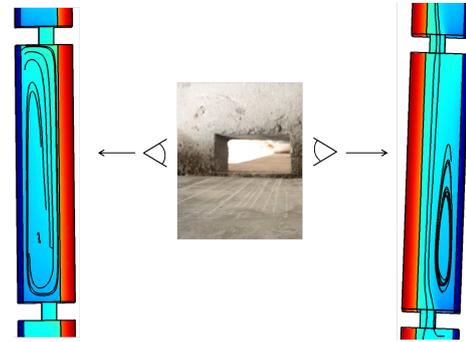
Para simular la conexión de las cámaras con el exterior, se suponen orificios de dimensiones similares que los orificios de circulación en las paredes externas de los módulos del primer y último piso. Esto es, orificios de sección de 20 cm por 40 cm y el espesor de la pared exterior (20 cm). Para el primer piso, se diseñó el orificio en la parte lateral inferior del primer módulo, como muestra la Figura 6-a, mientras que para módulo 8 el orificio se realizó en la parte lateral superior, como muestra la Figura 6-b.



**Figura 6.** a) Orificio que conecta el módulo inferior con el exterior. b) Orificio que conecta el módulo superior con el exterior.

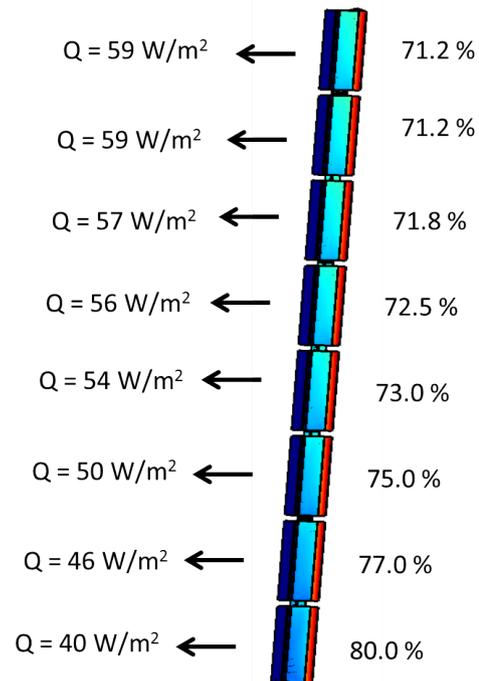
Para realizar la simulación, se consideraron las mismas condiciones que para el caso 3.2, pero como en este caso puede haber ingreso de aire desde el exterior, se supone que el mismo se encuentra a una temperatura elevada de verano de 40 °C. Las condiciones de entrada y salida en el primer y último módulo respectivamente, se indican en la Figura 6, mientras que para los restantes módulos se mantienen las temperaturas externa e interna.

La presencia de las conexiones con el exterior hace posible un flujo que recorra todos los pisos desde el primer módulo hasta el último. En efecto, los resultados indican la existencia de este flujo, como se ve en la Figura 7. Allí puede verse, en una vista lateral del lado más alejado del orificio de circulación, que el aire mantiene cierta recirculación conduciendo a efectos similares al caso 3.2, pero la vista lateral cercana al orificio muestra la existencia de un flujo que atraviesa la cavidad desde el módulo inferior hasta el superior. Esta circulación permitiría ventilar la cavidad para evitar el posible estancamiento de humedad y la generación de malos olores.



**Figura 7.** Esquemas de circulación por convección natural en las cavidades.

En cuanto al ahorro energético, la existencia de una circulación entre los módulos modifica la *performance* individual de cada uno. Los módulos inferiores están beneficiados ya que el flujo de aire desde el exterior absorbe cierta cantidad de energía térmica de la pared más caliente y la transporta por convección hacia un módulo superior, de forma tal que los módulos, cuanto más arriba se ubiquen, reciben mayor cantidad de energía que el aire fue absorbiendo desde los módulos inferiores.



**Figura 8.** Desempeño térmico de los 8 módulos. Los porcentajes indican la reducción en la transferencia de calor de cada piso respecto de la situación sin cámara de aire.

En la Figura 8 se presentan las transferencias de energía térmica y los porcentajes de reducción para cada módulo respecto al caso 3.1. Puede observarse que los primeros tres módulos tienen un desempeño térmico igual o superior que en el caso 3.2, pero luego,

el ahorro disminuye. Globalmente, el promedio de reducción entre los 8 módulos es del 74 %, muy similar al caso anterior. Además, estos resultados pueden ser de utilidad en el momento de diagramar la ocupación de cada piso.

#### 4. Simulaciones para condiciones de invierno

La presencia de la cavidad muestra, según los resultados numéricos de este estudio, un muy buen desempeño térmico en condiciones de verano, pero resta aún conocer su comportamiento en condiciones representativas de un día de invierno. Para este objetivo, se modificaron las temperaturas de la pared externa y del aire que, en el caso de la cavidad con conexión al exterior, entraría desde el exterior. Debe mencionarse que para las condiciones de invierno, la energía fluye hacia el exterior, ya que la situación se invierte respecto al verano. Además, se mantiene la geometría patrón que surge de sustraer la cavidad para tener una referencia de comparación. Las condiciones de contorno son las siguientes:

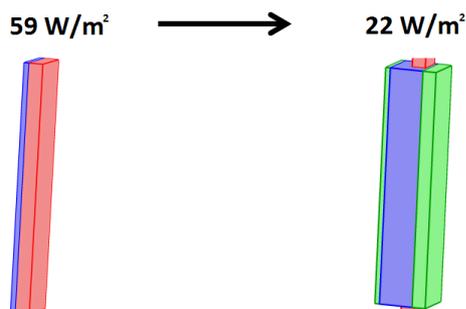
Temperatura de la pared interna: 24 °C.

Temperatura de la pared externa: 10 °C.

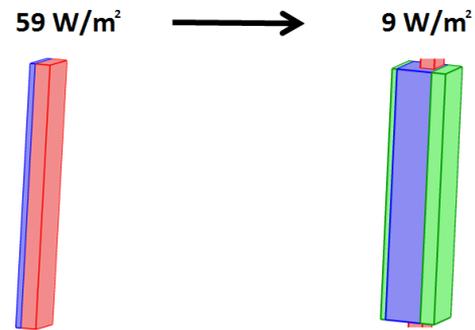
Temperatura del aire ambiental: 10 °C.

Esta condición implicaría una pobre incidencia del sol sobre la pared externa y por ello la misma se mantiene a la misma temperatura que el aire exterior.

Para la cavidad con conexión al exterior y flujo natural, los resultados esquematizados en la Figura 9, muestran que la reducción en las pérdidas de energía desde el interior hacia la atmósfera es del 63 %. Si bien es un valor aceptable, la circulación de aire a menor temperatura en contacto con la pared interior implica una absorción de energía térmica desde el interior. Ante este hecho físico, se analizó el caso de cavidad cerrada, cuyos resultados se esquematizan en la Figura 10. El ahorro obtenido para este segundo caso es del 85 %, significativamente superior al anterior. Es por lo tanto recomendable que ante condiciones de invierno, no exista circulación entre las cavidades y el exterior.



**Figura 9.** Comparación entre ausencia de cavidad y cavidad con ventilación natural.



**Figura 10.** Comparación entre ausencia de cavidad y cavidad cerrada.

#### 5. Conclusiones

Se ha realizado el estudio numérico del desempeño térmico de una cavidad interpuesta en la doble fachada diseñada para el edificio de altura de la mutual Jerárquicos Salud de la ciudad de Santa Fe de la Vera Cruz, Argentina. El análisis se realizó en base a simulaciones computacionales de distintas condiciones climáticas y se consideraron dos alternativas de diseño de acuerdo con el esquema proporcionado: cavidad cerrada y con conexión con el exterior.

Los resultados muestran que, para las condiciones de verano, el diseño de la cavidad implica una importante reducción en la energía térmica que ingresaría al edificio. Tanto la cavidad cerrada como la conectada con el exterior, son alternativas válidas que mostraron aptitudes térmicas para la reducción de la energía transferida, estimando en verano una reducción que rondaría el 75 % respecto a un diseño sin la cavidad. No obstante, el caso de la cavidad conectada al exterior, debido a la ventilación natural, sería el seleccionado debido a que cuenta con la posibilidad de renovar el aire atrapado en las cavidades, reduciendo la posibilidad de acumular humedad y malos olores.

No obstante, las prometedoras predicciones de la cavidad con ventilación natural para el verano, los resultados han mostrado que su desempeño térmico en invierno es inferior al caso de la cavidad cerrada. Para el caso de ventilación natural, en invierno se ha estimado una reducción en la energía térmica perdida hacia el exterior del 63 %, mientras que para el diseño de cavidad cerrada, esta reducción sería del 85 %.

La conclusión final de este estudio basado en predicciones computacionales, es que se sugiere realizar los orificios de circulación con un sistema de control del flujo de aire, que permita mantener abiertos los orificios durante los días de temperaturas más elevadas y cerrarlos durante los períodos de temperaturas más bajas. Futuros trabajos con modelos predictivos más exactos cerca de las paredes permitirán ajustar más precisamente las predicciones de este estudio en cuanto a los valores calculados, mientras que estos resultados

pueden utilizarse conceptualmente ya que se estima que la precisión de los cálculos de transferencia de calor no modificarán las tendencias mostradas en este trabajo.

Finalmente, se destaca que de acuerdo con todos los estudios numéricos realizados, la sola presencia de la cámara de aire muestra una notable mejora del desempeño térmico en cuanto a las transferencias de energía entre la atmósfera y el interior del edificio, siendo la sugerencia del párrafo anterior la que ha mostrado las situaciones de mejor rendimiento.

## Referencias

- [1] J. Hirunlabh, S. Wachirapuwadon, N. Pratinthong, and J. Khedari, “New configurations of a roof solar collector maximizing natural ventilation,” *Building and Environment*, vol. 36, no. 3, pp. 383–391, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(00\)00016-0](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(00)00016-0).
- [2] M. Ciampi, F. Leccese, and G. Tuoni, “Energy analysis of ventilated and microventilated roofs,” *Solar Energy*, vol. 79, no. 2, pp. 183–192, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.08.014>.
- [3] H. Asan and L. Namli, “Laminar natural convection in a pitched roof of triangular cross-section: summer day boundary conditions,” *Energy and Buildings*, vol. 33, no. 1, pp. 69–73, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00066-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00066-9).
- [4] H. F. Oztop, Y. Varol, and A. Koca, “Laminar natural convection heat transfer in a shed roof with or without eave for summer season,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 27, no. 13, pp. 2252–2265, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.01.018>.
- [5] A. Brondino, M. E. Berli, and J. Di Paolo, “Aislación térmica producida por cavidades de aire. análisis de un techo con geometría simplificada y flujo turbulento,” in *V Congreso Argentino de Ingeniería Química, Santiago del Estero, Argentina.*, 2016. [Online]. Available: <https://goo.gl/2bVmLv>
- [6] C. Ghiaus, F. Allard, M. Santamouris, C. Georgakis, and F. Nicol, “Urban environment influence on natural ventilation potential,” *Building and Environment*, vol. 41, no. 4, pp. 395–406, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.02.003>.
- [7] S. Wang, Z. Shen, and L. Gu, “Numerical simulation of buoyancy-driven turbulent ventilation in attic space under winter conditions,” *Energy and Buildings*, vol. 47, pp. 360–368, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.12.012>.
- [8] M. E. Berli, J. Di Paolo, and F. A. Saita, “Mecánica de fluidos computacional aplicada al diseño térmico pasivo de techos,” in *I Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica, Bahía Blanca, Argentina*, 2008.
- [9] —, “Heat transfer on a naturally cross-driven ventilated triangular cavity with openings,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 166, no. 1, pp. 1–10, 2009. DOI: <http://doi.org/10.1088/1742-6596/166/1/012019>. [Online]. Available: <http://stacks.iop.org/1742-6596/166/i=1/a=012019>
- [10] A. Bejan, *Convection Heat Transfer, Fourth Edition*, I. John Wiley & Sons, Ed., 2013. DOI: <http://doi.org/10.1002/9781118671627>.



# DETECCIÓN DE PEATONES EN LA NOCHE USANDO FASTER R-CNN E IMÁGENES INFRARROJAS

## PEDESTRIAN DETECTION AT NIGHT BY USING FASTER R-CNN Y INFRARED IMAGES

Michelle Galarza Bravo<sup>1,\*</sup>, Marco Flores Calero<sup>2</sup>

### Resumen

En este artículo se presenta un sistema de detección de peatones en la noche, para aplicaciones en seguridad vehicular. Para este desarrollo se ha analizado el desempeño del algoritmo Faster R-CNN con imágenes en el infrarrojo lejano. Por lo que se constató que presenta inconvenientes a la hora de detectar peatones a larga distancia. En consecuencia, se presenta una nueva arquitectura Faster R-CNN dedicada a la detección en múltiples escalas, mediante dos generadores de regiones de interés (ROI) dedicados a peatones a corta y larga distancia, denominados RPNCD y RPNLD, respectivamente. Esta arquitectura ha sido comparada con los modelos para Faster R-CNN que han presentado los mejores resultados, como son VGG-16 y Resnet 101. Los resultados experimentales se han desarrollado sobre las bases de datos CVC-09 y LSIFIR, los cuales demostraron mejoras, especialmente en la detección de peatones a larga distancia, presentando una tasa de error versus FPPI de 16 % y sobre la curva Precisión *vs.* Recall un AP de 89,85 % para la clase peatón y un mAP de 90 % sobre el conjunto de pruebas de las bases de datos LSIFIR y CVC-09.

**Palabras clave:** peatón, infrarrojo, Faster R-CNN, RPN, múltiples escalas, noche.

### Abstract

This paper presents a system for pedestrian detection at nighttime conditions for vehicular safety applications. For this purpose, it analyzes the performance of the Faster R-CNN algorithm for infrared images. The research reveals that Faster R-CNN has problems to detect small scale pedestrians. For this reason, it introduces a new Faster R-CNN architecture focused on multi-scale detection, through two ROI's generators for large size and small size pedestrians, RPNCD and RPNLD respectively. This architecture has been compared with the best Faster R-CNN baseline models, VGG-16 and Resnet 101, which present the best results. The experimental results have been development on CVC-09 and LSIFIR databases, which show improvements specially when detecting pedestrians that are far away, over the DET curve presents the miss rate versus FPPI of 16 and over the Precision vs Recall the AP of 89.85 for pedestrian class and the mAP of 90 over LSIFIR and CVC-09 test sets.

**Keywords:** pedestrian, infrared, Faster R-CNN, RPN, multi-scale, nighttime.

<sup>1,\*</sup>Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sangolquí – Ecuador. Autor para correspondencia ✉: [magalarza@espe.edu.ec](mailto:magalarza@espe.edu.ec), <https://orcid.org/0000-0001-8401-1871>

<sup>2</sup>Departamento de Eléctrica y Electrónica, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí – Ecuador. <https://orcid.org/0000-0001-7507-3325>

Recibido: 02-05-2018, aprobado tras revisión: 18-06-2018

Forma sugerida de citación: Galarza Bravo, M. y Flores Calero, M. (2018). «Detección de peatones en la noche usando Faster R-CNN e imágenes infrarrojas». INGENIUS. N.º 20, (julio-diciembre). pp. 48-57. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n20.2018.05>.

## 1. Introducción

Los sistemas de detección de peatones (SDP) son uno de los componentes tecnológicos más importantes que han surgido en los últimos años con el desarrollo de robótica móvil aplicada al sector automotriz y otras tecnologías similares destinadas a la seguridad vehicular [1], las cuales necesitan operar con altos estándares de calidad y tener una alta eficacia y precisión, debido a que su objetivo es proteger la vida humana a través de evitar que suceda un atropellamiento [2].

Varios informes, a nivel mundial, indican que los accidentes de tránsito generan altos costos materiales y humanos [3], donde los peatones tienen un alto porcentaje de accidentabilidad, llegando hasta el 22 % [4]. En el caso de Ecuador, los atropellamientos representan más del 10 % de las defunciones por accidentes de tránsito [5]. Por lo tanto, la detección de peatones es un tema de investigación activo y desafiante debido a la complejidad de la escena vial, la cual cambia constantemente debido a varios factores, por ejemplo, las condiciones atmosféricas contribuyen a una baja visibilidad y a un cambio permanente de la iluminación, las oclusiones generan información incompleta de la forma humana, la distancia perjudica la calidad de la información visual [1, 6, 7]. En la noche estos percances se magnifican debido a los ambientes de oscuridad [1, 2, 8, 9].

Por otra parte, debido al reciente éxito que han presentado las técnicas de aprendizaje profundo (*Deep Learning*) [10, 11], el principal objetivo de este trabajo es poner en marcha un método para la detección de peatones en la noche usando información visual en el infrarrojo lejano y las redes neuronales convolucionales, específicamente las arquitecturas del tipo Faster R-CNN [9, 11–15] para obtener un sistema competitivo que genere resultados de vanguardia comparables a los existentes en los trabajos previos. Por lo tanto, se presenta una nueva arquitectura Faster R-CNN a múltiples escalas, la cual es evaluada bajo los conjuntos de prueba de las bases de datos CVC-09 [16] y LSIFIR [17]. Los resultados evidencian mejoras especialmente al detectar peatones que se encuentran en la lejanía.

El documento está organizado de la siguiente manera. A partir de la segunda sección se presentan los métodos y materiales usados, donde se detallan los trabajos previos realizados en el campo de los SDP en especial técnicas de aprendizaje profundo. Adicionalmente, se describe el diseño propuesto de la nueva arquitectura Faster R-CNN para la generación de regiones de interés, la clasificación y la detección de peatones durante la noche, seguido de la evaluación experimental para distintas configuraciones del modelo propuesto. Posteriormente en la sección de resultados y discusión se exhiben los valores obtenidos respecto a la calidad de detección sobre las bases de datos destinadas al desarrollo de SDP en la noche. Finalmente,

la última sección está dedicada a las conclusiones, recomendaciones y los trabajos futuros que se pueden efectuar para mejorar esta propuesta.

## 2. Métodos y materiales

### 2.1. Trabajos previos

Actualmente, existen múltiples investigaciones especializadas en la detección de peatones en la noche [1, 2, 7–9, 15, 18–30]. Para llevar a cabo este proceso, generalmente, se divide el trabajo en dos partes, la primera consiste en la generación de ROI; y la segunda en la clasificación de las mismas, en peatones o el fondo, de esta manera, se logra mantener localizada a la persona mientras permanece en la escena.

#### 2.1.1. Generación de ROI sobre imágenes en el infrarrojo lejano

Para la generación de ROI sobre imágenes en el infrarrojo existen varios métodos, los más populares son: ventanas deslizantes (*Sliding window*) [18] que buscan exhaustivamente sobre toda la imagen en varias escalas, lo que hace que el método demande muchos recursos computacionales y no ser efectivo para aplicaciones en tiempo real. Para subsanar estos inconvenientes se han creado nuevas propuestas, por ejemplo, segmentación por movimiento, propuesto por Chen *et al.* [19] donde utilizando PCA y técnicas Fuzzy identifican regiones de interés local. Kim y Lee [21] han desarrollado un método que combina segmentos de imagen en lugar de umbrales y las bajas frecuencias de las imágenes en el infrarrojo lejano. Ge *et al.* [22] han propuesto un método de segmentación adaptativo compuesto de dos umbrales, uno especializado para localizar zonas brillantes y otro para zonas de poco contraste. Chun *et al.* [31] aplica detección de bordes para obtener un generador de ROI más rápido.

En la actualidad existen métodos más sofisticados que usan modelos de redes neuronales convolucionales, y sus variantes, para la generación de nuevas propuestas [1, 9, 12, 18]. Así, la detección de puntos de calor en resolución multiespectral usando IFCNN (*Illumination Fully Connected Neural Network*) ha sido propuesta por Guan *et al.* [8]. Vijay *et al.* [20] añaden una red neuronal convolucional al trabajo de Chen *et al.* [19], para la clasificación. Kim *et al.* [23] han usado cámaras en el espectro visible para detectar peatones en la noche usando CNN. Otras alternativas la red de propuestas de región (Region Proposal Network o RPN), inicialmente se centró en localizar las ROI mediante una combinación de búsqueda exhaustiva y ventanas deslizantes, en tres orientaciones y tres escalas (9 cajas de referencia) por cada ventana deslizante. Cada propuesta inicial sirve para el entrenamiento de una red completamente convolucional para generar las

predicciones del cuadro delimitador y los puntajes de probabilidad [12].

### 2.1.2. Clasificación de peatones sobre imágenes en el infrarrojo lejano

Los métodos desarrollados para la clasificación se pueden agrupar en dos categorías: los modelos basados en la generación manual de características [24, 25, 32], y los modelos de aprendizaje automático de características usando técnicas de aprendizaje profundo (DL, *Deep Learning*) [8, 11, 33–38].

En el primer caso se usan distintos métodos manuales de generación de características junto con un algoritmo de clasificación, algunos ejemplos son: HOG + SVM [26, 27], HOG + Adaboost [28], HOG + LUV [39], Haar + Adaboost [29], Haar + HOG y SVM [30]. En la segunda categoría están las redes neuronales convolucionales (CNN) [2, 8, 11, 34, 38], con sus distintas arquitecturas, como son R-CNN [40], Fast R-CNN [41] y Faster R-CNN [12, 15].

La arquitectura Fast R-CNN [12, 15] esencialmente disminuye la carga computacional, respecto a CNN, y por esta razón disminuye el tiempo de detección que presenta la capa R-CNN [41]. En consecuencia, Fast R-CNN junto con búsqueda selectiva, presenta una mejor calidad de detección. Sin embargo, ambos métodos necesitan de un generador de ROI externo y tienen problemas al momento de detectar objetos pequeños que, en el contexto de los peatones, implica largas distancias [41, 42].

Para remediar estos inconvenientes se ha llegado a Faster R-CNN [12, 15] que añade un generador de ROI basado en capas completamente conectadas RPN el cual comparte con Fast R-CNN [15], los mapas de características generados por la red convolucional. Por ende, se puede implantar redes muy profundas debido a que la imagen total pasa una sola vez por la etapa CNN [15].

Por lo tanto, Faster R-CNN está siendo utilizada ampliamente para construir SDP [1, 9, 42]. Por ejemplo, en [1] se ha empleado Faster R-CNN para detección de peatones en múltiples espectros, inicialmente se ha entrenado Faster R-CNN únicamente con imágenes a color e infrarrojas, Faster RCNN-C y Faster RCNN-T respectivamente, utilizando para el entrenamiento un nuevo modelo de red neuronal. Posteriormente se han combinado características en diferentes etapas creando así los modelos Early Fusion, Halfway Fusion, Late Fusion y Score Fusion. Adicionalmente, Wang *et al.* [9], tomando como referencia a Liang *et al.* [41], combina RPN + BDT para construir un sistema de detección de peatones en múltiples espectros. Sin embargo, se considera que Faster RCNN no funciona muy bien para

la detección de peatones, debido a que los mapas de características no presentan la información suficiente para peatones a larga distancia. Por esta razón, Feris *et al.* [43] han propuesto una subred para la generación de ROI en múltiples escalas junto con una subred para la clasificación basada en Fast R-CNN.

## 2.2. Sistema de detección de peatones en la noche

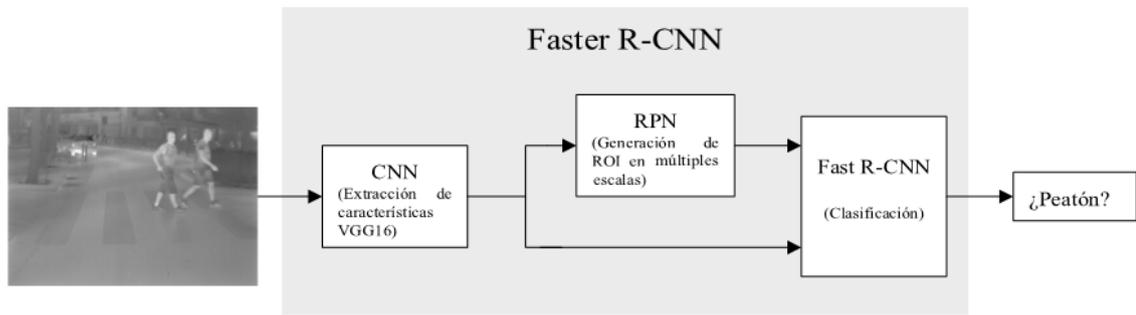
La Figura 1 muestra el esquema propuesto para el desarrollo del SDP en la noche, usando imágenes tomadas con iluminación infrarroja y como arquitectura base Faster R-CNN junto con el modelo VGG16 [44] donde se han desarrollado algunos cambios detallados a continuación.

### 2.2.1. Generación de ROI sobre imágenes en el infrarrojo lejano

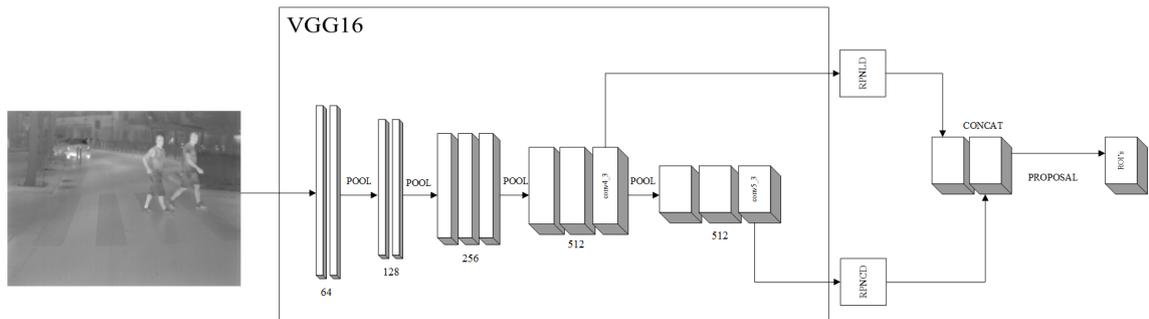
Debido a que la arquitectura original de Faster RCNN [12, 15] presenta problemas de detección en el caso de peatones que se encuentran en la lejanía, se considera la arquitectura desarrollada en Feris *et al.* [43]. Por lo tanto, se ha decidido colocar dos redes de propuestas de región (RPN) independientes, que presentan diferentes características, las mismas que están detalladas en la Tabla 2. En ambos casos, con un enfoque dirigido a peatones a corta (RPNCD) y larga distancia (RPNLD). Como se muestra en la Figura 2, RPNLD es alimentado por las características que son proporcionadas por la capa conv4\_3 de VGG16 [44], debido a que las redes de agrupación pueden discriminar peatones que se encuentren en la lejanía, donde los mapas de características más abundantes son beneficiosos para detectar peatones a largas distancias [6]. En cuanto a RPNCD al igual que la arquitectura original de Faster R-CNN [12] es alimentado por las características entregadas por la capa conv5\_3, ya que extrae las características más representativas presentes en la imagen, por esta razón proporciona excelentes resultados para peatones a corta distancia.

### 2.2.2. Clasificación de ROI sobre imágenes en el infrarrojo lejano

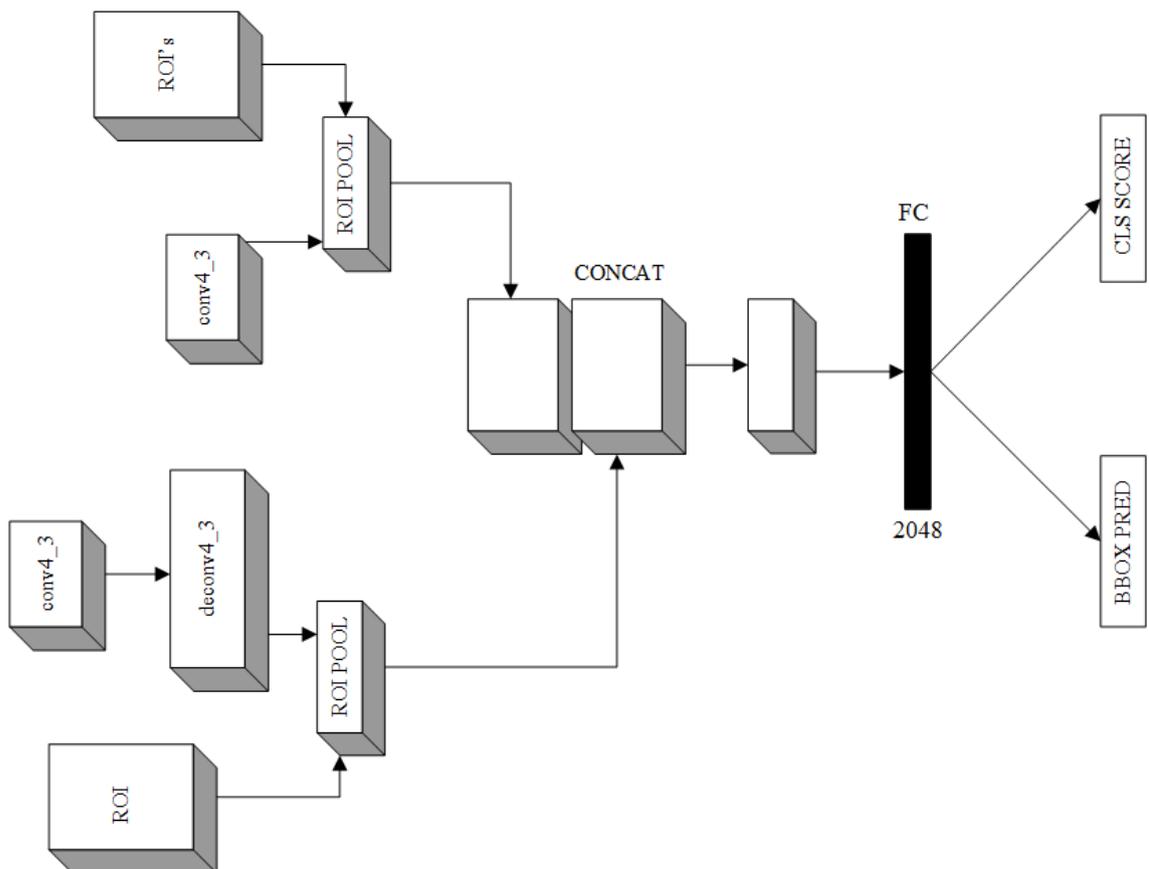
Para la etapa de clasificación se propone la arquitectura que se presenta en la Figura 3. Como en [43] se considera aumentar la resolución de los mapas de características aplicando deconvolución, para proveer mejor información a la capa de agrupamiento ROI. Por lo tanto, la parte de Fast R-CNN recibe como entrada directamente las características extraídas por la capa conv4\_3 de VGG16 [44], su deconvolución y las ROI generadas por RPNCD y RPNLD, en conjunto.



**Figura 1.** Esquema del sistema de detección de peatones en la noche usando Faster R-CNN e imágenes en el infrarrojo lejano.



**Figura 2.** Arquitectura RPN multiscale basada en la red VGG16 [44]. Esta es la subred encargada de la etapa de generación de ROI.



**Figura 3.** Arquitectura de clasificación MS-CNN [30]. Esta subred está destinada para la etapa de clasificación.

### 2.2.3. Detalles técnicos de la implementación

El aprendizaje de la arquitectura propuesta se ha desarrollado a partir de las bases de datos CVC-09 [16] y LSIFIR [17] que se detallan a continuación:

1. La base de datos CVC-09 [16]: Es una de las bases más utilizadas para la detección de peatones en la noche. En este caso se la usó para el entrenamiento y prueba de la propuesta, y posteriormente para su validación. En la Tabla 1 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 1.** Contenido de la base de datos CVC-09 en la noche

	Positivos	Negativos
Entrenamiento	2200	1002
Prueba	2283	–

Sin embargo, para el caso de largas distancias la base de datos presenta inconsistencias que han sido corregidas. Así, se ha reetiquetado un conjunto de imágenes para corregir estos inconvenientes y depurar los errores de etiquetado.

1. La base de datos LSI *Far Infrared Pedestrian Dataset* (LSIFIR) [16]: Es otra base de datos importante destinada al desarrollo de algoritmos de detección de peatones en la noche. En la Tabla 2 se describen los conjuntos de entrenamiento y de prueba, con sus respectivos tamaños. En este caso al igual que CVC-09 se la usó para el entrenamiento, validación y prueba de la propuesta.

**Tabla 2.** Contenido de la base de datos LSIFIR. El valor entre paréntesis representa el número de fotogramas que contienen peatones

	Clasificación	Detección
Entrenamiento	43391 (10209)	2936 (3225)
Prueba	2205 (5945)	5788 (3279)

Para el aprendizaje de la red, el algoritmo inicialmente reescala la parte más corta de la imagen de entrada a 600 píxeles. En cuanto al entrenamiento de la red, se lo realiza mediante la metodología de entrenamiento conjunto aproximado planteada por Ren *et al.* [12], además, los pesos de cada capa perteneciente a la red son inicializados por medio del modelo pre-entrenado VGG16, para luego ser sintonizado mediante *Minibatch Stochastic Gradient Descent* [45] y el reciente algoritmo de optimización Adam [46] con hiperparámetros detallados en la Tabla 3.

En cuanto a las RPN, estas trabajan de manera independiente. Por lo tanto, su entrenamiento también lo es. Las propuestas generadas por cada una de ellas son combinadas para luego ser etiquetadas mediante el algoritmo de NMS (*Non Maximum Supression*), donde si el índice IoU (*Intersection over union*), dada por Ecuación (1), es mayor que 0,6 es un peatón, si es menor que 0,3 es etiquetado como no peatón, y en caso de no cumplir con ninguna de las dos condiciones, dichas propuestas son excluidas del entrenamiento.

Inmediatamente, en la etapa de clasificación se vuelve a aplicar NMS para reducir redundancias en la detección, aplicando un umbral de 0,6, donde cada detección mayor al umbral se etiqueta como peatón caso contrario no peatón.

$$IoU = \frac{Area(B_{det} \cap B_{gt})}{Area(B_{det} \cup B_{gt})} \quad (1)$$

Donde  $B_{gt}$  es la intersección y  $B_{det}$  la unión, entre el cuadro delimitador real anotado en la base de datos CVC-09 [16] o LSIFIR [17] y el resultado del cuadro delimitador predicho por nuestro modelo.

**Tabla 3.** Parámetros de entrenamiento para el modelo propuesto para la detección de peatones en la noche

Parámetro	Valor
Tasa de aprendizaje	0,001
Momentum	0,9
RMSProp	0,999
Decaimiento de peso	0,0005
Epsilon	$10^{-8}$
Imágenes por batch	2

### 2.2.4. Evaluación experimental

Para llegar al modelo propuesto, se han desarrollado múltiples experimentos, como se puede observar en las Tablas 4 y 5. Donde se analiza la subred de generación de ROI y los efectos que provoca la configuración de las distintas escalas y las relaciones de aspecto de RPNCd y RPNLD.

Para los experimentos se ha hecho uso de los conjuntos de entrenamiento de CVC-09 junto con LSIFIR para la etapa de aprendizaje de la red y los conjuntos de prueba para la evaluación.

Adicionalmente, se analizó la subred de clasificación y los efectos que provoca la deconvolución. En la Tabla 5, los resultados demuestran que al aplicar esta estrategia permite aumentar la resolución de los mapas de características, lo cual provoca un incremento del mAP en un 6 % aproximadamente.

**Tabla 4.** Parámetros de configuración de cajas de referencia RPN para peatones a corta y larga distancia. Resultados de la subred de generación de ROI

Parámetro	RPNCD	RPNLD	mAP (%)	fps
Escala	64, 128, 256	128, 256, 512	86	10
R. Aspecto	1:8, 1:4, 1:2	1:1, 1:2, 2:1		
Escala	64, 128, 256	64, 128, 256	85,6	10
R. Aspecto	1:8, 1:4, 1:2	1:1, 1:2, 2:1		
Escala	32, 64, 128	128, 256, 512	84,5	10
R. Aspecto	1:8, 1:4, 1:2	1:1, 1:2, 2:1		

**Tabla 5.** Resultados obtenidos al aplicar deconvolución a la subred de clasificación

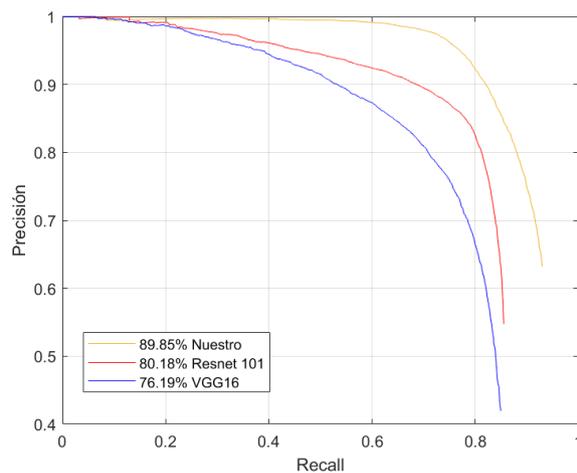
Parámetro	RPNCD	RPNLD	mAP (%)	fps
Escala	64, 128, 256	128, 256, 512	89,9	5
R. Aspecto	1:8, 1:4, 1:2	1:1, 1:2, 2:1		
Escala	64, 128, 256	64, 128, 256	87,8	5
R. Aspecto	1:8, 1:4, 1:2	1:1, 1:2, 2:1		
Escala	32, 64, 128	128, 256, 512	86,8	5
R. Aspecto	1:8, 1:4, 1:2	1:1, 1:2, 2:1		

### 3. Resultados y discusión

En cuanto a la evaluación de la efectividad de la propuesta se utilizaron dos de las bases de datos que representan el punto de referencia, destinadas al desarrollo de sistemas de detección de peatones durante la noche utilizando iluminación infrarroja.

#### 3.1. Protocolo de evaluación

Para evaluar el sistema propuesto se propone la métrica precisión media promedio (mAP que es el *Mean Average Precision*) la cual permite medir la precisión del detector, de manera que se calcula la precisión promedio de cada detección para diferentes valores del índice recall [12].



**Figura 4.** Curva Precisión vs. Recall de los resultados obtenidos para distintas arquitecturas de red Faster R-CNN para la clase peatón, sobre la combinación de los conjuntos de prueba de las bases de datos CVC-09 y LSIFIR.

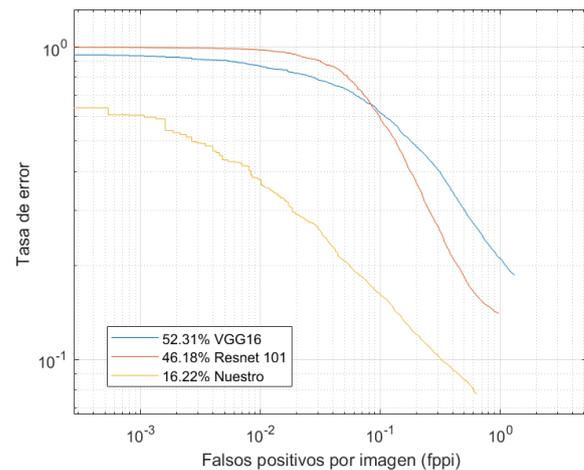
Adicionalmente, se seguirá el protocolo estándar planteado por Dollár *et al.* [47], es decir, se usarán las curvas que relacionan la tasa de error promedio (miss rate) versus los falsos positivos por imagen (FPPI); en el rango de  $10^{-2}$  a  $10^0$  FPPI, que es un indicador de la exactitud especializado en temas vehiculares para la detección de peatones.

#### 3.2. Discusión de los resultados

En la Figura 4 se presentan los experimentos llevados a cabo sobre los conjuntos de prueba de las bases de datos CVC-09 [16] y LSIFIR [17] para distintas arquitecturas de red Faster R-CNN se presentan en la Tabla 6. Los resultados han sido obtenidos bajo las mismas condiciones computacionales, donde se puede observar que esta nueva propuesta alcanza un mAP de 94,6 %, en la etapa de validación, lo que demuestra que el aprendizaje es superior a las otras propuestas. Pero tiene el inconveniente de requerir un mayor esfuerzo computacional.

**Tabla 6.** Resultados de las pruebas y validación de la base de datos CVC-09. Precisión media promedio (mAP) y procesamiento de imágenes por segundo (fps)

	Validación	Prueba	
Modelo	mAP (%)	mAP (%)	fps
VGG16	83,4	76,4	14
Resnet 101	86,1	80,2	8
Nuestro	94,6	89,9	5



**Figura 5.** Curvas de las tasas de error promedio versus FPPI para las distintas arquitecturas de red Faster R-CNN sobre la combinación de los conjuntos de prueba de las bases de datos CVC-09 y LSIFIR.

Así se puede observar en la Figura 5 que se ha superado los resultados de los modelos originales de Faster R-CNN y otros modelos presentados por otras investigaciones, como se detalla en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Comparación tasas de error promedio de sistemas de detección de peatones en la noche bajo las bases de datos CVC-09 y LSIFIR

Modelo	Tasa de error (%) en $10^{-2}$
Latent-SVM HOPE [1]	25,1
Fuzzy C-means CNN [20]	65,4
Nuestro	16,22

### 3.3. Tiempo de procesamiento

Para la evaluación experimental se usó un equipo compuesto por una GPU con el sistema operativo Linux



**Figura 6.** Ejemplos seleccionados con los resultados obtenidos sobre la combinación de los conjuntos de prueba de las bases de datos LSIFIR y CVC-09, durante la noche.

- Desarrollar una nueva arquitectura DL basada en Faster R-CNN junto con el modelo VGG16 para la detección de peatones en la noche usando imágenes en el infrarrojo lejano. La red RPN de múltiples escalas presentó una mejor detección específicamente para peatones a larga distancia como se puede observar en la Figura 6. En comparación con la arquitectura original de RPN, la arquitectura de RPNCD y RPNLD produjo mejores resultados, la nueva arquitectura incrementó el mAP del 76,4 al 86 %. Adicionalmente, se presentó un aporte significativo al aplicar la deconvolución a la subred de clasificación donde, el mAP incrementó del 86 al 89,9 %. Sin embargo, la deconvolución añadida en la etapa de clasificación incrementa la carga computacional. En consecuencia, la red reduce el procesamiento de 10 fotogramas a 5 fotogramas por segundo.
- Comparar el desempeño de la arquitectura original de Faster R-CNN junto con los modelos VGG16 y Resnet 101, sobre las bases de datos CVC-09 y LSIFIR, obteniéndose resultados superiores en mAP 9,7 % para Resnet 101 y 13,5 % para VGG16. En cuanto a la tasa de error promedio, se obtuvo una diferencia de 29,96 % para Resnet 101 y 36,09 % para VGG16.
- Respecto a la detección, el modelo propuesto demuestra un rendimiento superior respecto a los métodos Olmeda *et al.* [44] y John *et al.* [14], donde la tasa de error promedio es reducida en un 8,88 % respecto a [44] y 49,18 % respecto a [14].
- El tiempo de procesamiento es de 5 fotogramas por segundo, lo que convierte a esta propuesta en un método viable para aplicaciones en tiempo real, destinado a seguridad vehicular.

### 4.2. Recomendaciones y trabajos futuros

Para mejorar el desempeño de este sistema es necesario incluir las siguientes recomendaciones:

- Optimizar el algoritmo propuesto para que trabaje en tiempo real, es decir, sea capaz de procesar al menos 25 fotogramas por segundo.
- Incluir un conjunto de características basadas en múltiples espectros para un mejor rendimiento durante el día y la noche.

16.04, una tarjeta Nvidia Geforce GTX 1080 Ti, con 11 GB GDDR5X 352 bit de memoria. El tiempo de entrenamiento fue de 5 horas aproximadamente. El tiempo promedio de detección es de 170 milisegundos, sobre imágenes de  $640 \times 480$  píxeles; es decir, el sistema procesa 5 imágenes por segundo.

## 4. Conclusiones y recomendaciones

### 4.1. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado un método de detección de peatones en la noche usando modernas técnicas de inteligencia artificial, donde se realizaron los siguientes aportes:

## Agradecimientos

Los autores desean expresar sus agradecimientos a los investigadores que han hecho posible las bases de datos de peatones en el infrarrojo, ya que sin esta información habría sido muy difícil desarrollar esta investigación. Además, los autores desean reconocer a los revisores anónimos que contribuyen con su trabajo en la mejora de la redacción de este documento.

## Referencias

- [1] 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)*, July 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/CVPRW.2017.36>, pp. 243–250.
- [2] 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: <https://goo.gl/Rss9Qp>
- [3] WHO. (2004) World report on road traffic injury prevention. World Health Organization. [Online]. Available: <https://goo.gl/PBhixd>
- [4] ANT. (2017) Siniestros octubre 2016. Agencia Nacional de Tránsito. Ecuador. [Online]. Available: <https://goo.gl/GoXFX5>
- [5] —. (2016) Siniestros agosto 2017. Agencia Nacional de Tránsito. Ecuador. [Online]. Available: <https://goo.gl/GoXFX5>
- [6] J. Li, X. Liang, S. Shen, T. Xu, and S. Yan, "Scale-aware fast R-CNN for pedestrian detection," *CoRR*, 2015. [Online]. Available: <https://goo.gl/27CMsz>
- [7] J. Yan, X. Zhang, Z. Lei, S. Liao, and S. Z. Li, "Robust multi-resolution pedestrian detection in traffic scenes," in *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, June 2013. DOI: <https://doi.org/10.1109/CVPR.2013.390>, pp. 3033–3040.
- [8] D. Guan, Y. Cao, J. Liang, Y. Cao, and M. Y. Yang, "Fusion of multispectral data through illumination-aware deep neural networks for pedestrian detection," *CoRR*, 2018. [Online]. Available: <https://goo.gl/AAWJFp>
- [9] J. Liu, S. Zhang, S. Wang, and D. N. Metaxas, "Multispectral deep neural networks for pedestrian detection," *CoRR*, 2016. [Online]. Available: <https://goo.gl/Czc6Jg>
- [10] Y. Guo, Y. Liu, A. Oerlemans, S. Lao, S. Wu, and M. S. Lew, "Deep learning for visual understanding: A review," *Neurocomputing*, vol. 187, pp. 27–48, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.09.116>, recent Developments on Deep Big Vision.
- [11] L. Deng and D. Yu, "Deep learning: Methods and applications," *Foundations and Trends in Signal Processing*, vol. 7, no. 3–4, pp. 197–387, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1561/20000000039>. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1561/20000000039>
- [12] S. Ren, K. He, R. Girshick, and J. Sun, "Faster r-cnn: Towards real-time object detection with region proposal networks," in *Advances in Neural Information Processing Systems 28*. Curran Associates, Inc., 2015, pp. 91–99. [Online]. Available: <https://goo.gl/5i64rm>
- [13] C. Ertler, H. Posseger, M. Optiz, and H. Bischof, "Pedestrian detection in rgb-d images from an elevated viewpoint," in *22nd Computer Vision Winter Workshop*, 2017. [Online]. Available: <https://goo.gl/L4wB1e>
- [14] C. C. Pham and J. W. Jeon, "Robust object proposals re-ranking for object detection in autonomous driving using convolutional neural networks," *Signal Processing: Image Communication*, vol. 53, pp. 110–122, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.image.2017.02.007>
- [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. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-10-4154-9\\_21](https://doi.org/10.1007/978-981-10-4154-9_21), pp. 171–178.
- [16] Elektra, *CVC-09: FIR Sequence Pedestrian Dataset*, ElektraAutonomous Vehicle developed by CVC & UAB & UPC, 2016. [Online]. Available: <https://goo.gl/NhYuZ2>
- [17] D. Olmeda, C. Premebida, U. Nunes, J. Armingol, and A. de la Escalera., "Lsi far infrared pedestrian dataset," Universidad Carlos III de Madrid. España, 2013. [Online]. Available: <https://goo.gl/pJTGvj>
- [18] D. Heo, E. Lee, and B. Chul Ko, "Pedestrian detection at night using deep neural networks y saliency maps," *Journal of Imaging Science and Technology*, vol. 61, no. 6, pp. 60 403–1–60 403–9, 2017. DOI: <https://doi.org/10.2352/J.ImagingSci.Technol.2017.61.6.060403>

- [19] C. Bingwen, W. Wenwei, and Q. Qianqing, “Robust multi-stage approach for the detection of moving target from infrared imagery,” *Optical Engineering*, vol. 51, no. 6, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.OE.51.6.067006>.
- [20] V. John, S. Mita, Z. Liu, and B. Qi, “Pedestrian detection in thermal images using adaptive fuzzy c-means clustering and convolutional neural networks,” in *2015 14th IAPR International Conference on Machine Vision Applications (MVA)*, May 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/MVA.2015.7153177>, pp. 246–249.
- [21] D. Kim and K. Lee, “Segment-based region of interest generation for pedestrian detection in far-infrared images,” *Infrared Physics & Technology*, vol. 61, pp. 120–128, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2013.08.001>.
- [22] J. Ge, Y. Luo, and G. Tei, “Real-time pedestrian detection and tracking at nighttime for driver-assistance systems,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 10, no. 2, pp. 283–298, June 2009. DOI: <https://doi.org/10.1109/TITS.2009.2018961>.
- [23] 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, pp. 1–26, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/s17051065>.
- [24] B. Qi, V. John, Z. Liu, and S. Mita, “Pedestrian detection from thermal images with a scattered difference of directional gradients feature descriptor,” in *17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Oct 2014. DOI: <https://doi.org/10.1109/ITSC.2014.6958024>, pp. 2168–2173.
- [25] M. R. Jeong, J. Y. Kwak, J. E. Son, B. Ko, and J. Y. Nam, “Fast pedestrian detection using a night vision system for safety driving,” in *2014 11th International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualization*, Aug 2014. DOI: <https://doi.org/10.1109/CGiV.2014.25>, pp. 69–72.
- [26] J. Kim, J. Baek, and E. Kim, “A novel on-road vehicle detection method using  $\pi$ hog,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 16, no. 6, pp. 3414–3429, Dec 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2465296>.
- [27] K. Piniarski, P. Pawlowski, and A. D. abrowski, “Pedestrian detection by video processing in automotive night vision system,” in *2014 Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA)*, Sept 2014, pp. 104–109. [Online]. Available: <https://goo.gl/uxnD6X>
- [28] S. L. Chang, F. T. Yang, W. P. Wu, Y. A. Cho, and S. W. Chen, “Nighttime pedestrian detection using thermal imaging based on hog feature,” in *Proceedings 2011 International Conference on System Science and Engineering*, June 2011. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSSE.2011.5961992>, pp. 694–698.
- [29] H. Sun, C. Wang, and B. Wang, “Night vision pedestrian detection using a forward-looking infrared camera,” in *2011 International Workshop on Multi-Platform/Multi-Sensor Remote Sensing and Mapping*, Jan 2011. DOI: <https://doi.org/10.1109/M2RSM.2011.5697384>, pp. 1–4.
- [30] P. Govardhan and U. C. Pati, “Nir image based pedestrian detection in night vision with cascade classification and validation,” in *2014 IEEE International Conference on Advanced Communications, Control and Computing Technologies*, May 2014. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICACCCT.2014.7019339>, pp. 1435–1438.
- [31] Y. Chun-he and D. Cai-Fang, “Research of the method of quickly finding the pedestrian area of interest,” *Journal of Electrical and Electronic Engineering*, vol. 5, no. 5, pp. 180–185, 2017. DOI: <http://doi.org/10.11648/j.jee.20170505.14>.
- [32] J. Baek, J. Kim, and E. Kim, “Fast and efficient pedestrian detection via the cascade implementation of an additive kernel support vector machine,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 18, no. 4, pp. 902–916, April 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/TITS.2016.2594816>.
- [33] Y. Guo, Y. Liu, A. Oerlemans, S. Lao, S. Wu, and M. S. Lew, “Deep learning for visual understanding: A review,” *Neurocomputing*, vol. 187, pp. 27–48, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.09.116>.
- [34] H. A. Perlin and H. S. Lopes, “Extracting human attributes using a convolutional neural network approach,” *Pattern Recognition Letters*, vol. 68, pp. 250–259, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2015.07.012>.
- [35] P. Sermanet, K. Kavukcuoglu, S. Chintala, and Y. Lecun, “Pedestrian detection with unsupervised multi-stage feature learning,” in *2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, June 2013. DOI: <https://doi.org/10.1109/CVPR.2013.465>, pp. 3626–3633.

- [36] D. Ribeiro, J. C. Nascimento, A. Bernardino, and G. Carneiro, "Improving the performance of pedestrian detectors using convolutional learning," *Pattern Recognition*, vol. 61, pp. 641–649, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2016.05.027>.
- [37] P. Sermanet, D. Eigen, X. Zhang, M. Mathieu, R. Fergus, and Y. Lecun, "Overfeat: Integrated recognition, localization and detection using convolutional networks," 12 2013. [Online]. Available: <https://goo.gl/zNNUCd>
- [38] D. Tomè, F. Monti, L. Baroffio, L. Bondi, M. Tagliasacchi, and S. Tubaro, "Deep convolutional neural networks for pedestrian detection," *Signal Processing: Image Communication*, vol. 47, pp. 482–489, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.image.2016.05.007>.
- [39] J. Cao, Y. Pang, and X. Li, "Learning multi-layer channel features for pedestrian detection," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 26, no. 7, pp. 3210–3220, July 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIP.2017.2694224>.
- [40] R. Girshick, J. Donahue, T. Darrell, and J. Malik, "Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation," in *2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, June 2014. DOI: <https://doi.org/10.1109/CVPR.2014.81>, pp. 580–587.
- [41] R. Girshick, "Fast r-cnn," in *2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Dec 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCV.2015.169>, pp. 1440–1448.
- [42] 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. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-46475-6\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-319-46475-6_28), pp. 443–457.
- [43] Z. Cai, Q. Fan, R. Feris, and N. Vasconcelos, "A unified multi-scale deep convolutional neural network for fast object detection," 2016. [Online]. Available: <https://goo.gl/Y4XNZv>
- [44] K. Simonyan and A. Zisserman, "Very deep convolutional networks for large-scale image recognition," in *International Conference on Learning Representations*, 2014. [Online]. Available: <https://goo.gl/98akRT>
- [45] J. Konečný, J. Liu, P. Richtárik, and M. Takáč, "Mini-batch semi-stochastic gradient descent in the proximal setting," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 10, no. 2, pp. 242–255, March 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSTSP.2015.2505682>.
- [46] D. P. Kingma and J. Ba, "Adam: a method for stochastic optimization," in *ICLR 2015*, 2015. [Online]. Available: <https://goo.gl/so1Da8>
- [47] P. Dollar, C. Wojek, B. Schiele, and P. Perona, "Pedestrian detection: An evaluation of the state of the art," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 34, no. 4, pp. 743–761, April 2012. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2011.155>.



# ESTUDIO TÉCNICO DEL USO DE ENERGÍA SOLAR Y BIOGÁS EN VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN ILHABELA-BRASIL

## A TECHNICAL STUDY OF SOLAR AND BIOGAS ENERGY USAGE IN ELECTRIC VEHICLES IN ILHABELA, BRAZIL

Raul Pereira Micena<sup>1,\*</sup>, Omar R. Llerena P.<sup>1</sup>,  
 Wendell de Queiróz Lamas<sup>2</sup>, José Luz Silveira<sup>1</sup>

### Resumen

Actualmente, los sistemas híbridos de generación de energía se han mostrado como una excelente oportunidad para la generación de electricidad. En este trabajo se presenta el estudio de uno de estos sistemas considerando dos fuentes de energía disponibles (solar – biogás) en la isla Ilhabela en el estado de San Pablo – Brasil, con miras a dotar de energía a vehículos eléctricos. Este estudio se basa primeramente en el cálculo de la demanda de energía de los vehículos eléctricos en esta isla. Luego se determina la capacidad de producción de biogás en Ilhabela. Posteriormente se efectúa un análisis energético de la planta con una microturbina a biogás para conocer la energía producida y la demanda de biogás. Como último paso, se calcula la cantidad de energía necesaria a ser generada con la planta fotovoltaica. Los resultados muestran que, considerando un índice de inserción de mercado del 4 % de los vehículos eléctricos, la demanda energética media es de 46 327 kWh/mes. Por otro lado, la capacidad de producción de biogás en la isla es dos veces mayor a la necesaria para generar 16 200 kWh/mes. Finalmente, la planta fotovoltaica producirá 30 127 kWh/mes.

**Palabras clave:** biogás, vehículos eléctricos, energía solar, Ilhabela.

### Abstract

Currently, Hybrid Power Systems (HPS) have been shown as an excellent opportunity for generation of electricity. This paper presents the study of a hybrid system considering two energy sources (solar - biogas) available in the city Ilhabela island in the state of São Paulo – Brazil. This system will supply electricity to electric vehicles. The study is based on the calculation of the energy demand of the electric vehicles on the island. Then the capacity of biogas production in Ilhabela is determined. Subsequently, in order to know the energy produced and the amount of biogas needed by the microturbine, an energy analysis of this plant is carried out. Last, the energy needed to be generated with the photovoltaic plant is calculated. The results show that, considering a market insertion index of 4% of electric vehicles, the average energy demand is 46.327 kWh/month. On the other hand, the amount of biogas produced on the island is twice that needed to generate 16.200 kWh/month. Finally, the solar plant will produce 30.127 kWh/month.

**Keywords:** Biogas, Electric Vehicles, Solar Energy, Ilhabela.

<sup>1,\*</sup>Laboratório de Otimização de Sistemas Energéticos (LOSE)/Instituto de Pesquisa em Bioenergia (IPBEN) – UNESP. Brasil. Autor para correspondencia ✉: raul.micena@unesp.br, <https://orcid.org/0000-0003-0486-4108>

<https://orcid.org/0000-0003-2115-4036>, <https://orcid.org/0000-0002-7588-0335>

<sup>2</sup>Departamento de Ciências Básicas e Ambientais. Escola de Engenharia de Lorena. Universidade de São Paulo (USP). Brasil. <http://orcid.org/0000-0003-2764-5725>

Recibido: 14-05-2018, aprobado tras revisión: 25-06-2018

Forma sugerida de citación: Micena, R. P.; Llerena, O. R.; Queiróz Lamas, W. y Silveira, J. L. (2018). «Estudio técnico del uso de energía solar y biogás en vehículos eléctricos en Ilhabela-Brasil». INGENIUS. N.º 20, (julio-diciembre). pp. 58-69. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n20.2018.06>.

## 1. Introducción

La energía es considerada un insumo fundamental en las actividades productivas, teniendo un importante papel en el proceso de desarrollo de la humanidad. El acceso a las formas modernas de energía, en particular la energía eléctrica, trae una serie de beneficios sociales que mejoran la calidad de vida de la población [1].

Uno de los sectores de mayor consumo de energía es el transporte. En 2014, a nivel mundial este sector fue responsable del 28 % de la demanda global de energía y 23 % de las emisiones globales de CO<sub>2</sub>, las cuales provienen del consumo de combustibles fósiles. En relación con el uso de petróleo, este sector consumió 65 % de la demanda global final [2].

Por otro lado, en un escenario de creciente preocupación por el cambio climático, se buscan alternativas menos contaminantes para el transporte de personas y cargas, en este sentido, los vehículos eléctricos (VE) están siendo ampliamente difundidos. Según las proyecciones de Bloomberg New Energy Finance [3], en 2040, más de la mitad de los automóviles nuevos vendidos en el mundo serán eléctricos. A diferencia de los vehículos a combustión, los VE no emiten gases de efecto invernadero durante su funcionamiento.

Sin embargo, la energía que alimenta sus motores eléctricos puede tener como origen diferentes fuentes de energía, algunas de ellas altamente contaminantes, como el carbón mineral y el petróleo, haciendo menos efectiva la adopción de los VE como medida de reducción de la emisión de gases invernadero. Desde la perspectiva de un análisis de ciclo completo, la electricidad disponible para cargar las baterías debe generarse a partir de fuentes renovables o limpias para que dichos vehículos tengan cero emisiones [4].

En ese sentido los sistemas híbridos generadores de energía SHGE son una buena alternativa. Según Thibaud *et al.* [5], este tipo de sistemas utilizan más de una fuente de energía para suplir una variedad de diferentes cargas. Típicamente estos sistemas funcionan aisladamente aprovechando los recursos renovables disponibles en el sitio, pero también se pueden utilizar en conjunto con fuentes convencionales de generación de energía.

Según Justo Roberts cuando dimensionados de forma correcta, los SHGE presentan ventajas técnicas, económicas y ambientales en relación con los sistemas que utilizan una única fuente renovable o los sistemas tradicionales [6].

Este artículo propone el análisis técnico y dimensionamiento de un SHGE (solar-biogás) para aplicación en la isla Ilhabela-SP-Brasil, considerando potenciales energéticos actualmente disponibles en la isla y que no están siendo aprovechados.

La finalidad del sistema propuesto es para generar estaciones de carga para una flota específica de vehículos eléctricos. Para este estudio se considera diferentes

grados de penetración de VE en relación con la flota actual de automóviles.

Para un análisis estructurado de esta propuesta en primer lugar se realiza una revisión bibliográfica de los VE a batería (VEB) y su relación con las fuentes de energía renovable; posteriormente en la metodología se describe paso a paso el análisis técnico y dimensionamiento del sistema. Finalmente, se analizan y se discuten los resultados y se obtienen las conclusiones sobre el análisis desarrollado.

### 1.1. Vehículos eléctricos a batería

Resumidamente, un vehículo eléctrico a batería (VEB) puede ser descrito como un vehículo cuyas ruedas son movidas por un motor eléctrico, que a su vez es alimentado por la corriente eléctrica almacenada en un banco de baterías. Sus principales componentes se pueden ver en la Figura 1.

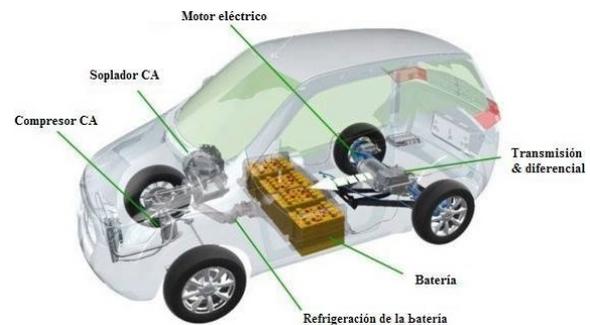


Figura 1. Componentes básicos del vehículo eléctrico [7].

La carga de las baterías de un VEB es en gran parte obtenida a través del uso de una toma eléctrica residencial convencional. Sin embargo, los altos períodos de recarga y la necesidad de realizar cargas más rápidas y frecuentes, resultaron en el advenimiento de estaciones públicas de carga [8]. Estas estaciones pueden ser independientes o conectadas a una red de estaciones con dispositivos de última generación [9].

### 1.2. Uso de fuentes de energía renovable en los VEB

La literatura es bastante diversa en cuanto a la integración entre los VE y las fuentes renovables de energía [10–12]. Los modelos que estudian esta integración tienden principalmente a medir la capacidad de relación entre ellos, así como los impactos en el rendimiento de la red eléctrica [13]. A continuación, se presentan algunas aplicaciones usando biogás y energía solar fotovoltaica.

#### 1.2.1. Uso de biogás en los VEB

La energía de biomasa difiere de otras fuentes renovables, como solar y eólica, por el hecho de que puede ser

fácilmente almacenada y consumida cuando sea necesario. Los biocombustibles, como el etanol producido a partir de la caña de azúcar, son la forma más común de utilización de la biomasa en los vehículos.

Este combustible es quemado directamente en motores de combustión interna (MCI). Sin embargo, la electricidad proveniente de los biocombustibles tiende a proporcionar un mayor retorno sobre la inversión en comparación con el uso en procesos finales como el antes mencionado [14].

Diversos estudios recientes indican que el uso de bioelectricidad en un vehículo es más efectivo que la conversión de la biomasa en biocombustibles. Schmidt *et al.* [8] evaluaron la producción y el uso de varios tipos de biocombustibles en Austria, en comparación con la bioelectricidad. Los resultados indican que las emisiones de gases de efecto invernadero, los efectos del uso de la tierra y la cantidad necesaria de *stock* de biomasa se reducen utilizando VE en comparación con los biocombustibles.

Por otro lado, Campbell *et al.* [15] concluyen que la producción media bruta, en kilómetros recorridos por hectárea de producción de biomasa, es de 112 % mayor para la bioelectricidad que para los biocombustibles. Además, la compensación media neta de gases de efecto invernadero para la producción de *switchgrass* (gramínea del género *Panicum* L.) es un 108 % mayor de la bioelectricidad que la de los biocombustibles [13].

### 1.2.2. Uso de energía fotovoltaica en los VEB

A lo largo de los años, varios métodos de carga de VEB utilizando paneles fotovoltaicos (PV, siglas en inglés) se han propuesto. La más prominente es la combinación entre PV y la red eléctrica. De esta forma, utilizan la energía fotovoltaica siempre que sea posible, pero cambian a la red cuando la energía fotovoltaica es insuficiente o no disponible [16].

La conexión a la red de las estaciones de carga de VEB, en conjunto con la energía solar fotovoltaica, permiten una mayor interacción entre los VE y la red, posibilitando el flujo de energía del vehículo hacia la red, en una tecnología denominada *vehicle-to-grid* (V2G) [17]. La conexión a la red también permite que la generación fotovoltaica no necesariamente deba estar en el mismo espacio físico de la estación de carga, ya que la energía puede ser transportada a través de los sistemas de distribución.

Otro enfoque es utilizar el sistema PV fuera de la red eléctrica. Este sistema se conoce como *PV-standalone* [18]. Este enfoque requiere la utilización de baterías para el almacenamiento de la energía generada durante los períodos con alta irradiación solar. El uso de baterías en este tipo de sistemas eleva los costos tanto de inversión inicial como de mantenimiento.

### 1.3. Energía solar fotovoltaica (PV)

La energía solar es la mayor fuente de energía renovable disponible en la naturaleza, teniendo como origen la radiación proveniente de las reacciones de fusión de los núcleos de hidrógeno y helio en el interior del Sol.

Por otro lado, los sistemas fotovoltaicos se caracterizan por la alta confiabilidad y el bajo mantenimiento, siendo que su alto costo inicial a menudo es compensado por el bajo costo operacional. A través del efecto PV, las células solares contenidas en los paneles convierten la energía solar directamente en energía eléctrica renovable, segura y no contaminante [19].

El componente básico de la energía solar es la célula fotovoltaica. Esta se compone de dos capas de material semiconductor. Las capas, una del tipo N, con exceso de electrones y otra del tipo P, con déficit de electrones, se unen, formando una unión PN. Cuando hay la incidencia de fotones provenientes de la luz solar, los electrones adquieren energía, y se da entonces, con la presencia de un conductor externo, la migración de los electrones generando así una corriente eléctrica. Si la célula no sufre incidencia solar, los electrones y las lagunas permanecen atrapados detrás de esa barrera [20]. La Figura 2 muestra el funcionamiento del panel PV.

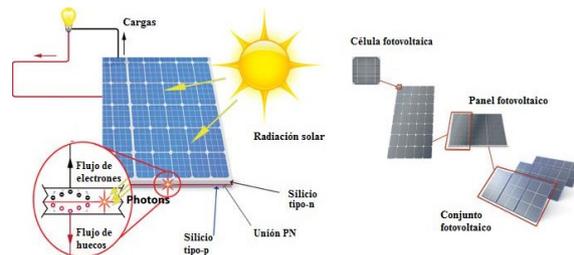


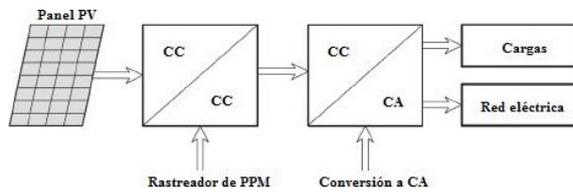
Figura 2. Funcionamiento del panel PV [18].

En el proceso de industrialización, las células fotovoltaicas se interconectan en arreglos serie-paralelo formando así, los módulos PV (Figura 2). Los módulos PV más utilizados se basan en la tecnología poli o monocristalina [21]. Pero recientemente, películas finas se están popularizando, especialmente para grandes instalaciones [22].

En general, en las instalaciones fotovoltaicas, los módulos se organizan en circuitos en serie, a fin de alcanzar la tensión DC necesaria. Para obtener una potencia mayor, varias cadenas se conectan en paralelo. El comportamiento de un sistema PV bajo diferentes intensidades de irradiación solar y temperatura puede ser entendido examinando sus curvas características de corriente-tensión (I-V) y tensión-potencia (P-V).

Siempre existirá un único punto de operación en el que la potencia será máxima, es decir, el punto de potencia máxima (PPM) en una determinada temperatura e irradiación. El PPM no es fijo; varía continuamente de acuerdo con la temperatura y la irradiación

solar. Debido a esta dinámica, un rastreador para encontrar el punto de máxima potencia es necesario para garantizar que siempre se extraiga la máxima potencia del arreglo de paneles PV (Figura 3) [16].



**Figura 3.** Diagrama de bloques de un sistema PV mostrando sus principales componentes, entre ellos el PPM [23].

#### 1.4. Energía solar en Brasil

De acuerdo con Pereira *et al.* [24], el promedio anual de irradiación global presenta una buena uniformidad en Brasil. Los promedios son relativamente altos en todo el territorio. Los valores de irradiación solar global incidente en cualquier región del territorio brasileño varían entre 1500 y 2500 kWh/m<sup>2</sup>/año, y son superiores a los de la mayoría de los países europeos, tales como Alemania (900-1250 kWh/m<sup>2</sup>/año), Francia (900-1650 kWh/m<sup>2</sup>/año) y España (1200-1850 kWh/m<sup>2</sup>/año), lugares donde proyectos de energía solar son ampliamente utilizados.

A pesar de las condiciones favorables para el desarrollo de este tipo de tecnología, en Brasil aún es incipiente [25]. Según el Ministerio de Minas y Energía (MME) [26], al final del 2016, Brasil poseía 24 MW de potencia instalada en centrales fotovoltaicas centralizadas. Sin embargo, tal potencia aún no es suficiente para colocar a Brasil entre los veinte líderes mundiales en producción de este tipo de energía, todos ellos con capacidad instalada superior a 1 GW [27].

A pesar de la baja potencia instalada en centrales fotovoltaicas de gran porte, Brasil ha conseguido surgir en el uso de energía solar gracias a la generación distribuida, siendo estos los principales promotores para el uso de esta tecnología.

La reglamentación, elaborada en 2012 por la ANEEL (Agencia Nacional de Energía Eléctrica) por medio de la Resolución Normativa N.º 482 y perfeccionada en 2016, trae importantes estímulos a la instalación de centrales generadoras de pequeño tamaño basadas en fuentes renovables, como las energías solar y eólica. Como parte de esta reglamentación, se instituyó el Sistema de Compensación de Energía Eléctrica, el cual permite la acumulación de excedentes de generación en relación con el consumo, generando así créditos que pueden ser utilizados en un plazo de cinco años [28].

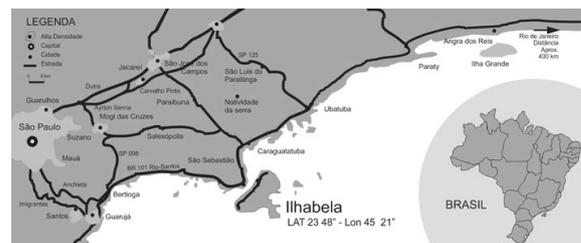
El número de conexiones de generación distribuida de energía a escala micro (hasta 75 kW de potencia

instalada) y mini (mayor que 75 kW y menor que 5 MW) está en pleno ascenso en Brasil, alcanzando 10 561 conexiones registradas en 2017, contra apenas cuatro en 2012, con una potencia instalada de 114,7 MW, siendo la energía solar responsable del 70 % de este total [29].

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Perfil de la isla Ilhabela

Ubicada en el litoral del estado de São Paulo (véase Figura 4), Ilhabela es una isla poblada por 32 197 habitantes. Con un área total de 347,5 km<sup>2</sup>; 85 % del territorio de la isla corresponde a unidades de conservación ambiental. El 15 % restante corresponde a áreas aptas para la urbanización. Su estructura vial está instalada a lo largo de toda la costa, conectando así la parte central de la ciudad con los barrios más alejados. Esta isla cuenta con una flota de 17 449 vehículos, entre los cuales 7041 son automóviles [30].



**Figura 4.** Ubicación de Ilhabela, en el litoral del estado de San Pablo [31].

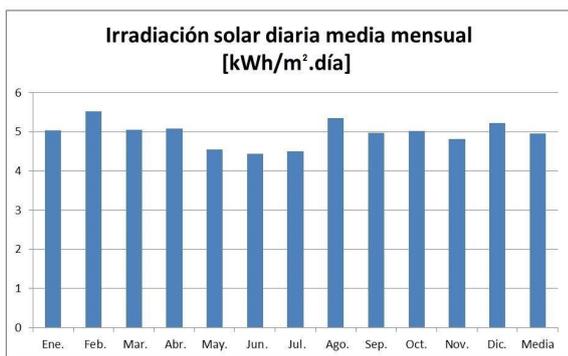
Por no poseer generación de energía eléctrica propia a gran escala, la energía eléctrica en el municipio de Ilhabela es suministrada por medio de cables submarinos, que transmiten la energía del continente hasta la isla. De esta forma, si la demanda de energía eléctrica en la isla crece considerablemente, el suministro tendrá que ser reforzado, ya sea a través de la ampliación de la red de cables submarinos, o mediante la introducción de centrales generadoras de energía. Siendo, una de las propuestas de este trabajo, ya que propone la utilización de la energía solar fotovoltaica en conjunto con una central termoeléctrica a biogás, misma que sería instalada en la isla.

Según el Plan Municipal de Ilhabela, actualmente, el 6,5 % de la población urbana del municipio tiene su alcantarillado colectado, siendo este arrojado directamente al mar sin un tratamiento efectivo, con una simple remoción de residuos gruesos. Un sistema de estaciones de tratamiento de aguas residuales está en fase de implantación, y las proyecciones son de que en 2025 se produzcan 3 795 000 m<sup>3</sup> de residuos y, en 2030, 4 345 000 m<sup>3</sup> [32].

Según Lamas, el metano (CH<sub>4</sub>) presente en el biogás producido a partir del tratamiento anaeróbico

de residuos de alcantarillado, es aproximadamente 21 veces más perjudicial para la atmósfera, que el anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>) [33]. Por lo tanto, el aprovechamiento energético del biogás se vuelve interesante, ya que concilia la generación de energía renovable y el saneamiento ambiental.

Por otro lado, según los datos obtenidos del Centro de Referencia de Energía Solar y Eólica Sérgio S. de Brito (CRESESB, sigla en portugués) [34], Ilhabela posee un patrón de irradiación solar con variación de intensidad dependiendo de la estación. Febrero es el mes con el mayor promedio de irradiación solar (5,56 kWh/m<sup>2</sup>/día) y junio el mes con el menor promedio, con apenas 3,92 kWh/m<sup>2</sup>/día. La Figura 5, muestra la irradiación solar diaria-mensual.



**Figura 5.** Irradiación solar diaria media mensual (kWh/m<sup>2</sup>/día) en la isla Ilhabela

## 2.2. Consumo de energía de un VEB

En este estudio, el rendimiento de los VEB se analiza en términos de la tasa de consumo de combustible (TCE). Es decir, la TCE se calcula como la razón entre la potencia consumida y la distancia recorrida [35]. Se utiliza la Ecuación 1 para este cálculo.

$$TCE = \frac{\text{Energía consumida (kWh)}}{\text{Distancia recorrida (km)}} \quad (1)$$

Cuanto más bajo sea el TCE, mejor será la eficiencia energética. La autonomía de los VEB se calcula con la Ecuación 2.

$$\text{Auto} = \frac{\text{Energía de un VEB cargado (kWh)}}{TCE \text{ (kWh/km)}} \quad (2)$$

La distancia media recorrida por un vehículo en Brasil es similar a la verificada en el estado de Luisiana (EE. UU.), estimada en 35 km/día [36].

De acuerdo con la proyección de la Empresa de Investigación Energética (EPE, sigla en portugués) [37], los VE representarán el 1,7 % de la flota nacional en 2025, y el 4,5 % en 2030.

El cálculo del consumo eléctrico por km en una flota de VEB puede calcularse con la Ecuación 3 [38].

$$Cel_{VEB} = P_M \times n \times D \times TCE \quad (3)$$

Donde:

- $P_M$  – penetración de mercado de los VEB;
- $n$  – número total de automóviles de la flota considerada;
- $D$  – distancia media recorrida por un VEB en el período de un día;
- $TCE$  – tasa de consumo eléctrico por km.

## 2.3. Análisis energético de la planta a biogás

Las particularidades ambientales del local donde se pretende poner en marcha este proyecto obligan a que la utilización de la biomasa produzca el menor impacto posible. Así, la tecnología de microturbinas a gas ofrece soluciones con bajas tasas de emisión de NO<sub>x</sub>, lo cual representa un gran impacto para el efecto invernadero. El fabricante de la microturbina Capstone 30 garantiza una tasa de emisión de NO<sub>x</sub> inferior a 9 ppm en los gases de escape. Así, es evidente la ventaja ambiental obtenida con el uso de esta tecnología, ya que comparado con la tecnología de grupos generadores de combustión interna convencionales (ciclo Otto), estas tienen una emisión de 3000 ppm, [39].

Para este estudio, es seleccionada la microturbina Capstone 30, modelo ya utilizado en otros trabajos con biogás proveniente de aguas residuales de San Pablo – Brasil [40] y en procesos de cogeneración [41]. Las características de esta turbina son presentadas en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Características de la microturbina CAPSTONE C30 [39]

Modelo	C30
Potencia (kW)	30
Eficiencia (%)	26
Flujo de gases de escape (kg/s)	0,31
Temperatura de escape (°C)	275
Heat Rate (MJ/kWh)	13,8

### 2.3.1. Composición del biogás

El biogás generado a partir de la digestión anaeróbica de la biomasa proveniente de las aguas residuales tiene la composición presentada en la Tabla 2 [40].

**Tabla 2.** Composición de biogás

Componente	Volumen (%)	PCI (kJ/kg)
CH <sub>4</sub>	66,5	50
CO <sub>2</sub>	30,5	-
O <sub>2</sub> + N <sub>2</sub>	0,5	-
H <sub>2</sub> O	2,5	-
Total	100	22,2

### 2.3.2. Producción del biogás

Según França Junior [42], la tasa media de generación de biogás es de 170,9 m<sup>3</sup> por cada 1000 m<sup>3</sup> de residuos tratados. Por lo tanto, se pueden calcular así los valores de biogás que pueden obtenerse para la estación de tratamiento de aguas residuales (ETE, sigla en portugués) de Ilhabela con la Ecuación 4.

$$m_{biogás} = tx_{biogás} \times m_{residuo} \quad (4)$$

Donde:

- $m_{biogás}$  – volumen de biogás generado [m<sup>3</sup>/año];
- $tx_{biogás}$  – tasa media de generación de biogás (0,1079 m<sup>3</sup> biogás/m<sup>3</sup> residuo);
- $m_{residuo}$  – volumen de residuo tratado [m<sup>3</sup>/año].

Con el resultado de la Ecuación 4, se puede obtener los valores de caudal en [kg/s] con la Ecuación 5.

$$m_{bio} = \frac{m_{biogás} \times \gamma_{biogás}}{31\ 104\ 000(s/año)} \quad (5)$$

Donde:

- $m_{bio}$  – caudal de biogás [kg/s];
- $m_{biogás}$  – volumen de biogás generado [m<sup>3</sup>año];
- $\gamma_{biogás}$  – masa específica del biogás con composición 65 % CH<sub>4</sub> y 35 % CO<sub>2</sub> (1,1518 kg/Nm<sup>3</sup>) [43].

### 2.3.3. Análisis energético

La metodología adoptada para el análisis energético de la planta a biogás es la utilizada por Llerena [44]. Este análisis es detallado a continuación paso a paso.

### 2.3.4. Volumen de control del ciclo Brayton

En la Figura 6, se observa el ciclo a gas. Este ciclo tiene un compresor, una cámara de combustión, la turbina y el intercambiador de calor.

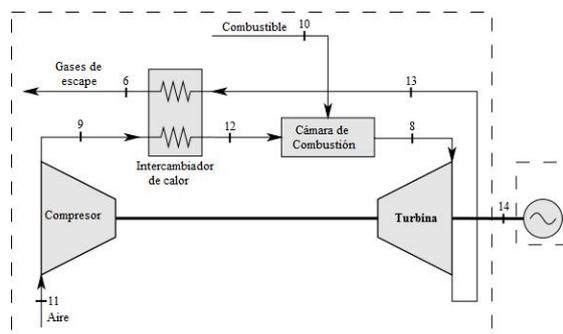


Figura 6. Volumen de control del ciclo de Brayton [41].

En este estudio se mantienen las condiciones ISO de la microturbina del GTW Handbook [45]. Considerando que la eficiencia del generador eléctrico es

del 95 % se obtiene la potencia en el punto 14 con la Ecuación 6:

$$\dot{W}_{14} = \frac{P_{generador}}{\eta_{generador}} \quad (6)$$

Donde:

- $P$  – potencia eléctrica en el generador [kW].

Ahora, se calcula el flujo de biogás con la Ecuación 7:

$$HR \cdot P = PCI_{biogás} \cdot m_{biogás} \quad (7)$$

Donde:

- $HR$  – Heat Rate [MJ/kWh];
- $P$  – potencia a la salida de la turbina [kW];
- $PCI$  – poder calorífico inferior del biogás [kJ/kg];
- $M$  – flujo del biogás [kg/s].

Con los flujos del biogás y de los gases de escape se calcula el flujo de aire con la Ecuación 8:

$$\dot{m}_{11} = \dot{m}_6 - \dot{m}_{biogás} \quad (8)$$

### 2.3.5. Volumen de control del compresor

Según Çengel y Boles [46] los compresores tienen una eficiencia isentrópica que varía entre el 80 y el 90 %. En este estudio se utilizó la mayor eficiencia.

Punto 9

El flujo de aire en la salida del compresor es igual al flujo de aire en la entrada del compresor, así se tiene la Ecuación 9:

$$\dot{m}_9 = \dot{m}_{11} \quad (9)$$

Según GTW Handbook [45], la relación de presiones es de 4:1. Con ese dato se calcula la presión en el punto 9. Para ello se utilizaron las Ecuaciones 10 y 11:

$$P_9 = P_{11} \cdot Rp \quad (10)$$

Presión relativa en el punto 9:

$$Pr_9 = P_{11} \frac{P_9}{P_{11}} \quad (11)$$

Con la Ecuación 12 se obtiene la entalpía en el punto 9 [44].

$$h_9 = \frac{h_{9s} - h_{11}}{\eta_{cpmp}} + h_{11} \quad (12)$$

Punto 12

Según Carvalho [47], en el intercambiador de calor se tiene una pérdida del 3 % en la presión de salida.

De acuerdo con el mismo autor en el caso de la temperatura se tiene una diferencia de 324 °C. Así, la presión y la temperatura en el punto 12 se calculan con las Ecuaciones 13 y 14, respectivamente.

Presión en el punto 9:

$$P_{12} = P_9 - (P_9 \cdot 0,03) \quad (13)$$

Temperatura en el punto 9:

$$T_{12} = T_9 + \Delta T \quad (14)$$

Para el cálculo del flujo del aire en el punto 12 se utilizó la Ecuación 15.

$$\dot{m}_{12} = \dot{m}_9 \quad (15)$$

### 2.3.6. Volumen de control de la cámara de combustión

Punto 8

El flujo de los gases de escape en el punto 6 es igual al flujo de gases en la salida en la cámara de combustión. Así, se utilizó la Ecuación 16 para calcular el flujo de gases en el punto 8.

$$\dot{m}_8 = \dot{m}_6 \quad (16)$$

Según Carvalho [47] existe una pérdida de presión del 3 % en la cámara de combustión. Así, se utilizó la Ecuación 17 para calcular la presión de salida de la CC.

$$P_8 = P_{12} - (P_{12} \cdot 0,03) \quad (17)$$

Según Saravanamuttoo *et al.* [48], la CC puede tener una eficiencia del 99 %. Ahora, con la ley de conservación de energía se tiene la Ecuación 18:

$$\dot{m}_8 \cdot \dot{h}_8 = \dot{m}_{12} \cdot \dot{h}_{12} + (PCI_{biogas} \cdot \dot{m}_{biogas}) \cdot \eta_{CC} \quad (18)$$

### 2.3.7. Volumen de control de la turbina

Punto 13

Para el cálculo de las presiones en la turbina se consideró la misma relación de aire que el compresor. Así, la presión relativa en el punto 13 se calcula con la Ecuación 19:

$$Pr_{13} = Pr_8 \frac{P_{13}}{P_8} \quad (19)$$

Haciendo el balance de energía se tiene la Ecuación 20:

$$(h_8 - h_{13a}) \cdot \dot{m}_8 = \dot{W}_{14} + \frac{(h_9 - h_{11}) \cdot \dot{m}_{11}}{\eta_{comp}} \quad (20)$$

La eficiencia de la turbina es calculada con la Ecuación 21.

$$\eta_{turbina} = \frac{\dot{W}_{generador}}{PCI_{biogas} \cdot \dot{m}_{biogas}} \quad (21)$$

## 2.4. Dimensionamiento del sistema PV

### 2.4.1. Cálculo de la potencia fotovoltaica necesaria

A través del cálculo de la potencia nominal (generada a partir de la radiación solar) necesaria para atender al consumo promedio diario de las cargas, y con los datos de la energía suplida por la planta de biogás se puede estimar el área de los paneles solares a ser instalados.

Este cálculo muestra, de forma aproximada, la capacidad del sistema dimensionado para atender la demanda, suministrando energía en igual cantidad a la solicitada por las cargas (Flota de VE).

A través de la aplicación de la Ecuación 22 se determina la potencia nominal instalada necesaria para atender la demanda [49]:

$$P_{FV} = \frac{E}{n_v n_R HSP} S_f \quad (22)$$

Donde:

- $E$  – demanda energética solicitada por la carga;
- $S_f$  – factor de seguridad para pérdidas resistivas y térmicas en las células fotovoltaicas, con valor adoptado de 1,15;
- $n_v$  y  $n_R$  – eficiencias de los componentes del sistema;
- $HSP$  – Horas-Sol-Pico.

La irradiación solar media diaria puede ser referida en términos de «horas pico de sol» (HSP). Este valor se refiere al número equivalente de horas diarias a las que una región dada debería someterse (1 kW/m<sup>2</sup>) para que reciba la misma cantidad de energía solar. Así, el número de HSP es numéricamente igual al de la irradiación solar media (kWh/m<sup>2</sup>.día). Con este valor es posible estimar el área total a ser ocupada por los módulos fotovoltaicos. De esta forma, a través de la división de la potencia instalada por la eficiencia de los módulos, se encuentra el área resultante [46]. Ecuación 23.

$$A_{total} = \frac{P_{FV}}{E_{ff}} \quad (23)$$

Donde:

- $A_{total}$  – área de los módulos (m<sup>2</sup>);
- $P_{FV}$  – potencia media necesaria (kW);
- $E_{ff}$  – eficiencia de los módulos (%).

### 2.4.2. Costos de la energía solar fotovoltaica

En Brasil, el costo total de instalación está compuesto por los siguientes elementos: módulos PV (43 %), inversores (24 %), estructura física y protecciones (16 %) e instalación (17 %) [50].

De acuerdo con datos del informe de Greener [51], el precio promedio del kW instalado de energía solar fotovoltaica en Brasil en 2017 estaba entre 8 R\$/kW, para los sistemas de menor porte, y 4,62 R\$/kW para sistemas mayores. Otros valores se ajustan a la Tabla 3.

**Tabla 3.** Precios [45]

Potencia (kW)	2	4	8	12	30	50	75	150
Precio (R\$/W)	8	6,84	5,95	5,65	5,26	5,1	5,01	4,62

## 3. Resultados y discusión

### 3.1. Análisis del consumo de energía

Teniendo en cuenta la flota de 7041 automóviles, y tomando como base la proyección de la EPE. Por medio del cálculo del TCE y con la Ecuación 3, se puede calcular el consumo mensual de energía de la flota de VE, de acuerdo con el grado de penetración de mercado de estos. Los resultados son presentados en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Consumo de energía eléctrica de los VEB en relación con la penetración de mercado

Penetración de mercado de los VEB	N.º de vehículos eléctricos	Consumo medio de energía (kWh/mes)
4%	282	46 327,21
2%	141	23 163,60

De la Tabla 4 se puede observar que una mayor penetración de VE significa una mayor demanda de energía. Este incremento representa también una planta solar fotovoltaica de más potencia y consecuentemente será necesaria una mayor área de instalación.

### 3.2. Análisis energético de la planta a biogás

Los resultados del análisis energético de la microturbina utilizando biogás se muestran en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Resumen del análisis energético

Punto	T [°C]	P [kPa]	Flujo [kg/s]	h [kJ/kg]
6	275	101,32	0,31	490
8	831,9	393	0,31	1167,15
9	184,3	405,3	0,3041	459,67
10	25	101,32	0,0059	-
11	25	101,32	0,3041	298,6
12	508	393,24	0,304	801,9
13	594,6	96,25	0,31	825,77

De acuerdo con la Tabla 5, la microturbina necesita un caudal de 0,0059 kg/s de biogás para proporcionar su potencia nominal de 30 kW. Con las Ecuaciones 4 y 5, y con las proyecciones de caudal de 3 795 000 m<sup>3</sup>/año en 2025 y 4 345 000 m<sup>3</sup>/año en 2030 en el sistema de alcantarillado de Ilhabela, se llega a una capacidad de producción de 0,0152 kg/s en 2025 y 0,0174 kg/s de biogás en 2030, ambos valores por encima de la necesidad de consumo de la microturbina, por lo que viabiliza este tipo de energía desde el punto de vista técnico.

Así, con la planta biogás funcionando 18 horas al día, en su plena capacidad (30 kW) en los horarios en que no existe la irradiación solar, se tiene una generación media de 16 200 kWh/mes. Con este valor de energía mensual, y con el consumo de energía de la flota de VEB, según la Tabla 6, se calculó la necesidad de generación suplementaria de energía por parte del sistema fotovoltaico (se considera que este sistema trabajará las 6 horas restantes).

**Tabla 6.** Energía a ser atendida por el sistema PV, dado el régimen de operación de la planta a biogás

Penetración de mercado de los VEB	Energía biogás (kWh/mes)	Energía del sistema solar PV (kWh/mes)
4%	16 200,00	30 127,21
2%	16 200,00	6963,6

Con la información presentada en la tabla anterior, fueron dimensionados los sistemas PV adecuados para el suministro energético en los dos escenarios.

### 3.3. Análisis del dimensionamiento de la planta fotovoltaica

Por medio de la Ecuación 22 se calculó la potencia fotovoltaica necesaria para suplir la demanda energética suplementaria a aquella ya atendida por la generación del sistema biogás. Por tratarse de una isla, con vocación turística y ecológica, el área ocupada por la

generación fotovoltaica es un factor de gran importancia para la implantación de esta tecnología. Con la Ecuación 23, y adoptando una eficiencia del 15 % en los módulos PV, típica en modelos de tecnología de silicio policristalino disponibles en el mercado, se calculó el área total de instalación de los módulos. Los resultados son presentados en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Potencia y área ocupada por los sistemas PV dimensionados

Penetración de mercado de los VEB	Potencia (kW)	Área instalada (m <sup>2</sup> )
4 %	305,20	2034,69
2 %	70,54	470,30

Para una misma capacidad de generación en el sistema de biogás (30 kW), el área ocupada por el sistema PV creció en más de cuatro veces. Teniendo en cuenta el impacto ambiental causado por la ocupación de porciones relevantes de área por el sistema PV, y la posibilidad de la generación distribuida, la aplicación de esta tecnología lleva a una elección entre la construcción de una planta fotovoltaica de mayor porte o de una cantidad mayor de plantas de pequeño porte, propias para instalaciones de tamaño residencial.

### 3.4. Análisis de los costos de instalación

El costo del sistema generador a biogás con la micro-turbina Capstone 30, misma que ya fue utilizada en trabajos similares por Coelho [40], donde se llegó a un valor de R\$ 8568,62 por kW instalado. Así, la inversión en un sistema completo de 30 kW con este tipo de tecnología tendría un costo de R\$ 257 058,60.

Con relación a la planta fotovoltaica, considerando las dos opciones (centralizado y distribuido), y con los costos actuales del mercado, la inversión para la instalación de este sistema PV también fueron calculados. Sumando estos dos costos se obtuvo el costo total del SHGE, los cuales son presentados en la Tabla 8.

**Tabla 8.** Inversión total para el SHGE

% VEB	PV distribuido		PV centralizado	
	R\$	Config.	R\$	Config.
4 %	2 344 647	77 x 4 kW	1 667 096	2 x 150 kW
2 %	739 583	18 x 4 kW	610 487	1 x 70 kW

## 4. Conclusiones

Debido a las peculiaridades de ser una isla, su potencial turístico y ecológico, las fuentes renovables de energía son la solución ideal para las demandas energéticas actuales y futuras de Ilhabela, que deberán pasar

en algún momento por los desafíos impuestos por el advenimiento de los VEB.

Se concluye que la instalación de la planta a biogás es viable técnicamente, pues la capacidad de producción de biogás en la isla será 0,0152 kg/s en 2025 y 0,0174 kg/s en 2030, es decir, dos veces más que lo necesario para que la planta trabaje en su máxima capacidad (0,0059 kg/s). La planta a biogás tendrá una producción de 16 200 kWh/mes.

De la planta fotovoltaica se concluye que, si se dobla la flota de vehículos eléctricos, y se mantiene la capacidad de generación del sistema a biogás (16 200 kWh/mes), la potencia instalada del sistema PV suplementario aumentará en más de cuatro veces su capacidad, así como su área de instalación. Se concluye también que la adopción de sistemas PV centralizados llevó a una reducción del 28,9 % en la inversión total en el escenario más a largo plazo. En el escenario para el 2025, con el 2 % de penetración de mercado de los VEB, la opción para el sistema PV centralizado llevó a una reducción del 17,5 % en el costo total de instalación del SHGE. Estas diferencias de costo de capital por vatio instalado entre los sistemas de mayor y de menor porte se deben a las ganancias de escala en el mercado de los equipos PV.

Finalmente, si por un lado, la generación fotovoltaica centralizada tiene menor costo de instalación, por otro, la generación distribuida es un mejor promotor del desarrollo social, al mover mano de obra local y favorecer pequeñas empresas, además del beneficio de la compensación de la energía generada por parte de los usuarios de generación distribuida residencial, con significativa reducción de los gastos en electricidad.

## Referencias

- [1] K. Reiche, A. Covarrubias, and E. Martinot, "Expanding electricity access to remote areas: Off-grid rural electrification in developing countries," *WorldPower2000*, pp. 52–60, 2000. [Online]. Available: <https://goo.gl/4d6m7k>
- [2] T. Hirota, "Task 17 pv for transport draft task workplan for 2018-2020," Waseda University, Tech. Rep., 2017. [Online]. Available: <https://goo.gl/jDegU4>
- [3] Bloomberg New Energy Finance, "Electric vehicle outlook 2017," Bloomberg Finance L.P, Tech. Rep., 2017. [Online]. Available: <https://goo.gl/BNtKZe>
- [4] A. Poullikkas, "Sustainable options for electric vehicle technologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 41, pp. 1277–1287, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.016>

- [5] J. J. Roberts, S. Thibaud, and P. O. Prado, "Proyecto de un sistema híbrido de generación con energías renovables para un establecimiento rural aislado," in *XI Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission "Bioenergy for Electricity Generation" and "Ecological Issues in Power Plants"*, At São José dos Campos, Brazil, 2015. [Online]. Available: <https://goo.gl/omxcph>
- [6] A. Cassula, P. O. Prado, J. L. Silveira, and J. J. Roberts, *Energía: Investigaciones en América del Sur*, 1st ed. Editorial de la Universidad del Sur, 2017, ch. Dimensionamiento de Sistemas Híbridos de Generación de Energía, pp. 109–136. [Online]. Available: <https://goo.gl/yBQo3y>
- [7] T. Wilberforce, Z. El-Hassan, F. Khatib, A. A. Makky, A. Baroutaji, J. G. Carton, and A. G. Olabi, "Developments of electric cars and fuel cell hydrogen electric cars," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 40, pp. 25 695–25 734, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.054>.
- [8] V. Gass, J. Schmidt, and E. Schmid, "Analysis of alternative policy instruments to promote electric vehicles in austria," *Renewable Energy*, vol. 61, pp. 96–101, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.08.012>.
- [9] E. Talebizadeh, M. Rashidinejad, and A. Abdollahi, "Evaluation of plug-in electric vehicles impact on cost-based unit commitment," *Journal of Power Sources*, vol. 248, pp. 545–552, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.09.009>.
- [10] K. Seddig, P. Jochem, and W. Fichtner, "Integrating renewable energy sources by electric vehicle fleets under uncertainty," *Energy*, vol. 141, pp. 2145–2153, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.140>.
- [11] M. Honarmand, A. Zakariazadeh, and S. Jadid, "Integrated scheduling of renewable generation and electric vehicles parking lot in a smart microgrid," *Energy Conversion and Management*, vol. 86, pp. 745–755, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.06.044>.
- [12] W. Liu, W. Hu, H. Lund, and Z. Chen, "Electric vehicles and large-scale integration of wind power – the case of inner mongolia in china," *Applied Energy*, vol. 104, pp. 445–456, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.003>.
- [13] D. B. Richardson, "Electric vehicles and the electric grid: A review of modeling approaches, impacts, and renewable energy integration," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 19, pp. 247–254, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.042>. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112006557>
- [14] L. D. D. Harvey, *Energy and the New Reality 2: Carbon-free Energy Supply*, Earthscan, Ed., 2010. [Online]. Available: <https://goo.gl/RzPzu4>
- [15] J. E. Campbell, D. B. Lobell, and C. B. Field, "Greater transportation energy and ghg offsets from bioelectricity than ethanol," *Science*, vol. 324, no. 5930, pp. 1055–1057, 2009. DOI: <http://doi.org/10.1126/science.1168885>.
- [16] A. R. Bhatti, Z. Salam, M. J. B. A. Aziz, K. P. Yee, and R. H. Ashique, "Electric vehicles charging using photovoltaic: Status and technological review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 54, pp. 34–47, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.091>.
- [17] F. Mwasilu, J. J. Justo, E.-K. Kim, T. D. Do, and J.-W. Jung, "Electric vehicles and smart grid interaction: A review on vehicle to grid and renewable energy sources integration," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 34, pp. 501–516, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.031>.
- [18] S. J. Chiang, H. J. Shieh, and M. C. Chen, "Modeling and control of pv charger system with sepic converter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 11, pp. 4344–4353, Nov 2009. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.2005144>.
- [19] J. L. Silveira, C. E. Tuna, and W. de Queiroz Lamas, "The need of subsidy for the implementation of photovoltaic solar energy as supporting of decentralized electrical power generation in Brazil," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 20, pp. 133–141, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.054>.
- [20] M. G. Villalva and J. R. Gazoli, *Energía solar fotovoltaica: conceitos e aplicações*, ERICA, Ed., 2012. [Online]. Available: <https://goo.gl/CJKrDF>
- [21] M. Benaouadj, A. Aboubou, M. Becherif, M. Y. Ayad, and M. Bahri, "Recharging of batteries/supercapacitors hybrid source for electric vehicles application using photovoltaic energy in a stand-alone point," in *2012 First International Conference on Renewable Energies and Vehicular Technology*, March 2012. DOI: <https://doi.org/10.1109/REVET.2012.6195264>, pp. 161–166.
- [22] J.-H. Song, Y.-S. An, S.-G. Kim, S.-J. Lee, J.-H. Yoon, and Y.-K. Choung, "Power output analysis of transparent thin-film module in building integrated photovoltaic system (bipv)," *Energy*

- and Buildings*, vol. 40, no. 11, pp. 2067–2075, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.05.013>.
- [23] N. Altin and T. Yildirimoglu, “Labview/matlab based simulator for grid connected pv system,” in *4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, May 2013. DOI: <https://doi.org/10.1109/PowerEng.2013.6635804>, pp. 1316–1321.
- [24] E. B. Pereira, F. R. Martins, S. L. de Abreu, and R. Rütther, *Atlas Brasileiro de Energia Solar*. SWERA, 2017. [Online]. Available: <https://goo.gl/8Sr1tG>
- [25] CCEE. (2015) 3º leilão de fontes alternativas (3º lfa). Camara de Comercialização de Energia Elétrica. [Online]. Available: <https://goo.gl/Sy8iWg>
- [26] MME, *Boletim mensal de monitoramento do setor elétrico*, Ministério de Minas e Energia, 2017.
- [27] R. L. Nascimento, “Energia solar no Brasil: situação e perspectivas,” Camara dos Deputados. Brasil., Tech. Rep., 2017. [Online]. Available: <https://goo.gl/gmSddm>
- [28] ANEEL, *Resolução normativa n. 687, Altera a Resolução Normativa n 482, Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição - PRODIST*, Agencia Nacional de Energia Elétrica. Brasil Std., 2017. [Online]. Available: <https://goo.gl/T6PiFn>
- [29] —, *Nota Técnica n. 0056/2017-SRD/ANEEL, Atualização das projeções de consumidores residenciais e comerciais com microgeração solar fotovoltaicos no horizonte 2017-2024*, Agencia Nacional de Energia Elétrica. Brasil Std., 2017. [Online]. Available: <https://goo.gl/uq4L3i>
- [30] IBGE, *Conheça cidades e estados do brasil*, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2017. [Online]. Available: <https://goo.gl/nCPqGJ>
- [31] Itapemar Hotel. (2017) Mapa de bolso - ilhabela. [Online]. Available: <https://goo.gl/zW4mFS>
- [32] P. M. de Ilhabela, *Plano Municipal Integrado de Saneamiento Básico*, Governo do Estado de São Paulo, 2015. [Online]. Available: <https://goo.gl/4WVGst>
- [33] W. Q. Lamas, “Análise termoeconômica de uma mini-estação de tratamento de esgoto com auto-suficiência energética,” Ph.D. dissertation, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2007. [Online]. Available: <https://goo.gl/8jqjJu>
- [34] CRESESB. (2018) Potencial solar - sundata v 3.0. Centro de referência para energia solar e eólica Sérgio Brito. [Online]. Available: <https://goo.gl/Ae2cUG>
- [35] G. M. Fetene, S. Kaplan, S. L. Mabit, A. F. Jensen, and C. G. Prato, “Harnessing big data for estimating the energy consumption and driving range of electric vehicles,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 54, pp. 1–11, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.04.013>.
- [36] R. Baran and L. F. L. Legey, “The introduction of electric vehicles in brazil: Impacts on oil and electricity consumption,” *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 80, no. 5, pp. 907–917, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2012.10.024>.
- [37] J. B. Soares, “Matriz elétrica brasileira e matriz elétrica brasileira e as rei’s,” in *Empresa de Pesquisa Energética, Ministério de Minas e Energia*, 2016. [Online]. Available: <https://goo.gl/q5GnBS>
- [38] E. F. Choma and C. M. L. Ugaya, “Environmental impact assessment of increasing electric vehicles in the brazilian fleet,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 152, pp. 497–507, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.091>.
- [39] V. Pecora, “Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da usp,” Master’s thesis, Univeside de São Paulo (Instituto de Eletrotécnica e Energia). Brasil, 2006. [Online]. Available: <https://goo.gl/n35Ysr>
- [40] S. T. Coelho, S. M. S. G. Velazquez, O. S. Martins, and F. C. de Abreu, “Sewage biogas conversion into eletricity,” in *Anais do 6. Encontro de Energia no Meio Rural, 2006, Campinas (SP, Brasil)*, 2006. [Online]. Available: <https://goo.gl/X6LWYt>
- [41] J. C. Galarza, O. Llerena, and J. L. Silveira, “Thermodynamic and economic analysis of cogeneration system applied in biodiesel production,” in *XI Latin-American congress electricity generation and transmission - CLAGTEE 2015*, 2015. [Online]. Available: <https://goo.gl/9KuUc6>
- [42] A. T. França Junior, “Análise do aproveitamento energético do biogás produzido numa estação de tratamento de esgoto. 2008,” Master’s thesis, Universidade Estadual Paulista (UNESP). Brasil, 2008. [Online]. Available: <https://goo.gl/yAA3zq>

- [43] D. F. da Costa, “Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto. 2006,” Master’s thesis, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Brasil, 2006. [Online]. Available: <https://goo.gl/U8u5qM>
- [44] O. Llerena, “Análisis energético, exergético y económico de un sistema de cogeneración: Caso para una planta azucarera de San Pablo,” *INGENIUS*, no. 19, pp. 29–39, 2018. textscdoi: <https://doi.org/10.17163/ings.n19.2018.03>. 2018.
- [45] GTW. (2012) 2012 gtw handbook. Gas Turbine World. PequotPublishing Inc. [Online]. Available: <https://goo.gl/qmjxen>
- [46] Y. Cengel and M. Boles, *Termodinámica*, M. G. Hill., Ed., 2015. [Online]. Available: <https://goo.gl/XCTYQU>
- [47] H. M. de Carvalho, “Desenvolvimento matemático para avaliação de desempenho de turbinas a gás de um eixo,” Master’s thesis, Universidade Federal de Itajubá. Brasil, 2006. [Online]. Available: <https://goo.gl/cSeUzQ>
- [48] H. I. H. Saravanamuttoo, G. F. Crichton Rogers, and H. Cohen, *Gas Turbine Theory*, P. Hall, Ed., 2001. [Online]. Available: <https://goo.gl/smXkp6>
- [49] M. M. Mahmoud and I. H. Ibrik, “Techno-economic feasibility of energy supply of remote villages in palestine by pv-systems, diesel generators and electric grid,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 10, no. 2, pp. 128–138, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.09.001>.
- [50] D. I. Marinovski, I. T. Salamoni, and R. Ruther, “Pré-dimensionamento de sistema solar fotovoltaico: estudo de caso do edifício sede do crea-sc,” in *I Conferência Latino-Americana De Construção Sustentável X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. São Paulo. ANTAC*, 2004. [Online]. Available: <https://goo.gl/QxnFCa>
- [51] Greener. (2017) Em 12 meses, preço dos sistemas fotovoltaicos cai 24%. Greener. Pesquisa, Estratégia, Inovação. [Online]. Available: <https://goo.gl/iLbso8>



# MÓDULOS ELÁSTICOS EQUIVALENTES PARA PREDICCIÓN DE DEFORMACIONES EN ARTICULACIONES

## EQUIVALENT ELASTIC MODULUS FOR PREDICTION OF DEFORMATIONS IN JOINTS

Franco Marinelli<sup>1</sup>, Brenda A. Weiss<sup>1,\*</sup>, Marcelo E. Berli<sup>1</sup>, José Di Paolo<sup>1</sup>

### Resumen

En el estudio de la mecánica de contacto de las articulaciones humanas, la deformación de las superficies en contacto es fundamental porque posibilita un canal por el que fluye el lubricante reduciendo el desgaste. Para determinar la validez de las predicciones de los desplazamientos de estas superficies a partir de distintos métodos, estos se aplican al estudio del contacto seco y estático de articulaciones de rodilla y de cadera, sanas y protésicas. Aplicando una carga hertziana, se evaluaron tres módulos elásticos equivalentes en un modelo simplificado de columna: el correspondiente a un sólido de pequeño espesor, el correspondiente a un sólido semiinfinito o de Winkler y el correspondiente a un sólido semiinfinito corregido. Los resultados se contrastaron con la solución obtenida resolviendo numéricamente las ecuaciones de elasticidad mediante el método de elementos finitos (MEF). Los resultados para el módulo de Young correspondiente a un material de pequeño espesor, son los que mejor se aproximan a los obtenidos por el MEF. Se demuestra también, que los módulos de Young derivados de la aproximación de sólido semiinfinito son inapropiados. Asimismo, con este trabajo se ha entrenado un becario en las artes de la Mecánica Computacional.

**Palabras clave:** cadera, contacto lineal, contacto puntual, elementos finitos, lubricación, rodilla.

### Abstract

When studying human joints contact mechanics, the surfaces deformations are relevant as they enable a lubrication flow channel that reduces wear. In order to determine the validity of different methods to predict the surfaces displacements, they were applied to the dry and static contact of healthy and prosthetic joints, both for knee and hip joints. Three equivalent elastic modulus for a simplified column model were evaluated: elastic modulus for a layer solid, elastic modulus for a semi-infinite solid (or Winkler elastic modulus) and elastic modulus for a corrected semi-infinite solid. A hertzian load was considered for all cases. The results were compared with the solution of the elasticity equations by means of the finite element method (FEM). The results for the Young's modulus, corresponding to a material as a layer, are those that best approximate the FEM prediction. It is also shown that the Young's module derived from the semi-infinite approximation are inappropriate. Likewise, this work allowed the training of an undergraduate student in Computational Mechanics.

**Keywords:** finite element, hip joint, knee joint, lineal contact, lubrication, punctual contact.

<sup>1,\*</sup>Grupo Biomecánica Computacional, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Entre Ríos, Argentina. Autor para correspondencia ✉: [bweiss@ingenieria.uner.edu.ar](mailto:bweiss@ingenieria.uner.edu.ar).

<https://orcid.org/0000-0001-5919-9614>, <https://orcid.org/0000-0002-0514-1756>,

<https://orcid.org/0000-0001-9404-6787>, <https://orcid.org/0000-0002-6964-1864>.

Recibido: 21-05-2018, aprobado tras revisión: 14-06-2018

Forma sugerida de citación: Marinelli, F.; Weiss, B.; Berli, M. y Di Paolo, J. (2018). «Módulos elásticos equivalentes para predicción de deformaciones en articulaciones». INGENIUS. N.º 20, (julio-diciembre). pp. 70-82. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n20.2018.07>.

## 1. Introducción

Las articulaciones humanas de rodilla y cadera permiten el movimiento relativo entre los huesos que las componen, fémur y tibia en el primer caso, cadera y fémur en el segundo.

Siendo el desgaste el principal factor limitante de la vida útil de los implantes de rodilla y cadera [1], y ante la necesidad de prótesis más duraderas evidenciada en el incremento de artroplastias de revisión proyectadas para el año 2030 [2, 3], el estudio de la mecánica del contacto articular adquiere gran importancia.

Tanto en las articulaciones sanas como en las protésicas, las superficies articulares están lubricadas por líquido sinovial y el régimen de lubricación depende, entre otros factores, de la deformación que sufren las superficies articulares en contacto.

Numerosos estudios del contacto lubricado en articulaciones humanas expresan los desplazamientos que sufren las superficies articulares mediante modelos aproximados que simplifican el sistema de ecuaciones reduciendo el esfuerzo computacional para resolverlo [4, 5]. Estos modelos son válidos para materiales elásticos lineales de baja rigidez y de «pequeño espesor» (*layer* en inglés), en los cuales la dimensión en la dirección de la carga es al menos un orden de magnitud menor que las otras dimensiones [6]. En tal caso, el desplazamiento en un punto de la superficie del sólido, se asimila al de una columna aislada (no conectada con su entorno) de un material que posee propiedades elásticas expresadas a través de un módulo elástico o de Young, denominado equivalente.

Pueden mencionarse tres módulos de Young equivalentes que pueden incluirse en los modelos de desplazamiento de columna y que son objeto de análisis y comparación en este trabajo: el módulo de Young equivalente que surge de considerar un sólido de pequeño espesor [6], y dos módulos de Young denominados de Winkler [7] y semiinfinito corregido (SIC) ambos derivados de considerar un sólido semiinfinito.

En este trabajo se evalúan casos representativos de articulaciones sanas y protésicas, aplicando los tres módulos elásticos mencionados, y los resultados obtenidos se comparan con los arrojados por la solución del problema elástico en el material, a través de la resolución de la ecuación diferencial de elasticidad lineal, utilizando cálculo numérico basado en el método de elementos finitos (MEF). Esta solución se asume como la solución exacta [8].

Si bien las articulaciones de rodilla y cadera, sanas y protésicas, se encuentran lubricadas por el fluido sinovial, suelen considerarse como un contacto seco y estático [9, 10], observándose en algunos casos perfiles de presión prácticamente iguales que los obtenidos a partir de modelos elastohidrodinámicos [11]. Por lo tanto, en este trabajo se aplica en todos los casos una carga hertziana.

Todos los problemas de contacto son inherentemente no lineales ya que el área de contacto depende, en forma no lineal, de la carga [9, 12]. En el presente trabajo se considera una geometría de tipo cilindro sobre plano (del inglés CoP, situación de contacto lineal) equivalente a la rodilla y una geometría de tipo esfera sobre plano (del inglés SoP, situación de contacto puntual) equivalente a la cadera [13–15].

El presente artículo es producto de las actividades de formación y entrenamiento en las artes de la Mecánica Computacional de un alumno avanzado de la carrera de Bioingeniería, en tanto becario de iniciación a la investigación del proyecto marco en el que se inscribe este trabajo.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Modelo CoP

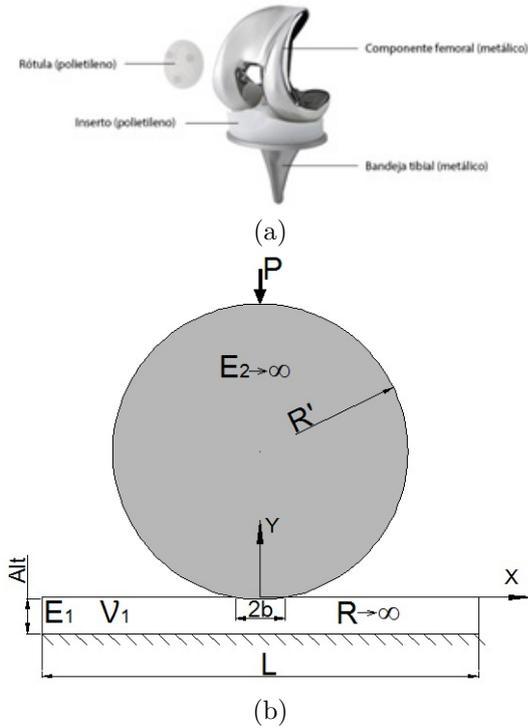
La articulación de rodilla, tanto la natural como la protésica, puede abstraerse físicamente como un cuerpo cilíndrico lleno en contacto lineal con un cuerpo cilíndrico hueco. En tal abstracción se desprecia la curvatura en la dirección medial-lateral de los elementos en contacto (componentes tibial y femoral). Adicionalmente, cuando la región de contacto es pequeña en comparación con el radio de los cilindros, el contacto entre dos rodillos puede representarse por el contacto de un rodillo equivalente y un plano. El cilindro equivalente (ver Figura 1) tiene la curvatura combinada de los cilindros considerados inicialmente, es decir, en este caso el radio  $R'$  se obtiene a partir de los radios del cóndilo femoral (o componente femoral,  $R_2$ ) y el radio del platillo tibial (o componente tibial,  $R_1$ ). En la Figura 1b se observa la representación equivalente y el sistema de ejes coordenados, siendo el eje  $x$  coincidente con la dirección antero-posterior (y de movimiento de la rodilla), el eje  $y$  coincide con la dirección de aplicación de la carga y el eje  $z$  con la dirección medial-lateral.

La razón fundamental de esta aproximación geométrica es la posibilidad de plantear para el problema elástico y también en el caso del contacto lubricado, un modelo de flujo en coordenadas cartesianas [16, 17]. Esta descripción es más simple de resolverse, no solo analíticamente en algunos casos, sino también numéricamente.

El contacto lineal produce un estado de deformaciones planas independiente de la dirección medial-lateral. En este trabajo se define como  $H$  a la longitud de una articulación de rodilla en esta dirección (ver Tabla 1).

De acuerdo con lo expresado, la articulación de rodilla puede modelarse como un cilindro indeformable sobre un sólido plano de baja rigidez como el representado en la Figura 1b. El espesor del sólido plano representará el espesor conjunto de los cartílagos natu-

rales en una articulación sana (ver sección 2.5). Para el caso de la articulación protésica el material deformable es polietileno de ultra alto peso molecular (del inglés UHMWPE), que posee un módulo de elasticidad 100 veces menor al del componente femoral ya que en general este se fabrica de una aleación de titanio o acero inoxidable de grado médico (AISI 316L entre otros).



**Figura 1.** (a) Prótesis total de rodilla [18].  
(b) Representación equivalente en un contacto CoP

**Tabla 1.** Parámetros utilizados para la simulación de articulaciones de rodilla

	Descripción	Valor
$F$	Carga	$2,352 \times 10^3$ [N]
$H$	Ancho del material asumido en la dirección del eje del cilindro	0,03 [m]
$R_1$	Radio del cóndilo femoral	0,033 [m]
$R_2$	Radio del platillo tibial	0,045 [m]
$R'$	Radio equivalente	0,1237 [m]
$v_1$	Coefficiente de Poisson	0,4
$P$	Carga por unidad de longitud	$78,400 \times 10^3$ [N/m]

### 2.1.1. Carga hertziana

La carga hertziana actuante para el contacto seco de la Figura 1b [16], sigue una distribución en forma de semi-elipse para la carga específica por unidad de área, como muestra la Ecuación (1):

$$q(x) = \frac{q_0}{b} \sqrt{b^2 - x^2} \quad (1)$$

Donde  $q_0$  es la carga específica máxima por unidad de área, actuante en el centro del contacto, es decir, en el centro del segmento de longitud  $2b$ , y está dada por:

$$q_0 = \left[ \frac{P(R_1 + R')}{\pi^2(R_1 R')(k_1 + k_2)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$P$  es la carga por unidad de longitud en la dirección del eje del cilindro. El valor de  $P$  está dado por la relación entre la carga total  $F$  sobre el contacto y la longitud del cilindro  $H$ :

$$P = \frac{F}{H} \quad (3)$$

El término  $\frac{(R_1 + R')}{(R_1 R')}$  se toma como  $\frac{1}{R'}$  por tender  $R_1$  a infinito. Las constantes  $k_i$  de la Ecuación 2 contienen las propiedades del material elástico lineal: el módulo de Young y el coeficiente de Poisson. Dados los parámetros de la Figura 1b,  $k_2$  resulta nula, luego:

$$k_1 = \frac{1 - v_1^2}{\pi E_1} \quad (4)$$

Finalmente, la carga  $q_0$  queda definida por:

$$q_0 = \left[ \frac{P}{\pi^2 R' k_1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

El semiancho  $b$  del contacto está dado por:

$$b = \sqrt{\frac{4P(k_1 + k_2 R_1 R')}{R_1 + R'}} \quad (6)$$

y teniendo en cuenta las consideraciones previas

$$b = \sqrt{4P k_1 R'} \quad (7)$$

donde el radio  $R'$  [16] viene dado por:

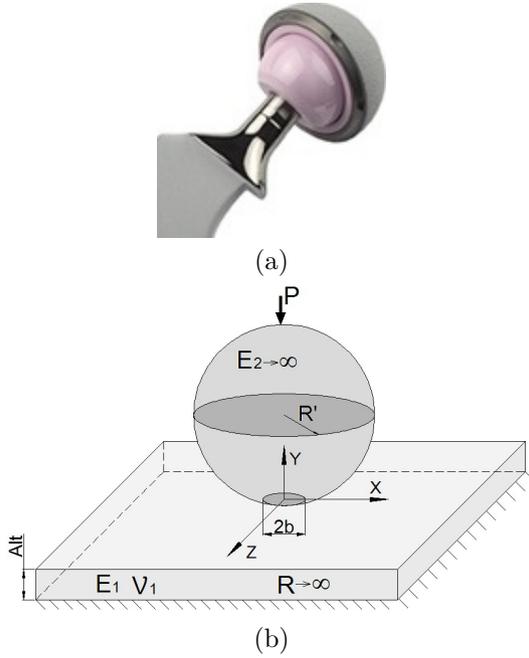
$$R' = \frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1} \quad (8)$$

## 2.2. Modelo SoP

La articulación de cadera o coxofemoral puede abstraerse físicamente como un cuerpo esférico lleno en contacto puntual con un cuerpo esférico hueco como se muestra en la Figura 2a. Este modelo geométrico usualmente se denomina de tipo esfera-en-casquete (*ball-in-socket*) y se caracteriza por el radio de la cabeza femoral (superficie esférica convexa), el radio del acetábulo (superficie esférica cóncava), y el espacio entre ambas superficies (*clearance*  $c^*$ ). Las ecuaciones que gobiernan este modelo se expresan en coordenadas esféricas, por lo tanto, requieren un análisis en 3 dimensiones [11].

Un modelo equivalente, que permite expresar las ecuaciones gobernantes en coordenadas cartesianas –y simplificar su resolución al convertirlo en un problema en 2 dimensiones–, es el denominado esfera-sobre-plano (*ball-on-plane*) que se muestra en la Figura 2b [19].

Tanto una articulación de cadera sana como una prótesis pueden modelarse geoméricamente como una esfera sobre un plano deformable. Esta aproximación es válida cuando se trata de regiones de contacto pequeñas en comparación con el radio de las superficies esféricas. La esfera equivalente tiene un radio  $R'$  que se obtiene a partir del radio de la cabeza femoral ( $R_2$ ) y del radio interior del acetábulo ( $R_1$ ), de modo que la esfera en contacto con el plano posea la curvatura combinada de las esferas de la Figura 2a.



**Figura 2.** La geometría posee simetría polar. (a) Prótesis total de cadera [18]. Se destacan en rosa la cabeza femoral y el acetábulo. (b) Representación equivalente en un contacto SoP.

**Tabla 2.** Parámetros utilizados para la simulación de articulaciones de cadera

	Articulación sana	Articulación protésica
$P$	$2,352 \times 103$ [N]	$2,352 \times 103$ [N]
$R1$	0,021 [m]	0,018 [m]
$c^*$	400 [μm]	80 [mm]
$R'$	1,07 [m]	4,1 [μm]
$n$	0,4	0,4
$E$	10 [MPa]	1 [GPa]

### 2.2.1. Estimación de la carga

Para la determinación de la carga en la superficie de contacto seco, se utilizó el modelo hertziano para una esfera sobre un plano.

$$q(r) = \frac{q_0}{b} \sqrt{b^2 - r^2} \quad (9)$$

Donde  $q_0$  es la carga máxima por unidad de área, actuante en el centro de la superficie circular de contacto de radio  $b$ .

$$q_0 = \frac{3}{2} \frac{P}{b^2 \pi} \quad (10)$$

$P$ , en este caso, es la carga total ejercida sobre la esfera. El radio  $b$ , viene dado por:

$$b = \sqrt[3]{\frac{3PR'}{4K}} \quad (11)$$

siendo  $K$

$$K = \left( \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \quad (12)$$

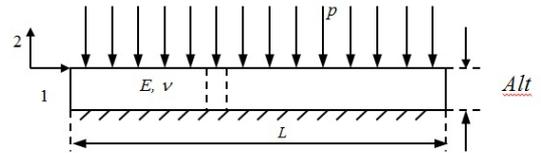
Dado que  $E_2$  es 2 órdenes de magnitud mayor que  $E_1$ , podría asumirse que  $E_2$  tiende a infinito, entonces  $K$  resulta:

$$K = \left( \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} \right)^{-1} \quad (13)$$

## 2.3. Módulos elásticos equivalentes

### 2.3.1. Modelo de columna para material de pequeño espesor (PE)

Este modelo se basa en suponer que el material deformable está compuesto de columnas de sección transversal a la carga (ver Figura 3) con tamaño diferencial. Cada columna se encuentra en contacto lateral con columnas de iguales características, siendo despreciables las fuerzas tangenciales entre ellas [6].



**Figura 3.** Sólido de pequeño espesor sujeto a una compresión en la dirección del espesor.

Asumiendo al sólido como elástico lineal, la relación entre tensiones ( $T$ ) y deformaciones ( $E$ ) está dada por la ley de Hooke que, en términos de las constantes de Lamé ( $\mu$  y  $\lambda$ ) y en notación indicial, se expresa:

$$T_{i,k} = 2\mu E_{i,k} + \lambda E_{j,j} \delta_{i,k} \quad (14)$$

donde  $\delta_{i,k}$  es el delta de Kronecker y  $E$  y  $T$  son los tensores de deformaciones y tensiones respectivamente. Si se asume que el material considerado es elástico lineal, de baja rigidez y pequeño espesor, cargado a compresión en la dirección de su espesor (dirección y o 2 en índices), luego, la tensión normal en la dirección y es mucho mayor que las otras, que pueden por lo tanto despreciarse. Del mismo modo, son despreciables las

deformaciones que no sean el acortamiento relativo en la dirección  $y$ . La ley de Hooke queda:

$$T_{y,y} = (2\mu + \lambda)E_{y,y} \quad (15)$$

lo cual es equivalente a la ley de Hooke para una columna sola de módulo elástico  $(2\mu + \lambda)$ , luego (ver Figura 1b):

$$E_{y,y} = -\frac{d}{Alt} \quad (16)$$

$$T_{y,y} = -p \quad (17)$$

Donde  $p$  es la tensión normal a las superficies en contacto,  $d$  es el desplazamiento superficial y  $Alt$  es el espesor del material de baja rigidez.

$$p = (2\mu + \lambda)\frac{d}{Alt} = E_c'' \frac{d}{Alt} \quad (18)$$

Donde  $E_c''$  es el módulo elástico equivalente, que en términos del módulo de Young ( $E_1$ ) y el coeficiente de Poisson ( $v_1$ ) del componente tibial se expresa:

$$E_c'' = \frac{E_1(1 - v_1)}{(1 + v_1)(1 - 2v_1)} \quad (19)$$

### 2.3.2. Módulo elástico equivalente de Winkler (W) y de sólido semiinfinito corregido (SIC)

El módulo equivalente de Winkler, surge del caso de un sólido limitado por un plano y con profundidad infinita en la dirección normal a dicho plano. En esa dirección normal actúa una carga de contacto distribuida sobre el plano, que produce desplazamientos en todo punto del sólido. El problema elástico se describe por una función potencial de la cual se obtienen las tensiones  $y$ , en virtud de la ley de Hooke, los desplazamientos en cada punto. La función potencial o función de Airy, posee una expresión para el contacto lineal y otra para el contacto puntual.

Para una distribución de carga, tanto para el caso de contacto lineal [16] como el de contacto puntual [17], los desplazamientos combinados de las superficies que delimitan dos sólidos distintos en contacto, son equivalentes a dos veces el desplazamiento de un sólido con un módulo elástico «reducido» o «equivalente», que vincula las propiedades elásticas de ambos sólidos:

$$\frac{1}{E'} = \frac{1}{2} \left[ \frac{1 - v_1^2}{E_1} + \frac{1 - v_2^2}{E_2} \right] \quad (20)$$

En el caso particular en que ambos sólidos en contacto sean iguales, el módulo equivalente  $E'$  toma la expresión (21) y se denomina de Winkler:

$$E_w' = \frac{E_1}{1 - v_1^2} \quad (21)$$

El módulo de Winkler es por tanto aplicable solo para el caso de articulaciones naturales, en donde ambas superficies corresponden al cartílago articular y ha sido utilizado en publicaciones científicas [7].

Como se discutió previamente, en el caso de las articulaciones protésicas, el módulo de elasticidad del componente femoral ( $E_2$ ) es 2 órdenes de magnitud mayor que  $E_1$ , entonces el módulo de elasticidad obtenido a partir de la Ecuación (20) resulta.

$$E_{SIC}' \approx \frac{2E_1}{1 - v_1^2} = 2E_w' \quad (22)$$

Se denomina a  $E_{SIC}'$  módulo elástico equivalente de sólido semiinfinito corregido (SIC) dado que es otro caso particular de la Ecuación (20).

Notar que  $E_w'$  y  $E_{SIC}'$  son menores que  $E_c''$  para todos los valores de  $E$  y  $v$  que se consideren. De aquí, que uno de los objetivos de este trabajo es determinar la validez de utilizar  $E_w'$ ,  $E_c''$  y  $E_{SIC}'$  en una aplicación concreta.

### 2.4. Modelos de desplazamiento

Para determinar el desplazamiento que sufren las superficies en cada caso a analizar, se utilizó la expresión (18), para la cual la presión de contacto es la carga específica por unidad de área  $q$  del contacto hertziano. En el caso de la prótesis de rodilla la carga varía longitudinalmente con la coordenada transversal al eje del cilindro (Ecuación 1), mientras que para la articulación de la cadera, la carga varía radialmente (Ecuación 9). Luego, los desplazamientos en cada caso son:

$$d(x) = \frac{Alt}{E_i''} q(x) \quad (23)$$

$$d(r) = \frac{Alt}{E_i''} q(r) \quad (24)$$

Donde  $d$  es el desplazamiento de la superficie y  $E_i''$  es el módulo elástico equivalente, que se varía para el análisis entre los obtenidos para: material de pequeño espesor ( $E_c''$ ), sólido semiinfinito o de Winkler ( $E_w'$ ) y sólido semiinfinito corregido ( $E_{SIC}'$ ).

### 2.5. Parámetros para la simulación de articulaciones de rodilla

Para el caso de articulaciones de rodilla se utilizaron los parámetros mostrados en la Tabla 1.

Usualmente se considera que la fuerza máxima promedio que soporta una articulación de la extremidad inferior es aproximadamente tres veces el peso corporal de la persona en la mayoría de las actividades diarias como caminar, subir escaleras y pararse en una pierna [20,21]. Considerando una persona con una masa corporal (MC) de 80 kg, la carga total  $F$  sobre el contacto será 2352 [N] ( $F = MC[kg] \times 3 \times 9,8[m/s^2]$ ). La

carga por unidad de longitud  $P$  se calcula de acuerdo con la Ecuación (3), asumiendo que la longitud del cilindro  $H$  es de 0,03 [m].

Para la articulación sana el módulo de elasticidad del cartílago articular es de 10 MPa [22], y para el caso de la articulación protésica, este es de 1 GPa para el UHMWPE [19]. Tanto el cartílago como el UHMWPE poseen un coeficiente de Poisson de 0,4.

Para esta simulación se utilizan tres espesores para el material deformable: 1,2, 2 y 2,5 mm para el espesor conjunto de ambas capas de cartílago [23] y 8, 10 y 12 mm para el caso de la articulación protésica hecha de UHMWPE [24].

## 2.6. Articulación de cadera

Para el caso de articulaciones de cadera se utilizaron los parámetros mostrados en la Tabla 2.

Al igual que en el caso de la articulación de rodilla, se considera una persona con una masa corporal (MC) de 80 kg y la carga total soportada por la articulación es aproximadamente 3 veces el peso corporal de la persona [25].

Debe aclararse que la constante  $c^*$  es la diferencia entre el radio del acetábulo y el radio de la cabeza femoral ( $R_2 - R_1$ ).

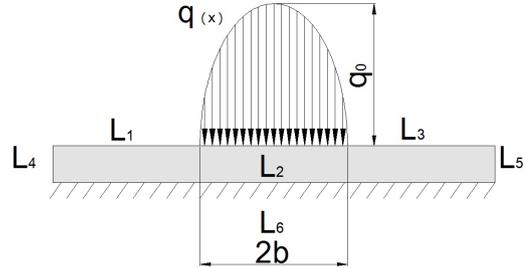
Para esta simulación se utilizan tres espesores para el material deformable: 1,2, 2 y 2,5 mm para el espesor conjunto de ambas capas de cartílago y 8, 10 y 12 mm para el caso de la articulación protésica hecha de UHMWPE.

## 2.7. Obtención de resultados mediante MEF

El cálculo por elementos finitos se realiza utilizando el módulo de Mecánica Estructural del *software* con licencia COMSOL Multiphysics 5.3. Las geometrías analizadas se discretizaron con elementos *Lagrange* cuadráticos, tetraédricos para los volúmenes y triangulares para las superficies. En cualquier caso y en las geometrías correspondientes, la ecuación diferencial de elasticidad lineal y las ecuaciones de compatibilidad, precargadas en el módulo de Mecánica Estructural, se resolvieron utilizando el resolvidor directo MUMPS, disponible en COMSOL Multiphysics. Las condiciones de contorno empleadas se describen seguidamente.

Para la articulación de la rodilla la simulación se realiza en un dominio 2D (señalado en gris en la Figura 4) ya que la carga no varía en la dirección del eje del cilindro. Las condiciones de contorno se establecen de la siguiente forma: los bordes  $L_1$ ,  $L_3$ ,  $L_4$  y  $L_5$  se definen como libres de tensión,  $L_6$  se establece fijo, es decir, con desplazamientos nulos, y en el borde  $L_2$  la tensión actuante es la carga hertziana específica  $q(x)$  definida en la Ecuación (1) (Figura 4). Debe notarse que el dominio utilizado es mayor que el sector de interés (el limitado por  $L_2$ ), debido a que el elevado

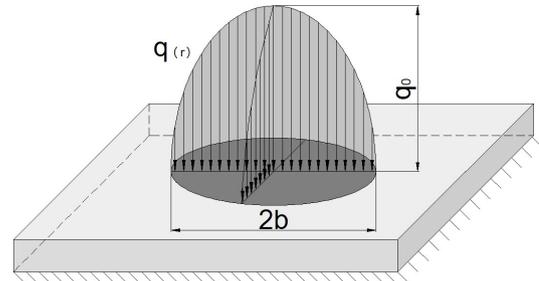
coeficiente de Poisson de los materiales simulados hace que estos actúen casi como incompresibles, deformándose en el sentido opuesto en parte de los sectores  $L_1$  y  $L_3$ . Por ello un dominio mayor permite que la simulación pueda cumplir con las condiciones de contorno impuestas.



**Figura 4.** Esquema del dominio para articulación de rodilla donde se resuelve el problema elástico mediante el MEF. Se presentan los bordes donde se aplican distintas condiciones de borde.

En el caso de la articulación de la cadera la simulación se realiza en un dominio 3D (señalado en gris en la Figura 5) debido a que la carga varía radialmente.

Para este caso la base del prisma que representa el material deformable se estableció fija y el resto de las caras están libres de tensiones, excepto el círculo central, de diámetro  $2b$ , en donde se ejerce la carga. Allí, la tensión actuante es la carga hertziana específica  $q(r)$  definida en la Ecuación (9).



**Figura 5.** Esquema del dominio para articulación de cadera donde se resuelve el problema elástico mediante el MEF.

## 3. Resultados y discusión

### 3.1. Articulación de rodilla

Para el caso de la articulación sana, donde se suponen dos capas de material delgado recubriendo los cóndilos femorales y el platillo tibial, los resultados de desplazamiento de las superficies en contacto se muestran en la Figura 6. Cabe destacar que los desplazamientos totales de ambos recubrimientos, son iguales al de uno solo con el doble del espesor (ver Ecuación 23). Por ello, los resultados que se muestran en la

Figura 6, corresponden a un sólido con el espesor de dos cartílagos.

Deben destacarse en la Figura 6 los desplazamientos positivos que predice la solución MEF tomada como exacta, debido a la cuasi incompresibilidad del material supuesto debido al elevado valor del coeficiente de Poisson, tal como se ha comentado en el ítem 2.6.

Mientras el modelo simplificado con el módulo elástico equivalente de Winkler estima desplazamientos excesivamente mayores al dado por la solución MEF, los cálculos utilizando el módulo elástico equivalente de sólido semiinfinito corregido los subestima para los casos analizados. Los resultados para el modelo simplificado con el módulo elástico equivalente correspondiente al sólido de pequeño espesor son los que mejor aproximación tienen respecto a los valores arrojados por la solución MEF, en la Figura 6 se ven superpuestas las curvas para PE y MEF.

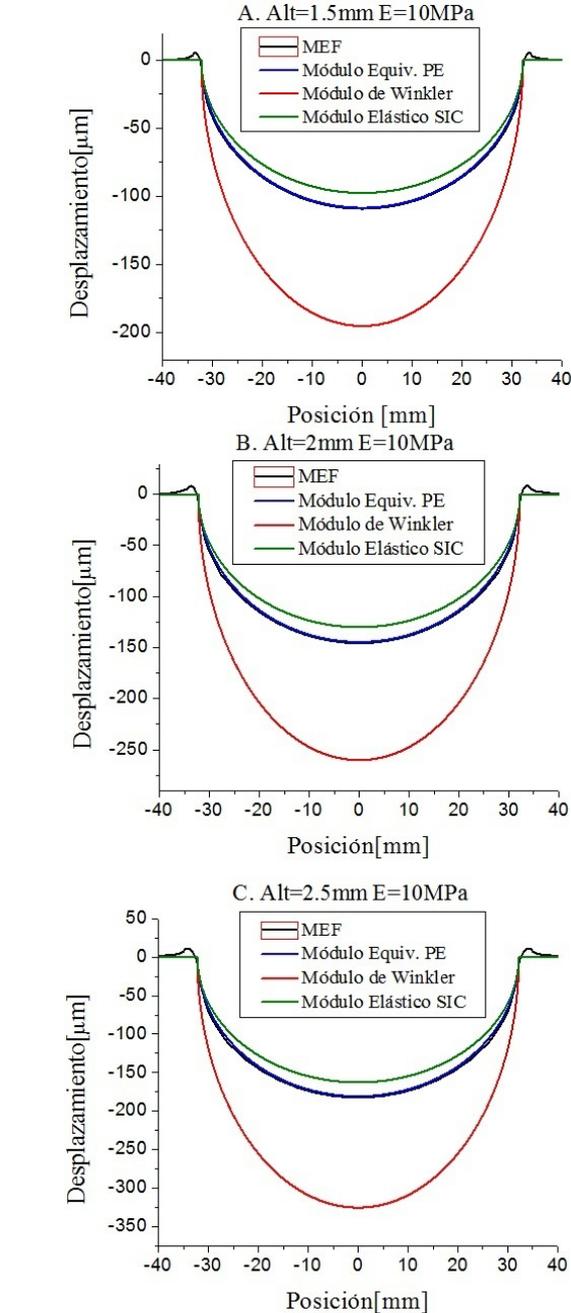
En la Tabla 3 por su parte, se muestran los desplazamientos máximos obtenidos para cada módulo elástico equivalente y el valor obtenido por la solución MEF. En la Tabla 4 se muestran las diferencias porcentuales correspondientes a la Tabla 3, siempre respecto a la solución MEF.

En la Figura 7 se observan los resultados obtenidos para el caso de la prótesis de rodilla. En la Tabla 5 se muestran los desplazamientos máximos para cada módulo elástico equivalente y el obtenido mediante MEF. En la Tabla 6 se muestra la diferencia porcentual correspondiente.

Es notoria la sobrestimación de los desplazamientos cuando se utiliza el módulo de Young equivalente de Winkler en el caso de la prótesis y esto se debe a que este módulo de elasticidad corresponde a un caso particular del módulo de elasticidad equivalente para sólido semiinfinito en donde ambas superficies en contacto tienen las mismas propiedades mecánicas, lo cual no sucede en articulaciones protésicas. Sin embargo, la validez del módulo de Winkler aplicado a articulaciones sanas (Figura 6) también queda en tela de juicio ya que asume un sólido semiinfinito y no una capa delgada como realmente ocurre con los cartílagos naturales.

**Tabla 3.** Desplazamiento máximo obtenido por el MEF y para el modelo simplificado con cada módulo elástico equivalente considerado para articulación de rodilla natural

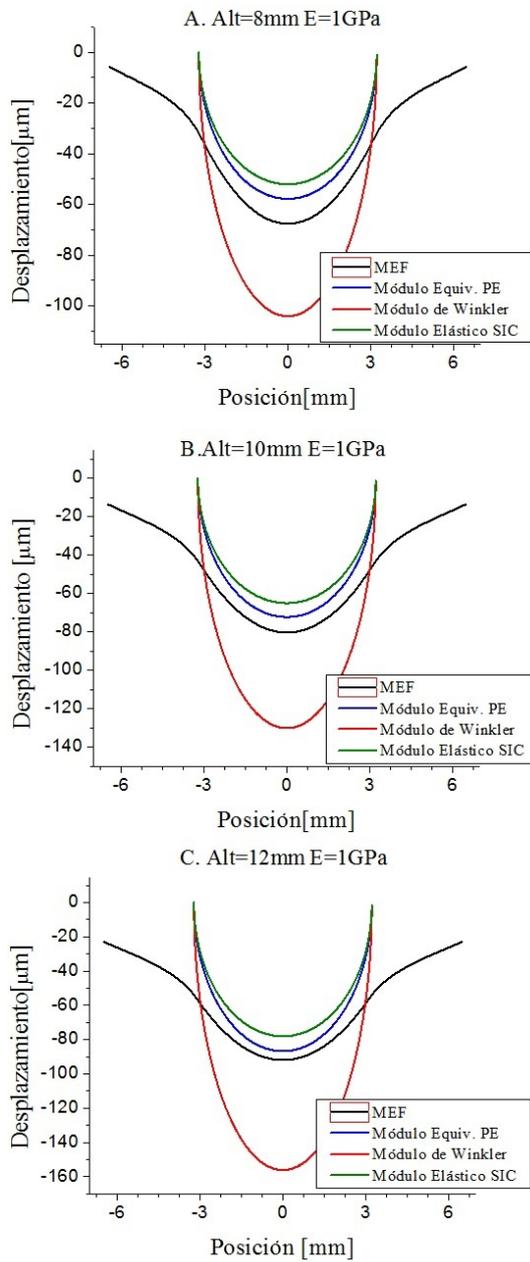
Alt [mm]	Desplazamiento máximo [ $\mu\text{m}$ ]			
	MEF	PE	W	SIC
1,5	109	108	196	98
2	145	144	260	130
2,5	182	181	326	163



**Figura 6.** Comparación de las curvas de desplazamiento de las superficies en contacto obtenidas para cada módulo elástico equivalente, en contraste con la solución obtenida por el MEF en el caso de una articulación sana.

**Tabla 4.** Diferencia porcentual de los resultados PE, W y SIC respecto al obtenido por MEF para articulación de rodilla natural

Alt [mm]	Diferencia porcentual [%]		
	PE	W	SIC
1,5	-0,91	79	-10,1
2	-0,69	79,3	-10,3
2,5	-0,55	78,6	-10,4



**Figura 7.** Comparación de las curvas de desplazamiento de las superficies en contacto obtenidas para cada módulo elástico equivalente, en contraste con la solución obtenida por el MEF en el caso de una articulación protésica.

**Tabla 5.** Desplazamiento máximo obtenido por MEF y para el modelo simplificado con cada módulo elástico equivalente considerado en prótesis de rodilla

Alt [mm]	Desplazamiento máximo [μm]			
	MEF	PE	W	SIC
8	68	58	104	52
10	80	72	130	65
12	92	87	156	78

La comparación de los resultados de las Figuras 6 y 7, también muestran el empobrecimiento de la aproximación de sólido de pequeño espesor cuando el módulo elástico del material y el espesor del material aumentan. Vale destacar que el módulo de Young del UHMWPE es 100 veces mayor que el correspondiente a los cartílagos naturales.

**Tabla 6.** Diferencia porcentual de los resultados PE, W y SIC respecto al obtenido por MEF en prótesis de rodilla

Alt [mm]	Diferencia porcentual [%]		
	PE	W	SIC
8	-14,7	53	-23,6
10	-10	62,5	-18,75
12	-5,43	70	-15,21

### 3.2. Articulación de la cadera

Para la articulación de cadera sana, donde también se suponen dos recubrimientos de igual espesor para los cuales los desplazamientos se suman, se obtuvieron las superficies de las Figuras 8 a 10. En la Tabla 7 se muestran los desplazamientos máximos obtenidos por el modelo simplificado y los distintos módulos de Young equivalentes considerados, junto al resultado obtenido por el MEF. En la Tabla 8 se muestra la diferencia porcentual de los resultados del modelo simplificado con respecto a los obtenidos por el MEF.

En las Figuras 8, 9 y 10 se puede observar que para el modelo simplificado, para los casos de material de pequeño espesor y sólido semiinfinito corregido, los resultados poseen una buena aproximación a los obtenidos por el MEF. En el caso del módulo elástico equivalente de Winkler se observa que el desplazamiento está muy sobreestimado. Esto se ve con mayor claridad en la Tabla 8 donde, para el material de pequeño espesor el error aproximado es de 5 % por defecto respecto a lo estimado por el MEF, para el material semiinfinito corregido el error es cercano al 15 %, también por defecto, mientras que para el módulo elástico de Winkler, los valores de desplazamiento se sobreestiman con un error muy elevado, que supera el 70 %.

**Tabla 7.** Desplazamiento máximo obtenido por MEF y para el modelo simplificado de articulación de cadera natural con cada módulo elástico equivalente considerado

Alt [mm]	Desplazamiento máximo [μm]			
	MEF	PE	W	SIC
1,5	27,36	26,05	46,89	23,44
2	36,51	34,73	62,52	31,26
2,5	45,69	43,42	78,15	39,07

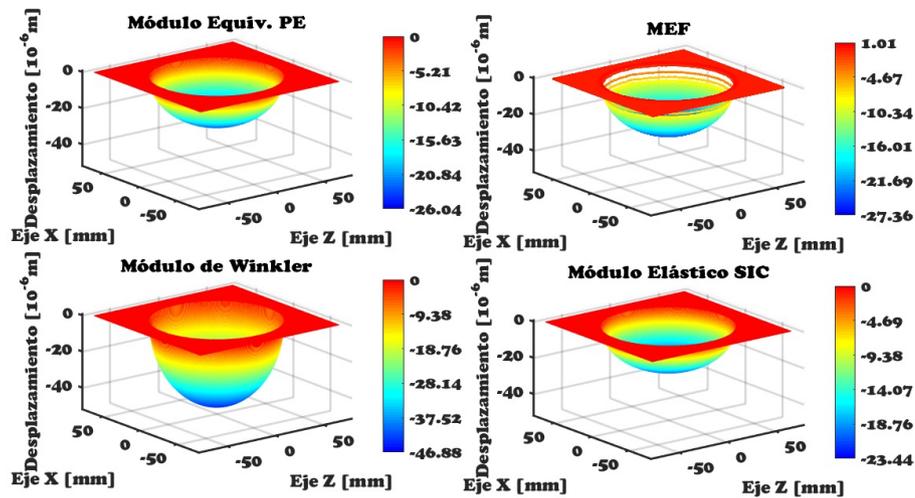


Figura 8. Superficies de desplazamiento obtenidas para cada módulo de Young equivalente y la correspondiente al MEF, para articulación natural sana. Alt = 1,5 mm. E = 10 MPa.

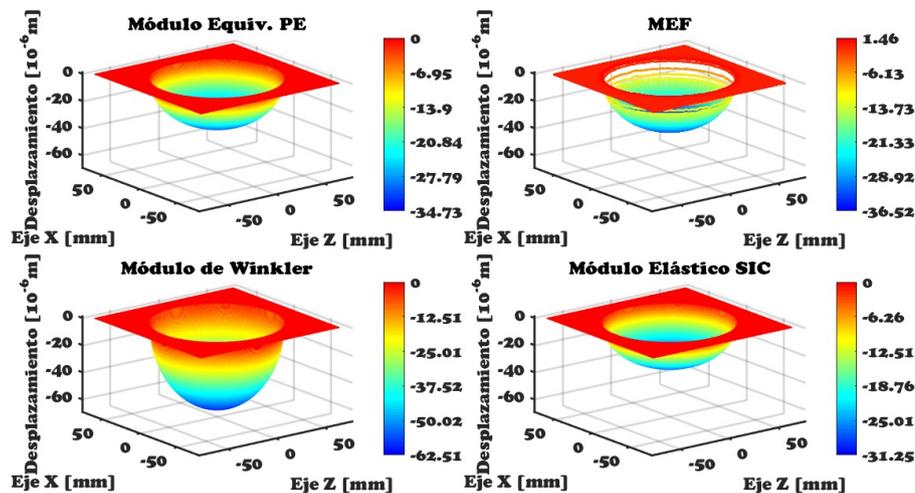


Figura 9. Superficies de desplazamiento obtenidas para cada módulo de Young equivalente y la correspondiente al MEF, para articulación natural sana. Alt = 2 mm. E = 10 MPa.

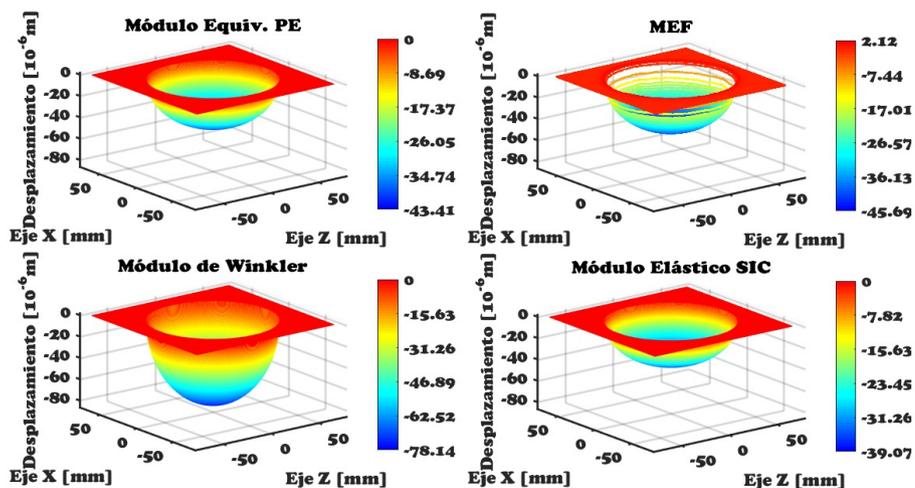


Figura 10. Superficies de desplazamiento obtenidas para cada módulo de Young equivalente y la correspondiente al MEF, para articulación natural sana. Alt = 2.5 mm. E = 10 MPa.

**Tabla 8.** Diferencia porcentual de los resultados PE, W y SIC respecto al obtenido por MEF para articulación de cadera natural

Alt [mm]	Diferencia porcentual [%]		
	PE	W	SIC
1,5	-4,78	71,39	-14,31
2	-4,87	71,23	-14,39
2,5	-4,97	71,05	-14,48

**Tabla 9.** Desplazamiento máximo obtenido por MEF y para cada módulo elástico equivalente considerado para el caso de articulación protésica

Alt [mm]	Desplazamiento máximo [mm]			
	MEF	PE	W	SIC
8	15,37	12,69	22,85	11,42
10	20,11	15,87	28,56	14,28
12	24,82	19,04	34,27	17,14

En las Figuras 11 a 13 se presentan los resultados correspondientes a prótesis de cadera. En este caso también son válidas las discusiones para la articulación sana de cadera, con la salvedad que las relaciones de diferencia o error porcentual son distintas. Comparando los desplazamientos máximos que se producen en el centro del contacto, se observa que para el material de pequeño espesor y el semiinfinito corregido los resultados del modelo simplificado difieren alrededor de un 20 y 30 %, respectivamente, por defecto respecto a lo obtenido por el MEF. Para el módulo elástico equivalente de Winkler, por su parte, se presenta un error del 38 y el 48 % en (Tabla 10). Ello se debe a que con el incremento del espesor del sólido, se mejora la aproximación de sólido semiinfinito, a la vez que empeora la aproximación SIC y la de pequeño espesor. Además, la aproximación PE, como en el caso de la rodilla, empeora por el aumento del módulo elástico entre el cartílago natural y el UHMWPE de la articulación protésica.

**Tabla 10.** Diferencia porcentual de los resultados PE, W y SIC respecto al obtenido por MEF para el caso de articulación protésica

Alt [mm]	Diferencia Porcentual [%]		
	PE	W	SIC
8	-17,42	48,65	-25,68
10	-21,1	42,02	-28,99
12	-23,28	38,09	-30,96

## 4. Conclusiones

Se ha presentado un análisis de deformaciones a partir del cálculo de desplazamientos de las superficies de dos sólidos en contacto cargado, para evaluar la pertinencia de utilizar modelos simplificados al momento de construir modelos de contacto. El estudio se motivó en las articulaciones humanas, donde el desplazamiento de las superficies en contacto es fundamental para posibilitar un flujo de lubricación que actúe minimizando el desgaste.

Para la predicción de los desplazamientos, se evaluaron tres módulos de Young equivalentes en un modelo simplificado de columna: para un sólido de pequeño espesor, para un sólido semiinfinito o de Winkler y para un sólido semiinfinito corregido. Los resultados obtenidos para el módulo de Young equivalente correspondiente a un material de pequeño espesor, son los que mejor se aproximan a los obtenidos por el MEF en ambas geometrías consideradas: la del contacto lineal (equivalente a la rodilla) y la del contacto puntual (equivalente a la cadera). No obstante, las diferencias porcentuales respecto a la solución por MEF varían en cada caso y para cada material analizado: cartílago natural (menor al 5 % en cadera y menor al 1 % en rodilla) o UHMWPE en la articulación protésica (menor al 23,3 % en cadera y menor al 15 % en rodilla). Dichas diferencias en todos los casos son por defecto, lo cual no sería un problema en sí mismo ya que la subestimación pone al análisis del lado de la seguridad.

Quedó demostrado que los módulos de Young equivalentes derivados de la aproximación de sólido semiinfinito como el módulo de Winkler y el módulo de SIC, son inapropiados debido a la excesiva sobreestimación de los desplazamientos calculados obtenida al considerar el primero (mayor al 38 % y alcanzando el 70 % en varios casos) y la subestimación de los desplazamientos al considerar el segundo (superior al 10 % y alcanzando el 30 % en algunos casos), ello, en virtud de lo dicho en el párrafo anterior, pone al análisis en riesgo para el caso de Winkler ya que, en modelos completos de lubricación, podrían predecirse separaciones entre las superficies en contacto mayores a las que en realidad se producirían.

Finalmente, el trabajo fue muy útil para el entrenamiento en las artes de la Mecánica Computacional de un alumno avanzado de la carrera de Bioingeniería, en su papel de becario de iniciación a la investigación de la Universidad Nacional de Entre Ríos, Argentina.

## Agradecimientos

A la Universidad Nacional de Entre Ríos por el financiamiento a través del PID 6162 y a CONICET por el financiamiento a través de una beca doctoral.

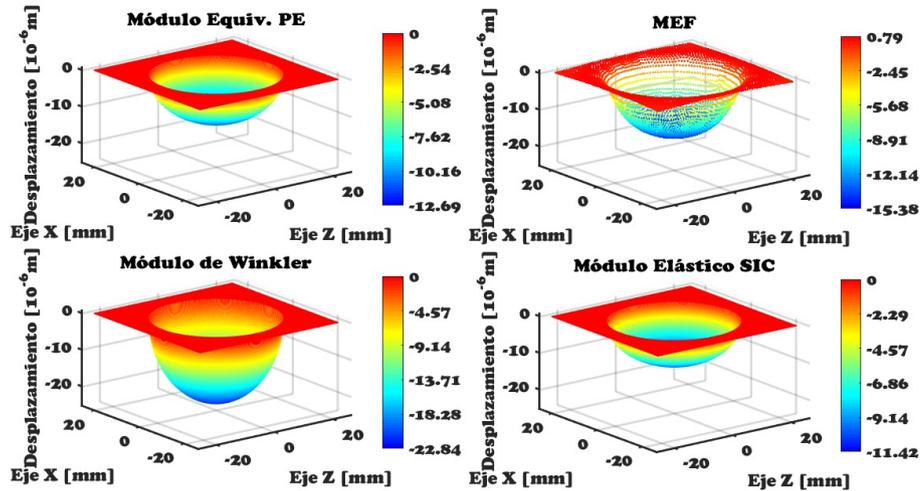


Figura 11. Superficies de desplazamiento obtenidas para cada módulo de Young equivalente y la correspondiente al MEF, para articulación protésica. Alt = 8 mm. E = 1 GPa

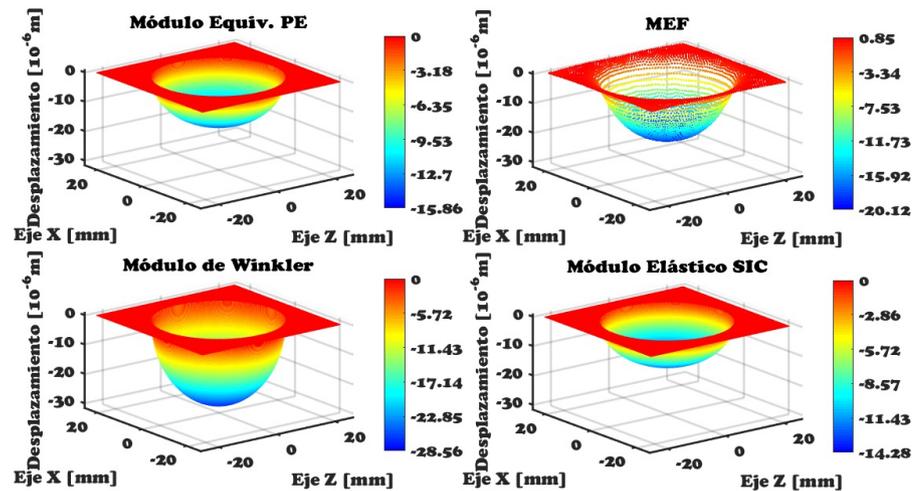


Figura 12. Superficies de desplazamiento obtenidas para cada módulo de Young equivalente y la correspondiente al MEF, para articulación protésica. Alt = 10 mm. E = 1 GPa.

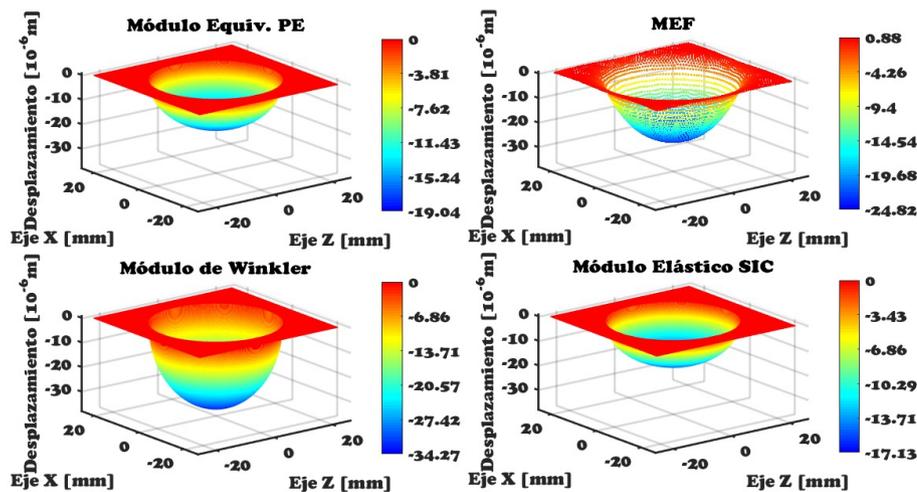


Figura 13. Superficies de desplazamiento obtenidas para cada módulo de Young equivalente y la correspondiente al MEF, para articulación natural sana. Alt = 2.5 mm. E = 10 MPa.

## Referencias

- [1] K. J. Bozic and M. D. Ries, “Wear and osteolysis in total hip arthroplasty,” *Seminars in Arthroplasty*, vol. 16, no. 2, pp. 142–152, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1053/j.sart.2005.05.003>.
- [2] R. Pivec, A. J. Johnson, S. C. Mears, and M. A. Mont, “Hip arthroplasty,” *The Lancet*, vol. 380, no. 9855, pp. 1768–1777, 2012. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(12\)60607-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(12)60607-2).
- [3] S. Kurtz, K. Ong, E. Lau, F. Mowat, and M. Halpern, “Projections of primary and revision hip and knee arthroplasty in the united states from 2005 to 2030,” *The Journal of bone and joint surgery*, vol. 89, pp. 780–785, 04 2007. [Online]. Available: <https://goo.gl/1qXADn>
- [4] Y. Su, P. Yang, Z. Fu, Z. Jin, and C. Wang, “Time-dependent elastohydrodynamic lubrication analysis of total knee replacement under walking conditions,” *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, vol. 14, no. 6, pp. 539–548, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1080/10255842.2010.485569>.
- [5] M. Mongkolwongrojn, K. Wongseedakaew, and F. E. Kennedy, “Transient elastohydrodynamic lubrication in artificial knee joint with non-newtonian fluids,” *Tribology International*, vol. 43, no. 5, pp. 1017–1026, 2010, special Issue on Second International Conference on Advanced Tribology (iCAT2008). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2009.12.041>.
- [6] J. Di Paolo, D. M. Campana, S. Ubal, and M. E. Berli, “Flujos de lubricación en canales elásticos. una experiencia didáctica en clases de mecánica del continuo para bioingeniería,” in *VI Congreso Argentino de Enseñanza en Ingeniería (VI CAEDI)*, 2008. [Online]. Available: <https://goo.gl/LLLpNC>
- [7] M. Yousfi, “Etude biomécanique de l’articulation du genou humain. caractérisation mécanique et modélisation de l’écoulement du fluide synovial en écrasement lors d’un cycle de marche,” Master’s thesis, Université du 20 Août 1955 Skikda, 2014. [Online]. Available: <https://goo.gl/GQJmsr>
- [8] T. J. R. Hugues, *The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis*, C. Corporation, Ed., 2012. [Online]. Available: <https://goo.gl/ktCM6S>
- [9] K. V. Nemade and V. K. Tripathi, “A mathematical model to calculate contact stresses in artificial human hip joint,” *International Journal of Engineering Research and Development*, vol. 6, no. 12, pp. 119–123, 2013. [Online]. Available: <https://goo.gl/FyQQpX>
- [10] F. Li, H. Chen, and K. Mao, “Computational simulation analysis for torus radius of edge contact in hip prostheses,” *Acta of bioengineering and biomechanics*, vol. 17, no. 3, pp. 67–73, 2015. [Online]. Available: <https://goo.gl/8AJ7nz>
- [11] Q. Meng, F. Liu, J. Fisher, and Z. Jin, “Contact mechanics and lubrication analyses of ceramic-on-metal total hip replacements,” *Tribology International*, vol. 63, pp. 51–60, 2013, the International Conference on BioTribology 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2012.02.012>.
- [12] J. Armas Sánchez, “Análisis de la fractura por contacto mecánico y su solución por análisis numérico,” Master’s thesis, Instituto Politécnico Nacional. México, 2015. [Online]. Available: <https://goo.gl/LnEdPf>
- [13] J. Di Paolo and M. E. Berli, “Numerical analysis of the effects of material parameters on the lubrication mechanism for knee prosthesis,” *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, vol. 9, no. 2, pp. 79–89, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1080/10255840500523139>.
- [14] M. E. Berli, D. M. Campana, S. Ubal, and J. Di Paolo, “Lubrication model of a knee prosthesis, with non newtonian fluid and porous rough material,” *Latin American applied research*, vol. 39, no. 2, pp. 105–111, 2009. [Online]. Available: <https://goo.gl/aKL9Ky>
- [15] B. A. Weiss, M. E. Berli, S. Ubal, and J. Di Paolo, “numerical solution of a 2d lubrication model with sommerfeld boundary conditions for hip prostheses,” in *VI Latin American Congress on Biomedical Engineering CLAIB, Paraná, Argentina 29, 30 & 31 October*, vol. 49, 2014. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-13117-7\\_222](https://doi.org/10.1007/978-3-319-13117-7_222).
- [16] D. Dowson and G. R. Higginson, *Elasto-Hydrodynamic Lubrication*. Pergamon Press, 1977. [Online]. Available: <https://goo.gl/NV522s>
- [17] H. P. Evans and W. Snidle, “The elastohydrodynamic lubrication of point contacts at heavy loads,” *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 382, no. 1782, pp. 183–199, 1982. DOI: <http://doi.org/10.1098/rspa.1982.0096>.
- [18] MBA. (2017) More power in your hands. MBA Surgical Empowerment. [Online]. Available: <https://goo.gl/aPngur>

- [19] F. Mattei, Land Di Puccio, B. Piccigallo, and E. Ciulli, "Lubrication and wear modelling of artificial hip joints: A review," *Tribology International*, vol. 44, no. 5, pp. 532–549, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2010.06.010>.
- [20] I. Kutzner, B. Heinlein, F. Graichen, A. Bender, A. Rohlmann, A. Halder, A. Beier, and G. Bergmann, "Loading of the knee joint during activities of daily living measured in vivo in five subjects," *Journal of Biomechanics*, vol. 43, no. 11, pp. 2164–2173, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2010.03.046>.
- [21] A. Sharma, "A method to calculate the femoropolyethylene contact pressures in total knee arthroplasty in vivo," Master's thesis, University of Tennessee, United States, 2005. [Online]. Available: <https://goo.gl/QucK2c>
- [22] J. S. Jurvelin, M. D. Buschmann, and E. B. Hunziker, "Mechanical anisotropy of the human knee articular cartilage in compression," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, vol. 217, no. 3, pp. 215–219, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1243/095441103765212712>.
- [23] D. E. T. Shepherd and B. B. Seedhom, "Thickness of human articular cartilage in joints of the lower limb," *Annals of the Rheumatic Diseases*, vol. 58, no. 1, pp. 27–34, 1999. DOI: <http://dx.doi.org/10.1136/ard.58.1.27>.
- [24] H. Oonishi, H. Iwaki, N. Kin, S. Kushitani, N. Murata, S. Wakitani, and K. Imoto, "The effects of polyethylene cup thickness on wear of total hip prostheses," *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, vol. 9, no. 8, pp. 475–478, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1008823518381>.
- [25] G. Bergmann, G. Deuretzbacher, M. Heller, F. Graichen, A. Rohlmann, J. Strauss, and G. N. Duda, "Hip contact forces and gait patterns from routine activities," *Journal of Biomechanics*, vol. 34, no. 7, pp. 859–871, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0021-9290\(01\)00040-9](https://doi.org/10.1016/S0021-9290(01)00040-9).



# MÉTODOS MULTICRITERIO APLICADOS EN LA SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA DISCOS DE FRENO

## MULTI-CRITERIA METHODS APPLIED IN THE SELECTION OF A BRAKE DISC MATERIAL

Mario Chérrez-Troya<sup>1,\*</sup>, Javier Martínez-Gómez<sup>1,2</sup>, Diana Peralta-Zurita<sup>1</sup>,

Edilberto Antonio Llanes-Cedeño<sup>1</sup>

### Resumen

La selección de material para un componente automotor es un proceso complejo, porque implica una exploración de los principales criterios de acuerdo con las propiedades exigidas por el componente a diseñar. El presente estudio tiene como objetivo evaluar un material alternativo en la fabricación de un disco de freno en vehículos livianos tipo SUV, a partir de los métodos multicriterio; para lo cual se toman en consideración cinco materiales candidatos para la aplicación deseada (Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V, Al<sub>10</sub>Si C, AISI 304L, ASTM A 536 y ASTM A48). Los métodos multicriterio (MCDM) empleados son: VIKOR – la optimización multidisciplinar y solución de compromiso; ELECTRE I – eliminación y opciones que reflejan la realidad; COPRAS – evaluación compleja proporcional; ARAS – evaluación de relación de aditivos; MOORA – optimización multiobjetivo basado en el análisis de radios y el método ENTROPÍA que se emplea para la ponderación de los criterios. Se obtiene que la mejor alternativa es el material ASTM A536 según los métodos COPRAS, ELECTRE I, y ARAS por su baja densidad, un alto límite elástico y una buena resistencia a la compresión; en segunda opción es el ASTM A48 según VIKOR y MOORA.

**Palabras clave:** disco de freno, métodos multicriterio, MCDM.

### Abstract

The selection of material for a self-propelled component is a complex process, because it involves an exploration of the main criteria according to the properties required by the component to be designed. The purpose of this study is to evaluate an alternative material in the manufacture of a brake disc in light SUV type vehicles, using multi-criteria methods; five candidate materials are taken into consideration for the desired application (Ti<sub>6</sub>Al 4V, Al<sub>10</sub>Si C, AISI 304L, ASTM A 536 and ASTM A48). The multi-criteria methods (MCDM) used are: VIKOR - multidisciplinary optimization and compromise solution; ELECTRE I - elimination and options that reflect reality; COPRAS - proportional complex evaluation; ARAS - additive ratio evaluation; MOORA - multi-objective optimization based on radius analysis and the ENTROPÍA method used for the weighting of criteria. It is obtained that the best alternative is the ASTM A536 material according to the COPRAS, ELECTRE I, and ARAS methods due to its low density, a high elastic limit and a good resistance to compression; in the second option is ASTM A48 according to VIKOR and MOORA.

**Keywords:** brake disc, multi-criteria methods, MCDM.

<sup>1,\*</sup>Grupo de Investigación de Materiales, Universidad Internacional SEK, Quito – Ecuador.

Autor para correspondencia ✉: mcherrez.mdm@uisek.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-7628-9793>, <https://orcid.org/0000-0001-8807-7595>

<https://orcid.org/0000-0002-9523-0743>, <https://orcid.org/0000-0001-6739-7661>

<sup>2</sup>Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables, INER, Quito – Ecuador

Recibido: 14-05-2018, aprobado tras revisión: 25-06-2018

Forma sugerida de citación: Chérrez-Troya, M.; Martínez-Gómez, J.; Peralta-Zurita, D. y Llanes-Cedeño, E. A. (2018). «Métodos multicriterio aplicados en la selección de un material para discos de freno». INGENIUS. N.º 20, (julio-diciembre). pp. 83-95. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n20.2018.08>.

## 1. Introducción

En el desarrollo de la industria automotriz, los frenos constituyen uno de los principales dispositivos de seguridad, por lo tanto, los materiales a seleccionar deben poseer las propiedades físicas y mecánicas adecuadas para un óptimo rendimiento del disco de freno.

La formación de grietas térmicas en los materiales empleados en disco de frenos depende de la fatiga térmica o esfuerzos térmicos muy severos, producidos por la variación de temperatura durante el frenado y condiciones ambientales de operación [1]. En el frenado las energías cinética y potencial se convierten en energía térmica, por lo tanto, es necesario conocer la temperatura y tensión térmica en el frenado [2]. Es necesario investigar sobre el uso de nuevos materiales que mejoren la eficiencia de frenado y proporcionen mayor estabilidad y seguridad al vehículo [3]. Es importante seleccionar un material alternativo al hierro fundido por un material ligero para reducir el consumo de combustible, en función de su peso específico [4].

El método proceso analítico jerárquico (AHP del inglés *Analytic Hierarchy Process*) se utiliza para la evaluación ambiental en la selección de materiales compuestos para componentes automotrices, porque los datos disponibles son difíciles de cuantificar y las características a evaluar son intangibles de un modelo analítico [5]. Es necesario un enfoque sistemático y eficiente hacia la selección de materiales a fin de seleccionar la mejor alternativa para una aplicación determinada de ingeniería [6]. Los métodos multicriterios como el COPRAS (*Complex Proportional Assessment*), VIKOR (del serbio: *VIseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje: Multicriteria Optimization and Compromise Solution*), ELECTRE I (*Elimination and Choice Expressing the Reality*), ARAS emph(additive ratio assessment), MOORA (*multi-objective optimization on the basis of ratio analysis*) y el de ENTROPÍA que se utiliza para calcular el peso de cada criterio, han demostrado ser métodos adecuados para validar la selección de materiales [5,6].

En los últimos 3 años la demanda de vehículos SUV en el Ecuador de la marca Chevrolet ha incrementado en un 7 %, siendo el modelo Suzuki Grand Vitara SZ 2.0 el quinto vehículo más vendido según la Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador [7]. Teniendo en cuenta que en el Ecuador se está incentivando la inclusión del producto nacional, es importante seleccionar un material existente en el país para la fabricación del disco de freno junto con el análisis costo/beneficio. El objetivo de este estudio es evaluar un material alterno en la fabricación de un disco de freno en vehículos livianos tipo SUV, a partir de los métodos multicriterio COPRAS, VIKOR, ELECTRE I, ARAS, MOORA y el de ENTROPÍA.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Definición del problema

Se ha desarrollado diferentes tipos de aleaciones para el diseño y fabricación de discos de freno en la industria automotriz, porque deben cumplir parámetros extremadamente altos, debido a que este dispositivo trabaja a altos grados de desgaste y temperatura.

Los discos de hierro fundido gris tienen mejor resistencia al desgaste que los de aleaciones o compuestos de Ti, sin embargo, la adición de partículas duras a un compuesto con base de Ti puede mejorar sustancialmente la resistencia al desgaste [8]. El análisis de las propiedades mecánicas entre una aleación de aluminio, hierro fundido, aleación de titanio, materiales cerámicos y compuestos condujo como resultado el material más apropiado para la fabricación de un disco de freno a una aleación de aluminio [9]. Una alternativa a los metales son los materiales compuestos como la fibra de vidrio de alta resistencia, que tiene una mayor resistencia al desgaste y menor peso [10].

Entre las propiedades importantes que el material a seleccionar debe tener es la conductividad térmica. Un valor alto permite disipar el calor rápidamente y un coeficiente de expansión térmico alto permite tener una buena dilatación térmica al exponer el disco de freno a una variación de temperatura.

Además, un buen límite elástico, módulo de Young y un coeficiente de Poisson, permitirán soportar altas tensiones sin sufrir deformaciones permanentes en el disco. Un valor alto de resistencia a la compresión, tracción y dureza Brinell, evitará que el material se fracture debido a los esfuerzos producidos por las mordazas al momento del frenado. Para disminuir el consumo del vehículo es necesario reducir el peso del vehículo, por tal razón el disco de freno debe tener una baja densidad. Es importante realizar un análisis costo-beneficio del material seleccionado.

Tomando en cuenta todos estos criterios los materiales candidatos para la fabricación de discos de freno en el Ecuador son los siguientes: Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V (aleación de titanio, número 1), Al<sub>10</sub>Si C (aleación de aluminio o Duralcan, número 2), AISI 304L (acero inoxidable, número 3), ASTM A536 (fundición gris nodular, número 4) y ASTM A48 (fundición gris perlítico, número 5).

### 2.2. Métodos multicriterio. Criterios de ponderación

Los métodos multicriterios empleados son el COPRAS, VIKOR, ELECTRE I, ARAS y MOORA. El cálculo de los pesos de cada criterio se lo realiza a través del método entropía, con el objeto de contar con resultados objetivos ya que parte del supuesto de que un criterio tiene mayor peso cuando mayor diversidad hay en la evaluación de cada alternativa.

### 2.2.1. Método entropía

La entropía mide la incertidumbre en la información formulada usando la teoría de la probabilidad. Indica que una distribución amplia representa más incertidumbre que la de una distribución con picos pronunciados. El método entropía se calcula en los siguientes pasos [11]:

Paso 1: Construcción de la matriz de decisión.

$$r = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}$$

Paso 2: Cálculo de la matriz de decisión normalizada  $P_{ij}$ , el objetivo de la normalización es obtener valores sin dimensiones de diferentes criterios para hacer comparaciones entre ellos [11]. Se calcula usando la Ecuación (1).

$$P_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (1)$$

Paso 3: Cálculo de la entropía  $E_j$ , mediante la Ecuación (2).

$$E_j = -k \left( \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln(p_{ij}) \right) \quad (2)$$

$t = 1, 2, 3, \dots, n.$

Donde  $k = \frac{1}{\ln m}$  es una constante que garantiza  $0 \leq E_j \leq 1$  y  $m$  es el número de alternativas.

Paso 4: Cálculo de la diversidad de criterio  $D_j$ , la Ecuación (3) permite calcular este parámetro.

$$D_j = 1 - E_j \quad (3)$$

Paso 5. Cálculo del peso normalizado de cada criterio  $W_j$ , mediante la Ecuación (4).

$$W_j = \frac{D_j}{\sum_{i=1}^m D_j} \quad (4)$$

### 2.2.2. Método COPRAS

El método COPRAS selecciona las mejores alternativas de decisión considerando las soluciones ideales y las peores-ideales, en una clasificación y evaluación paso a paso de las alternativas en términos de su importancia y grado de utilidad. El algoritmo del método COPRAS consta de los siguientes pasos [12]:

Paso 1: Cálculo de la matriz de decisión normalizada  $x_{ij}^*$ , mediante la Ecuación (5).

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (5)$$

Paso 2: Determinar la matriz de decisión normalizada ponderada  $D_{ij}$ , según la Ecuación (6).

$$D_{ij} = x_{ij}^* \cdot w_j = \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & w_2 r_{12} & \cdots & w_n r_{1n} \\ w_1 r_{21} & w_2 r_{22} & \cdots & w_n r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1 r_{m1} & w_2 r_{m2} & \cdots & w_n r_{mn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Donde  $x_{ij}^*$  es el valor del rendimiento normalizado de  $i$ th alternativas en  $j$ th criterios y  $w_j$  es el peso asociado a los criterios  $j$ th.

Paso 3: Las sumas  $S_{i+}$  y  $S_{i-}$  de los valores normalizados ponderados, son calculadas tanto para los criterios beneficiosos como para los no beneficiosos respectivamente. Estas sumas  $S_{i+}$  y  $S_{i-}$  son calculados mediante las Ecuaciones (7) y (8) respectivamente.

$$S_{i+} = \sum_{k=1}^k D_{ik} \quad (7)$$

$$S_{i-} = \sum_{k=1}^k D_{ik} \quad (8)$$

Paso 4: Determinar la importancia relativa de las alternativas  $Q_i$  mediante la Ecuación (9).

$$Q_i = S_i + \frac{\sum_{j=1}^m S_{i-}}{S_{i-} - \sum_{j=1}^m \frac{1}{S_{i-}}} \quad (9)$$

La importancia relativa  $Q_i$  de una alternativa muestra el grado de satisfacción alcanzada por esta alternativa.

Paso 5: Cálculo del índice de rendimiento  $P_i$  de cada alternativa, usando la Ecuación (10):

$$P_i = \frac{Q_i}{Q_{max}} \times 100 \quad (10)$$

Donde  $Q_{max}$  es el valor máximo de importancia relativa. El valor del índice de rendimiento  $P_i$  se utiliza para obtener una clasificación completa de las alternativas candidatos.

### 2.2.3. Método VIKOR

El concepto básico de VIKOR consiste en definir primero las soluciones ideales positivas y negativas. La solución ideal positiva indica la alternativa con el valor más alto (puntuación de 100) mientras que la solución ideal negativa indica la alternativa con el valor más bajo (puntuación de 0) El algoritmo de compromiso VIKOR tiene los siguientes pasos [13]:

Paso 1: Definir la matriz de decisión inicial  $X_{ij}$ .

$$X_{ij} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

Paso 2: Cálculo de la matriz de decisión inicial normalizada  $f_{ij}$ , utilizándola Ecuación (11).

$$f_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (11)$$

Paso 3: Determinar el mejor  $f_i^*$  y el peor  $f_i^-$  valor de todas las funciones de criterio de cada alternativa. Mediante las Ecuaciones (12) y (13) respectivamente.

$$f_i^* = \max_j f_{ij} \quad (12)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, m$$

$$f_i^- = \min_j f_{ij} \quad (13)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, m$$

Paso 4: Cálculo de la distancia desde cada valor a la solución ideal positiva  $S_i$  y la distancia desde cada valor a la solución ideal negativa  $R_i$ , mediante las Ecuaciones (14) y (15) respectivamente.

$$S_i = \sum_j^n W_j \frac{f_i^* - f_{ij}}{f_i^* - f_i^-} \quad (14)$$

$$R_i = \max_j \frac{W_j f_i^* - f_{ij}}{f_i^* - f_i^-} \quad (15)$$

Paso 5: Cálculo de los valores  $I_i$ , para  $i = 1, \dots, I$ , está definido por la Ecuación (16).

$$I_i = v \left[ \frac{s_i - s^*}{s^- - s^*} \right] + (1 - v) \left[ \frac{R_i - R^*}{R^- - R^*} \right] \quad (16)$$

Donde  $S^* = \min S_i$ ,  $S^- = \max S_i$ ,  $R^* = \min R_i$ ,  $R^- = \max R_i$ , y  $v$  es una referencia de ponderación ( $v > 0.5$ ).  $\frac{(R_i - R^*)}{(R^- - R^*)}$ , representa la distancia de la solución ideal negativa de los valores  $i_{th}$ .

Paso 6: Se determina el *ranking*, el valor más alto es la mejor alternativa.

#### 2.2.4. Método ELECTRE I

El método ELECTRE I tiene la capacidad de manejar criterios cuantitativos y cualitativos discretos y proporciona un orden completo de las alternativas. La limitación se reemplaza por la concordancia y discordancia del índice de la matriz. El procedimiento del método ELECTRE I es el siguiente [14]:

Paso 1: Definir la matriz de decisión inicial  $r_{ij}$ .

$$r_{ij} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}$$

Paso 2: Normalización de la matriz de decisión, con tal proceso permitirá transformar diferentes escalas y unidades entre varios criterios comunes que permiten comparar a través de los criterios, según la Ecuación (17).

$$R_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m r_{ij}^2}} \quad (17)$$

Paso 3: Construcción de la matriz de decisión ponderada normalizada  $V_{ij}$ . Para lo cual se multiplica la matriz de decisión normalizada  $R_{ij}$  con su respectivo peso, expresado en la Ecuación (18).

$$V_{ij} = W_i \times R_{ij} \quad (18)$$

$$V_{ij} = \begin{bmatrix} W_1 r_{11} & W_2 r_{12} & \cdots & W_n r_{1n} \\ W_2 r_{21} & W_2 r_{22} & \cdots & W_n r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_n r_{m1} & W_n r_{m2} & \cdots & W_n r_{mn} \end{bmatrix}$$

Paso 4: Cálculo de los intervalos de concordancia ( $C_{ab}$ ) y discordancia ( $D_{ab}$ ), es decir,  $C_{ab}$  indica la alternativa más preferible y  $D_{ab}$  indica la alternativa menos preferible. Se utilizan las Ecuaciones (19) y (20) respectivamente.

$$C_{ab} = \{j | x_{aj} \geq x_{bj}\} \quad (19)$$

$$D_{ab} = \{j | x_{aj} \leq x_{bj}\} = j - C_{ab} \quad (20)$$

Paso 5: Determinación de la matriz de intervalo de concordancia  $C_{ab}$ , se obtiene sumando los pesos a los pesos asociados a los criterios en los que la alternativa  $i$  es mejor que la alternativa  $j$  o viceversa; en caso de empate se asigna la mitad del peso a cada una de las alternativas según la Ecuación (21).

$$C_{ab} = \sum_{j=C_{ab}} W_j \quad (21)$$

Paso 6: Determinación de la matriz de índice de discordancia  $D_{ab}$ , se calcula como la diferencia mayor entre los criterios para los que las alternativas  $i$  está dominada por la  $j$ , dividiendo seguidamente por la mayor diferencia en valor absoluto entre los resultados obtenidos por la alternativa  $i$  y  $j$ , según la Ecuación (22).

$$D_{ab} = \frac{\left( \max_{j \in D_{ab}} \right) |V_{aj} - V_{bj}|}{\left( \max_{j \in J, m, n \in I} \right) |V_{mj} - V_{nj}|} \quad (22)$$

Paso 7: Cálculo del umbral máximo  $\bar{c}$  para el índice de concordancia y el umbral máximo  $\bar{d}$  para el índice de discordancia, mediante las ecuaciones (23) y (24) respectivamente.

$$\bar{c} = \sum_{a=1}^m \sum_b^m \frac{c(a,b)}{m(m-1)} \quad (23)$$

$$\bar{d} = \sum_{a=1}^m \sum_b^m \frac{c(a,b)}{m(m-1)} \quad (24)$$

Paso 8: Cálculo de la matriz de concordancia dominante. Una vez que ya se determinó los índices de concordancia y el umbral mínimo de concordancia, la matriz de concordancia dominante se calcula con la siguiente condición:

$$cd_{ij} \begin{cases} e(a,b) = 1 & \text{si } c(a,b) \geq \bar{c} \\ e(a,b) = 0 & \text{si } c(a,b) < \bar{c} \end{cases}$$

Paso 9: Cálculo de la matriz discordante dominante. De igual manera que la anterior, los valores de la matriz de discordancia dominante, se obtiene de la matriz de índice de discordancia y el umbral máximo de discordancia  $\bar{d}$ . Mediante la condición siguiente:

$$dd_{ij} \begin{cases} f(a,b) = 1 & \text{si } d(a,b) \geq \bar{d} \\ f(a,b) = 0 & \text{si } d(a,b) < \bar{d} \end{cases}$$

Paso 10: Cálculo del valor neto superior e inferior  $C_a$  y  $D_a$ , mediante las Ecuaciones (25) y (26) respectivamente.

$$C_a = \sum_{b=1}^n c_{(a,b)} - \sum_{b=1}^n c_{(b,a)} \quad (25)$$

$$D_a = \sum_{b=1}^n d_{(a,b)} - \sum_{b=1}^n d_{(b,a)} \quad (26)$$

Donde,  $C_a$  es la suma del número de superioridad competitiva de todas las alternativas y  $D_a$  se usa para determinar el número de inferioridad clasificando las alternativas.

### 2.2.5. Método ARAS

El método ARAS determina la eficiencia relativa compleja de una alternativa factible es directamente proporcional al efecto relativo de los valores y ponderaciones de los principales criterios considerados. Basándose en la teoría de la utilidad y en el método cuantitativo. Los pasos de este método son los siguientes [15].

Paso 1: Conformación de la matriz de decisión  $X_{ij}$ ,

$$X_{ij} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

Paso 2: Cálculo de la matriz de decisión normalizada ( $\bar{X}_{ij}$ ), teniendo en cuenta los valores beneficiosos se calcula con la Ecuación (27).

$$\bar{X}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=0}^m X_{ij}} \quad (27)$$

$$\bar{X}_{ij} = \begin{bmatrix} \bar{x}_{11} & \bar{x}_{12} & \cdots & \bar{x}_{1n} \\ \bar{x}_{21} & \bar{x}_{22} & \cdots & \bar{x}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{x}_{m1} & \bar{x}_{m2} & \cdots & \bar{x}_{mn} \end{bmatrix}$$

Para los criterios no-beneficiosos se calcula mediante la Ecuación (28).

$$X_{ij} = \frac{1}{X_{ij}^*}; \bar{X}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=0}^m X_{ij}^*} \quad (28)$$

Paso 3: Cálculo de la matriz de decisión normalizada ponderada se calcula con la Ecuación (29).

$$\hat{X}_{ij} = \bar{X}_{ij} \times W_j \quad (29)$$

$$\hat{X}_{ij} = \begin{bmatrix} \hat{x}_{11} & \hat{x}_{12} & \cdots & \hat{x}_{1n} \\ \hat{x}_{21} & \hat{x}_{22} & \cdots & \hat{x}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{x}_{m1} & \hat{x}_{m2} & \cdots & \hat{x}_{mn} \end{bmatrix}$$

Los valores de peso  $W_j$  se determinan mediante el método entropía.

Donde  $W_j$  es el peso del criterio  $j$  y  $\bar{X}_{ij}$  es la clasificación normalizada de cada criterio.

Paso 4: Cálculo de la función de optimización  $S_i$  usando la Ecuación (30).

$$S_i = \sum_{j=1}^n \hat{X}_{ij} \quad (30)$$

Donde  $S_i$  es el valor de la función de optimización de la  $i$  alternativa. Este cálculo tiene una relación directamente proporcional con el proceso de los valores  $X_{ij}$  y pesos  $W_j$  de los criterios investigados y su influencia relativa en el resultado final.

Paso 5: Cálculo del grado de utilidad. Este grado se determina comparando la variante que está en análisis con la mejor  $S_o$ , según la Ecuación (31).

$$K_i = \frac{S_i}{S_o} \quad (31)$$

Donde  $S_i$  y  $S_o$  son los valores de la función de optimización. Dichos valores van desde 0 a 100 %, por

lo tanto, la alternativa con el  $K_i$  más alto es la mejor de las alternativas analizadas.

### 2.2.6. Método MOORA

El método MOORA parte de puntos de referencia. Estas referencias serán la mayor evaluación del vector de radios de alternativas respecto de cada criterio ya sea máximo o mínimo. Los pasos de este método se describen de la siguiente manera [16].

Paso 1: Determinación de la matriz inicial de decisión  $X_{ij}$ .

$$X_{ij} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

Paso 2: Cálculo de la matriz de radios de la forma  $X_{ij} = [(\overline{x}_{ij})]$  para normalizar la matriz de decisión inicial, se usa la Ecuación (32).

$$\overline{X}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (32)$$

Paso 3: Se define el vector de pesos de los criterios.

$$W = |W_1 \ W_2 \ W_3 \ \dots \ W_n|$$

Paso 4: Cálculo de la matriz normalizada por pesos. Se pondera multiplicando la matriz de decisión normalizada por los pesos de cada criterio.

Paso 5: Se determina la función de agregación para evaluar cada alternativa  $S(x_i)$ , utilizando la Ecuación (33).

$$S(x_i) = \sum_{i=1}^h \overline{X}_{ij} - \sum_{i=h+1}^h \overline{X}_{ij} \quad (33)$$

Donde  $i = 1, 2, 3, \dots, h$  corresponde a los criterios catalogados como máximo;  $i = h + 1, h + 2, \dots, n$  corresponde a los criterios catalogados como mínimo.

Paso 6: Se determina el ranking de preferencias. La mejor alternativa es la que tiene el valor  $S(x_i)$  más alto.

## 3. Resultados y discusión

### 3.1. Aplicación del método entropía

Los materiales candidatos y los criterios en análisis se muestran en la Tabla 1. Las propiedades de las alternativas son: densidad (A), precio (B), módulo de Young (C), límite elástico (D), radio de Poisson (E), resistencia a la tracción (F), resistencia a la compresión (G), dureza Brinell (H), conductividad térmica (I) y coeficiente de expansión térmica (J). Se aplica el método entropía para los criterios de ponderación, con el fin de obtener pesos objetivos al momento de la evaluación, puesto que el mismo se basa en modelos matemáticos definidos; a diferencia del método AHP que se basa en criterios de expertos aplicado por [14].

En la Tabla 2 se muestra la matriz de decisión normalizada del método entropía, que se calcula según la Ecuación (1). Los valores de la entropía  $E_j$  de cada variable, la diversidad de criterio ( $D_j$ ) y los pesos normalizados de cada criterio ( $W_j$ ) se indica en la Tabla 3, según las ecuaciones (2), (3) y (4) respectivamente.

**Tabla 1.** Matriz de evaluación

Material	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Precio (USD/kg)	Módulo Young (GPa)	Límite elástico (MPa)	Radio de Poisson	Resistencia a la tracción (MPa)	Resistencia a la compresión (MPa)	Dureza Brinell (HV)	Conductividad térmica (W/m°C)	Coefficiente de expansión térmica (µstrain/°C)
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Ti <sub>6</sub> Al <sub>4</sub> V	4430	27.5	115	898	0.349	620	848	347	8.91	9.1
Al <sub>10</sub> SiC	2770	8.29	88	358	0.32	372	358	118	148	18
AISI 304L	7980	4.53	205	310	0.275	620	310	210	16	18
ASTM A536	7150	0.67	173	339	0.28	500	351	217	41	12.5
ASTM A48	7200	0.67	120	149	0.265	250	170	252	46	13

**Tabla 2.** Matriz de decisión normalizada  $P_{ij}$

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
0.150	0.660	0.164	0.437	0.234	0.262	0.416	0.303	0.034	0.128
0.093	0.199	0.125	0.174	0.214	0.157	0.175	0.103	0.569	0.255
0.270	0.108	0.292	0.150	0.184	0.262	0.152	0.183	0.061	0.255
0.242	0.016	0.246	0.165	0.188	0.211	0.172	0.189	0.157	0.177
0.243	0.016	0.171	0.072	0.178	0.105	0.083	0.220	0.177	0.184

**Tabla 3.** Cálculo  $E_i$ ,  $D_j$  y  $W_j$  según el método entropía

Crterios	$E_i$	$D_j$	$W_j$
A	0.961	0.038	0.038
B	0.602	0.397	0.399
C	0.971	0.028	0.028
D	0.894	0.105	0.106
E	0.996	0.003	0.003
F	0.969	0.030	0.031
G	0.911	0.088	0.088
H	0.966	0.033	0.033
I	0.749	0.250	0.251
J	0.981	0.018	0.019

### 3.2. COPRAS

La matriz de decisión normalizada ( $x_{ij}^*$ ), se calcula con la Ecuación (5), mientras que la matriz normalizada por pesos ( $D_{ij}$ ) se calcula según la Ecuación (6) representado en la Tabla 4. La suma de los valores normalizados ponderados ( $S_{i+}$ ), ( $S_{i-}$ ) la importancia relativa ( $Q_i$ ) muestra el grado de satisfacción de una alternativa y el índice de rendimiento ( $P_i$ ) que deter-

mina el *ranking* de los materiales candidatos para la manufactura de un disco de freno, se calculan con las Ecuaciones (7), (8), (9) y (10) respectivamente y todos estos cálculos se indica en la Tabla 5, donde el mejor material es el 4 (ASTM A536) debido a la selección de las mejores alternativas de decisión relacionada con el módulo de Young (C), límite elástico (D), radio de Poisson (E), resistencia a la tracción-compresión (F y G), dureza (H) y conductividad térmica (I).

**Tabla 4.** Matriz de decisión normalizada de pesos  $D_{ij}$  del método COPRAS

Material	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	0.005	0.263	0.004	0.046	0.0008	0.008	0.037	0.010	0.008	0.002
2	0.003	0.079	0.003	0.018	0.0007	0.004	0.015	0.003	0.143	0.004
3	0.010	0.043	0.008	0.016	0.0006	0.008	0.013	0.006	0.015	0.004
4	0.009	0.006	0.007	0.017	0.0007	0.006	0.015	0.006	0.039	0.003
5	0.009	0.006	0.004	0.007	0.0006	0.003	0.007	0.007	0.044	0.003

**Tabla 5.** Cálculo  $S_{i+}$ ,  $S_{i-}$ ,  $Q_i$ ,  $P_i$  y Ranking COPRAS

Material	$S_{i+}$	$S_{i-}$	$Q_i$	$P_i$	Ranking
1	0.118	0.269	0.128	47.68	4
2	0.195	0.083	0.227	84.65	3
3	0.073	0.053	0.123	45.93	5
4	0.096	0.015	0.269	100.0	1
5	0.079	0.015	0.251	93.35	2

### 3.3. VIKOR

La matriz de decisión inicial normalizada  $f_{ij}$  se presenta en la Tabla 6, estos valores se obtienen mediante la Ecuación (11). El mejor y peor valor se determina con las Ecuaciones (12) y (13) respectivamente, los cuales se expone en la Tabla 7. Los valores de la distancia desde cada valor a la solución positiva ( $S_i$ ), se calcula según la Ecuación (14), se indica en la Tabla

8 y la distancia a la solución ideal negativa ( $R_i$ ), se calcula con la Ecuación (15), que se denota en la Tabla 9. El valor de ( $I_i$ ) se obtiene mediante la Ecuación (16), el valor más alto de ( $I_i$ ) determina el mejor material en este caso es un ASTM A48 (número 5). Estos valores se indican en la Tabla 10, debido a su baja densidad (A), bajo radio de Poisson (E) y una elevada dureza Brinell (H).

**Tabla 6.** Matriz de decisión normalizada  $F_{ij}$  por el método VIKOR

Material	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	0.318	0.945	0.351	0.831	0.521	0.561	0.810	0.645	0.055	0.280
2	0.198	0.284	0.268	0.331	0.477	0.336	0.342	0.219	0.917	0.553
3	0.573	0.155	0.625	0.286	0.410	0.561	0.296	0.390	0.099	0.553
4	0.513	0.023	0.528	0.313	0.418	0.452	0.335	0.403	0.254	0.384
5	0.517	0.023	0.366	0.137	0.395	0.226	0.162	0.468	0.285	0.400

**Tabla 7.** Solución ideal y no-ideal según VIKOR

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
fi*	0.573	0.945	0.625	0.831	0.521	0.561	0.810	0.645	0.917	0.553
fi-	0.198	0.023	0.268	0.137	0.395	0.0226	0.162	0.219	0.055	0.280

**Tabla 8.** Cálculos  $S_i$ ,  $S_{imax}$  y  $S_{imin}$ 

Material	$S_i$	$S_{imax}$	$S_{imin}$
1	0.319		
2	0.548		
3	0.757	0.864	0.319
4	0.795		
5	0.864		

**Tabla 9.** Cálculos  $R_i$ ,  $R_{imax}$  y  $R_{imin}$ 

Material	$R_{i+}$	$R_{imax}$	$R_{i-}$	$R_{imin}$
1	0.251		0.000	
2	0.285		0.000	
3	0.341	0.399	0.000	0.000
4	0.399		0.002	
5	0.399		0.003	

**Tabla 10.** Cálculos de  $I_i$  para  $v = 0.5$  y *Ranking* VIKOR

Material	$I_i$	<i>Ranking</i>
1	0.315	5
2	0.568	4
3	0.830	3
4	0.936	2
5	1.000	1

### 3.4. ELECTRE I

Los datos de la matriz de decisión inicial se tabulan en la Tabla 1 y la matriz de decisión normalizada ponderada ( $V_{ij}$ ) se obtiene utilizando la Ecuación (18), dichos valores se indican en la Tabla 11. La matriz de

intervalos de concordancia ( $C_{ab}$ ), se calcula según la Ecuación (19) y se representa en la Tabla 12. Mediante la Ecuación (20) se calcula los valores de matriz de intervalos de discordancia ( $D_{ab}$ ), los cuales están tabulados en la Tabla 13. El umbral máximo ( $\bar{c}$ ) para el índice de concordancia, se determina con la Ecuación

(23) y la matriz de concordancia dominante ( $cd_{ij}$ ) se representa en la Tabla 14. Mientras el umbral máximo para el índice de discordancia ( $\bar{d}$ ), se calcula según la Ecuación (24), tabulados en la Tabla 15 y la matriz discordante ( $dd_{ij}$ ) se expone en la Tabla 16. Por último, el valor neto superior e inferior ( $C_a$ ) y ( $C_b$ ), se obtiene según las ecuaciones (25) y (26) respectivamente, es-

tos valores se muestran en la Tabla 17. El material con mejor puntuado es el ASTM A536. Los materiales con mejor puntuación son el Al<sub>10</sub>SiC (número 2) y el ASTM A536 (número 4), incidiendo la conductividad térmica (I), límite elástico (D) y la resistencia a la tracción-compresión (F y G).

**Tabla 11.** Matriz de decisión normalizada ponderada  $V_{ij}$  según ELECTRE I

Material	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	0.026	0.021	0.009	0.088	0.001	0.017	0.071	0.021	0.013	0.005
2	0.030	0.285	0.007	0.035	0.001	0.010	0.030	0.007	0.231	0.010
3	0.016	0.337	0.017	0.030	0.001	0.017	0.026	0.013	0.025	0.010
4	0.018	0.390	0.015	0.033	0.001	0.014	0.029	0.013	0.064	0.007
5	0.018	0.390	0.010	0.014	0.001	0.007	0.014	0.015	0.071	0.007

**Tabla 12.** Matriz de intervalos de concordancia  $C_{ab}$

	Alt. 1	Alt. 2	Alt. 3	Alt. 4	Alt. 5
Alt. 1	0.000	0.291	0.285	0.301	0.301
Alt. 2	0.708	0.000	0.498	0.507	0.539
Alt. 3	0.714	0.501	0.000	0.078	0.275
Alt. 4	0.698	0.492	0.921	0.000	0.496
Alt. 5	0.698	0.461	0.724	0.504	0.000

**Tabla 13.** Matriz de intervalos de discordancia  $D_{ab}$

	Alt. 1	Alt. 2	Alt. 3	Alt. 4	Alt. 5
Alt. 1	0.000	0.201	0.183	0.149	0.199
Alt. 2	1.000	0.000	1.000	1.000	1.000
Alt. 3	1.000	0.250	0.000	0.063	0.337
Alt. 4	1.000	0.626	1.000	0.000	1.000
Alt. 5	1.000	0.656	1.000	0.418	0.000

**Tabla 14.** Matriz de concordancia dominante  $cd_{ij}$  y umbral de concordancia  $\bar{c}$

	Alt. 1	Alt. 2	Alt. 3	Alt. 4	Alt. 5	$\bar{c}$
Alt. 1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Alt. 2	1.000	0.000	0.000	1.000	1.000	
Alt. 3	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.5
Alt. 4	1.000	0.000	1.000	0.000	0.000	
Alt. 5	1.000	0.000	1.000	1.000	0.000	

**Tabla 15.** Matriz de discordancia dominante  $d_{dij}$  y umbral de discordancia  $\bar{d}$ 

	Alt. 1	Alt. 2	Alt. 3	Alt.4	Alt. 5	$\bar{d}$
Alt. 1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	
Alt. 2	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	
Alt. 3	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.654
Alt. 4	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	
Alt. 5	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	

**Tabla 16.** Matriz de dominancia agregada (concordancia-discordante)  $acd_{ij}$ 

	Alt. 1	Alt. 2	Alt. 3	Alt.4	Alt. 5
Alt. 1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Alt. 2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Alt. 3	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000
Alt. 4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Alt. 5	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000

**Tabla 17.** Cálculo del valor neto superior e inferior  $D_{ai}$  y *Ranking* ELECTRE I

Materiales	$C_{ai}$	$D_{ai}$	<i>Ranking</i>
1	0.0000	0.000	2
2	10.000	-1.000	1
3	-1.0000	1.000	3
4	10.000	-1.000	1
5	-1.0000	1.000	3

### 3.5. ARAS

Según la Ecuación (27) se calcula la matriz de decisión normalizada ( $\bar{X}_{ij}$ ), teniendo en cuenta el cálculo de los valores no-beneficiosos mediante la Ecuación (28). Posteriormente, la matriz de decisión normalizada por pesos ( $\hat{X}_{ij}$ ) se define por la Ecuación (29), cuyos valores se presenta en la Tabla 18. Utilizando la Ecuación (30) para calcular los valores de la función de opti-

mización ( $S_i$ ) de cada una de las alternativas, el grado de utilidad ( $K_i$ ) se calcula mediante la Ecuación (31), la cual determina el ranking de las alternativas para la aplicación en estudio. Estos valores se representan en la Tabla 19, mostrándose que el material ASTM A536 (número 4) es el mejor a consecuencia del efecto relativo de los valores de conductividad térmica, límite elástico y resistencia a la compresión.

**Tabla 18.** Matriz de decisión normalizada ponderada  $\hat{X}_{ij}$ , del método ARAS

Material	A*	B*	C	D	E	F	G	H	I	J
1	0.008	0.004	0.004	0.046	0.0008	0.008	0.037	0.010	0.008	0.002
2	0.014	0.014	0.003	0.018	0.0007	0.004	0.015	0.003	0.143	0.004
3	0.004	0.026	0.008	0.016	0.0006	0.008	0.013	0.006	0.015	0.004
4	0.005	0.177	0.007	0.017	0.0007	0.006	0.015	0.006	0.039	0.003
5	0.005	0.177	0.004	0.007	0.0006	0.003	0.007	0.007	0.044	0.003

**Tabla 19.** Cálculos  $S_i$ ,  $K_i$  y *Ranking*

Material	$S_i$	$K_i$	<i>Ranking</i>
1	0.131	0.470	4
2	0.223	0.800	3
3	0.104	0.373	5
4	0.279	1.000	1
5	0.261	0.9383	2

### 3.6. MOORA

La matriz de decisión ( $\overline{X_{ij}}$ ) se obtiene según la Ecuación (32). La Tabla 20 muestra la matriz de decisión normalizada ponderada. Luego se obtiene la función de agregación  $S(x_i)$  que evalúa cada alternativa, mediante la Ecuación (33), además, este cálculo

determina el *ranking* de preferencia de cada alternativa. Los valores se muestran en la Tabla 21, mostrándose que el material Al<sub>10</sub>S C (número 2) es el mejor debido a que su conductividad térmica (I) y coeficiente de expansión térmica (J) son altos respecto al resto de los materiales experimentados.

**Tabla 20.** Matriz de decisión normalizada ponderada  $\hat{X}_{ij}$ , por el método MOORA

Material	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	0.012	0.377	0.009	0.088	0.001	0.017	0.071	0.021	0.013	0.005
2	0.007	0.113	0.007	0.035	0.001	0.010	0.030	0.007	0.231	0.010
3	0.022	0.062	0.017	0.030	0.001	0.017	0.026	0.013	0.025	0.010
4	0.019	0.009	0.015	0.033	0.001	0.014	0.029	0.013	0.064	0.007
5	0.019	0.009	0.010	0.014	0.001	0.007	0.014	0.015	0.071	0.007

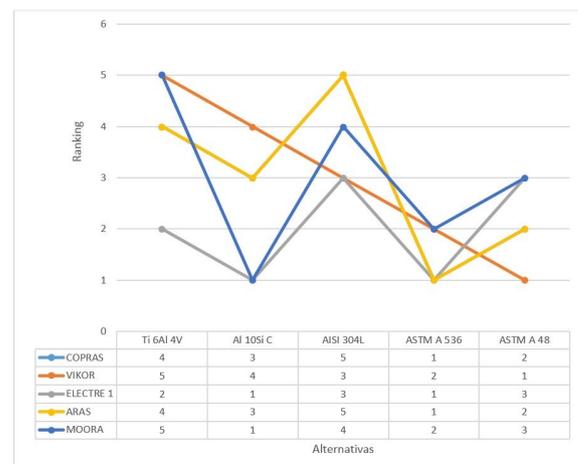
**Tabla 21.** Función de agregación  $S(x_i)$  y *Ranking* MOORA

Material	$S(x_i)$	<i>Ranking</i>
1	-0.159	5
2	0.212	1
3	0.057	4
4	0.149	2
5	0.113	3

### 3.7. Evaluación de los MCDM

Los MCDM tienen la tarea de clasificar un número finito de alternativas de decisión, cada una se describe explícitamente en términos de diferentes criterios de decisión que deben tenerse en cuenta simultáneamente. Por tal razón, se utiliza estos métodos en la selección del material para la construcción de un disco de freno.

En la Figura 1 se muestra el *ranking* de todos los métodos MCDM, con la observación que el método COPRAS y ARAS tienen los mismos valores de *ranking*, por lo cual sus curvas se superponen.



**Figura 1.** Porcentaje de opacidad diésel fósil

El mejor material en los métodos COPRAS, ELECTRE I, y ARAS es ASTM A536, por su baja densidad (A), un alto límite elástico (D) y una buena resistencia a la compresión (G), el método MOORA y VIKOR lo ubican como una segunda alternativa. La segunda mejor opción evaluada es el  $Al_{10}SiC$  y el ASTM A48 por los criterios de ELECTRE I, MOORA y VIKOR, ya que tiene buena conductividad térmica (I), baja densidad (A) y un precio accesible (B). Estos resultados están alineados con los materiales empleados en el estudio realizado por Maleque, Dyuti, & Rahman [9], además, Kharate & Chaudhari [17] estudian el efecto de las propiedades del material en el ruido y el rendimiento del disco de freno mediante el enfoque FEM y EMA, para lo cual experimentan con fundición gris, carbón cerámico y acero, obteniéndose como resultado que la fundición gris tiene una frecuencia natural más baja que el resto de los materiales experimentados.

#### 4. Conclusiones

Los métodos MCDM empleados en esta investigación, permitieron la selección de un material para la fabricación de un disco de freno, incorporando criterios cuantitativos y cualitativos. La ponderación de las propiedades de los materiales candidatos para la construcción de un disco de freno se obtuvo por el método ENTROPÍA. Según los métodos COPRAS, ELECTRE I y ARAS el mejor material es el ASTM A536, con mejores propiedades térmicas y mecánicas. En una segunda opción según los criterios de ELECTRE I, MOORA y VIKOR son el  $Al_{10}SiC$  y el ASTM A48. Las técnicas MCDM permiten resolver problemas complejos, que se adaptan a cualquier tipo de necesidad y se aplican a las diferentes áreas de la ingeniería.

#### Referencias

- [1] SENA. Página principal. Servicio nacional de aduana del Ecuador. [Online]. Available: <https://goo.gl/X4Jk9k>
- [2] H. Sakamoto and K. Hirakawa, "Fracture analysis and material improvement of brake discs," *JSME International Journal Series A Solid Mechanics and Material Engineering*, vol. 48, no. 4, pp. 458–464, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1299/jsmea.48.458>.
- [3] P. Hwang and X. Wu, "Investigation of temperature and thermal stress in ventilated disc brake based on 3d thermo-mechanical coupling model," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 24, no. 1, pp. 81–84, Jan 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-009-1116-7>.
- [4] V. Thilak, R. Krishnaraj, M. Sakthivel, K. Kanthavel, M. D. Marudachalam, and R. P. G, "Transient thermal and structural analysis of the rotor disc of disc brake," *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 2, no. 8, pp. 1–4, 2011. [Online]. Available: <https://goo.gl/1X9m8t>
- [5] F. Bagnoli, F. Dolce, and M. Bernabei, "Thermal fatigue cracks of fire fighting vehicles gray iron brake discs," *Engineering Failure Analysis*, vol. 16, no. 1, pp. 152–163, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2008.01.009>.
- [6] B. A. Ali, S. Sapuan, E. Zainudin, and M. Othman, "Implementation of the expert decision system for environmental assessment in composite materials selection for automotive components," *Journal of Cleaner Production*, vol. 107, pp. 557–567, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.084>.
- [7] P. Chatterjee and S. Chakraborty, "Material selection using preferential ranking methods," *Materials & Design*, vol. 35, pp. 384–393, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.09.027>.
- [8] P. J. Blau, B. C. Jolly, J. Qu, W. H. Peter, and C. A. Blue, "Tribological investigation of titanium-based materials for brakes," *Wear*, vol. 263, no. 7, pp. 1202–1211, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.12.015>.
- [9] M. Maleque, S. Dyuti, and M. M. Rahman, "Material selection method in design of automotive brake disc," in *Proceedings of the World Congress on Engineering 2010 Vol III*, 06 2010. [Online]. Available: <https://goo.gl/7q9dpc>
- [10] A. Bahrami, N. Soltani, M. Pech-Canul, and C. A. Gutiérrez, "Development of metal-matrix composites from industrial/agricultural waste materials and their derivatives," *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 46, no. 2, pp. 143–208, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1080/10643389.2015.1077067>.
- [11] A. Jahan, F. Mustapha, S. M. Sapuan, M. Y. Ismail, and M. Bahraminasab, "A framework for weighting of criteria in ranking stage of material selection process," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 58, no. 1, pp. 411–420, Jan 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3366-7>.
- [12] N. Kundakci and A. İşik., "Integration of macbeth and copras methods to select air compressor for a textile company," *Decision Science Letters*, vol. 5, no. 3, pp. 381–394, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.5267/j.dsl.2016.2.003>.

- [13] R. J. Girubha and S. Vinodh, "Application of fuzzy vikor and environmental impact analysis for material selection of an automotive component," *Materials & Design*, vol. 37, pp. 478–486, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.01.022>.
- [14] L. Anojkumar, M. Ilangkumaran, and V. Sasirekha, "Comparative analysis of mcdm methods for pipe material selection in sugar industry," *Expert Systems with Applications*, vol. 41, no. 6, pp. 2964–2980, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.10.028>.
- [15] E. K. Zavadskas and Z. Turskis, "A new additive ratio assessment (aras) method in multicriteria decision-making," *Ukio Technologinis ir Ekonominis Vystymas*, vol. 16, no. 2, pp. 159–172, 2010. DOI: <http://doi.org/10.3846/tede.2010.10>.
- [16] B. Mallick, B. Sarkar, and S. Das, "Application of the moora method for multi-criteria inventory classification," *Indian Science Cruiser*, vol. 31, no. 6, pp. 15–21, 12 2017. DOI: <http://doi.org/10.24906/isc/2017/v31/i6/166459>.
- [17] N. Kharate and S. Chaudhari, "Effect of material properties on disc brake squeal and performance using fem and ema approach." *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, no. 2, Part 1, pp. 4986–4994, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.076>.



# ESTUDIO CINEMÁTICO Y DINÁMICO DEL SISTEMA DE SUSPENSIÓN DE UN MONOPLAZA DE COMPETENCIA ELÉCTRICO FORMULA STUDENT

## KINEMATIC AND DINAMIC STUDY OF THE SUSPENSION SYSTEM OF AN ELECTRIC SINGLE SEATER COMPETITION FORMULA STUDENT

Christian Arévalo<sup>1,\*</sup>, Ayrton Medina<sup>1</sup>, Juan Valladolid<sup>1</sup>

### Resumen

El nivel de competitividad que genera la Formula Student ha desencadenado en una serie de estudios y avances tecnológicos con el fin de mejorar cada vez más el rendimiento de los monoplazas para que se desenvuelvan con éxito ante las exigencias de la competencia. En este documento se detalla el estudio del sistema de suspensión de un monoplaza de competencia eléctrico Formula Student. Este estudio involucra un análisis de la cinemática y dinámica del sistema de suspensión en el cual se realiza una determinación analítica del movimiento, cargas y vibraciones por medio de software de simulación y de cálculos matemáticos. Con el estudio se busca evaluar el rendimiento de la suspensión en función del reglamento de la competencia, con el fin de establecer parámetros que mejoren el sistema de suspensión y a la vez el desempeño del monoplaza en términos de confort y seguridad.

**Palabras clave:** monoplaza, suspensión, dinámica, cinemática.

### Abstract

The level of competitiveness generated by the Formula Student, has generated a series of studies and technological advances in order to improve the performance of the single seaters, so that its operation is successful according to the requirements of the competition. This document details the study of the suspension system of a Formula Student electric competition single seater. This study involves an analysis of the kinematics and dynamics of the suspension system in which an analytical determination of movement, loads and vibrations is carried out by means of simulation software and mathematical calculations. The aim of the study is to evaluate the performance of the suspension according to the regulations of the competition, to establish parameters that improve the suspension system and at the same time the performance of the car in terms of comfort and safety.

**Keywords:** Single seater, Suspension, Dynamics, Kinematics.

<sup>1,\*</sup>Grupo de Investigación de Ingeniería del Transporte (GIIT), Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca – Ecuador. Autor para correspondencia ✉: carevalom@est.ups.edu.ec.

<https://orcid.org/0000-0002-2906-3553>, <https://orcid.org/0000-0002-9172-7568>,

<https://orcid.org/0000-0002-3506-2522>.

Recibido: 13-04-2018, aprobado tras revisión: 19-06-2018

Forma sugerida de citación: Arévalo, C.; Medina, A. y Valladolid, J. (2018). «Estudio cinemático y dinámico del sistema de suspensión de un monoplaza de competencia eléctrico Formula Student». INGENIUS. N.º 20, (julio-diciembre). pp. 96-107. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n20.2018.09>.

## 1. Introducción

Formula Student es una competencia estudiantil organizada por la SAE (Society of Automotive Engineers o Sociedad de Ingenieros Automotrices) cuyo objetivo principal es fomentar la mejor formación de jóvenes ingenieros [1], desafiando a los estudiantes universitarios a diseñar, construir y probar el rendimiento de un vehículo tipo formula que cumpla exitosamente con las pruebas estipuladas en el reglamento respectivo [2], para luego competir con otros estudiantes de todo el mundo.

Los avances tecnológicos y el nivel de competitividad que genera la Formula Student, han motivado al equipo UPS Racing Team de la Universidad Politécnica Salesiana desarrollar dos monoplazas, el primero fue un monoplaza a combustión para la competencia del 2014 en UK, mientras que el segundo fue un vehículo eléctrico para la competencia de Formula Student Electric de UK en 2017.

De acuerdo con los resultados del año pasado [3], en los eventos dinámicos el monoplaza eléctrico ha tenido inconvenientes con algunos sistemas mecánicos y eléctricos; entre los sistemas mecánicos está la falta de ajustes en los reglajes y la amortiguación de la suspensión, así como un fallo localizado en un miembro del brazo de control inferior de la suspensión posterior.

Considerando que la suspensión desempeña un papel muy importante en el rendimiento de los vehículos en términos de seguridad y confort, se presenta la necesidad de realizar estudios de la suspensión que permitan establecer mejoras ya sea en la puesta a punto o en el diseño con el fin de que el monoplaza pueda ser competitivo.

El principal diseño de suspensión en competición es el paralelogramo deformable (*doublé A-arm* o *dou-ble wishbone*), que puede disponer de tres formas de accionamiento del conjunto muelle-amortiguador como es el directo, por medio de varilla de empuje (*push-rod*) o varilla de tracción (*pull-rod*) [4]. Estos sistemas de suspensión son de diseño sencillo, de fácil ajuste, resistentes, de buena adaptabilidad y pueden llegar a ser ligeros si son hechos con materiales compuestos, razón por la cual son muy utilizados por los monoplazas de Formula 1 y de Formula Student [5].

La suspensión debe incorporar un buen diseño cinemático para mantener el neumático lo más perpendicular posible al pavimento, una amortiguación óptima y tasas de elasticidad adecuadas para mantener el neumático en el suelo en todo momento. Además, los componentes tienen que ser resistentes para que no fallen bajo las cargas estáticas y dinámicas [6–9].

El objetivo de este trabajo es realizar el estudio dinámico y cinemático del sistema de suspensión del vehículo eléctrico Formula Student, mediante programas de simulación cinemática y de cálculos matemáticos para determinar el rendimiento de la suspensión y es-

tablecer mejoras o soluciones a los problemas que se presentan durante el estudio.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Vehículo de estudio

El vehículo que se utiliza para realizar el estudio de la suspensión es un monoplaza de competencia eléctrico Formula Student, como se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Monoplaza de competencia eléctrico Formula Student

Las dimensiones del monoplaza se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Dimensiones del monoplaza eléctrico

Especificación	Dimensión
Ancho de vía delantero	1200 mm
Ancho de vía posterior	1180 mm
Distancia entre ejes	1600 mm
Peso con piloto	345 kgf
Distribución peso delantero	45%
Distribución de peso posterior	55%
Altura del centro de gravedad	300 mm

### 2.2. Características del sistema de suspensión

Las características del sistema de suspensión se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Características del sistema de suspensión

Especificación	Detalle
Tipo de sistema de suspensión (Frontal/posterior)	Paralelogramo deformable
Sistema de accionamiento muelle – amortiguador. (Frontal/posterior)	Push-rod
Barra estabilizadora (Frontal/posterior)	Tipo espadines
Amortiguadores (frontal/posterior)	Ohlins TTX25
Rigidez del muelle (frontal/delantero) (N/mm)	150/200
Recorrido total de la suspensión bote/rebote (mm)	30/30
Material	Fibra de carbono y aluminio 7075 T6
Neumáticos	19.5 x 7.5-10 (Hoosier), R25
Llantas	7 in x 10 in (Braid), offset: +35

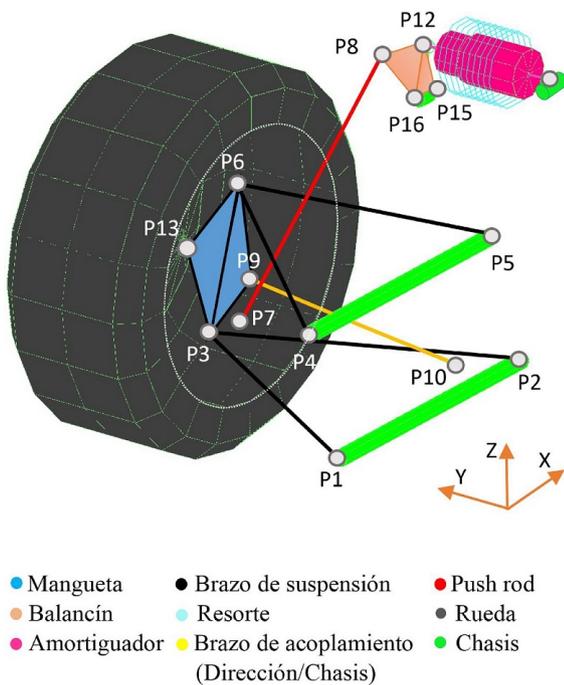
### 2.3. Parámetros geométricos

Se determinan las coordenadas de los puntos de conexión de cada elemento de la suspensión, como se muestra en la Tabla 3. Los puntos de conexión además de permitir definir los parámetros geométricos de la suspensión son necesarios para el programa de simulación de la cinemática y para el cálculo 3D de las fuerzas en los miembros de la suspensión.

**Tabla 3.** Coordenadas de los puntos de conexión de los elementos de la suspensión

Pts.	Suspensión delantera			Suspensión posterior		
	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)
P1	1443,9	212	227,59	15	250	203,59
P2	1732	212	227,59	335	250	203,59
P3	1730	520	218,83	148,83	555	219
P5	1446,6	256	377,59	15	290	347,59
P4	1732	256	377,59	335	290	347,59
P5	1760	520	400,83	171,17	529	401
P6	1710	480,74	244,78	148,83	513	241,8
P8	1710	295,72	509,03	148,83	308	628,68
P9	1790	520	218,83	220	549,14	259,83
P10	1750	190	227,59	220	258,5	234,2
P11	1710	61,21	534,99	148,83	70,51	660,02
P12	1710	238,98	534,99	148,83	245,98	660,2
P13	1760	520	310	160	541,98	310
P14	1760	590	310	160	600	310
P15	1699	238,38	468,88	159,83	245,98	596,42
P16	1721	238,38	468,88	137,83	245,98	596,42

En la Figura 2 se muestra la ubicación de los puntos de conexión de los elementos de la suspensión.



**Figura 2.** Localización de los puntos de conexión de los elementos de la suspensión.

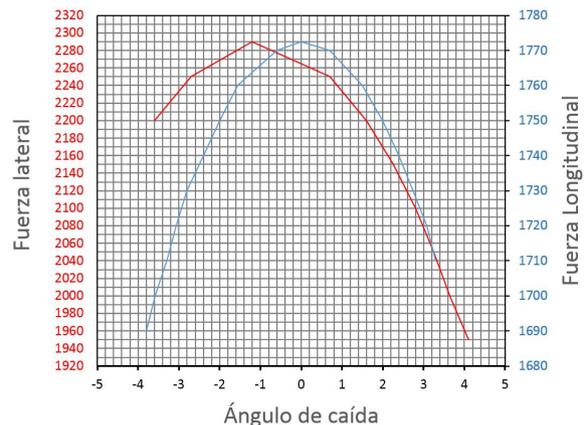
En la Tabla 4 se muestran los parámetros geométricos determinados basados en las dimensiones de la

rueda, ancho de vía, la distancia entre ejes y las coordenadas de los puntos de conexión de la suspensión según [6, 7].

**Tabla 4.** Parámetros geométricos del sistema de suspensión

Parámetro	Suspensión frontal	Suspensión posterior
Altura del centro de balanceo (mm)	44,84	70,02
Ángulo de avance (o)	7	9
Ángulo de salida (o)	8,13	0
Ángulo de caída (o)	0	0
Mechanical Trail (mm)	28,32	70,02
Scrub radius (mm)	24,56	0
Anti-hundimiento / (%)	0	0
Anti-levantamiento		

Se realiza un análisis de los resultados del FSAE TIRE TEST CONSORTIUM [10], referentes al neumático Hoosier®19,5 x 7,5-10, que dispone el monoplaza de estudio. El análisis se efectúa con fin de determinar el rango de ángulos de caída aceptables, el comportamiento del neumático y una predicción de las fuerzas máximas que puede soportar. En la Figura 3 se muestra que la máxima fuerza lateral se presenta para un ángulo de caída de  $-1^\circ$  a  $-1,3^\circ$ , mientras que la máxima fuerza longitudinal se realiza para una caída de  $0^\circ$ . El neumático no sufre una caída brusca en la adherencia tras alcanzar el pico máximo, por lo que se puede establecer un rango de caída efectivo de  $1$  a  $-3^\circ$ .



**Figura 3.** Ángulo de caída a diferentes fuerzas laterales y longitudinales, para un peso normal de 1000 N.

### 3. Resultados y análisis cinemático

Utilizando Lotus Suspension Analysis se realiza un análisis cinemático del sistema de suspensión. El programa permite conocer el comportamiento de la suspensión con la geometría establecida frente a varios

estados en pista como bote y rebote, balanceo y giro de la dirección [11]. Los parámetros que se analizan son aquellos que caracterizan el comportamiento de la suspensión [12], como:

- El centro de balanceo
- El ángulo de caída
- El ángulo de avance
- El toe (convergencia/divergencia)

Para la simulación se insertan en el programa las dimensiones del monoplaza y las coordenadas de los puntos de conexión de cada elemento de la suspensión. Lotus crea un modelo tridimensional del tipo de suspensión a analizar como se muestra en la Figura 4.

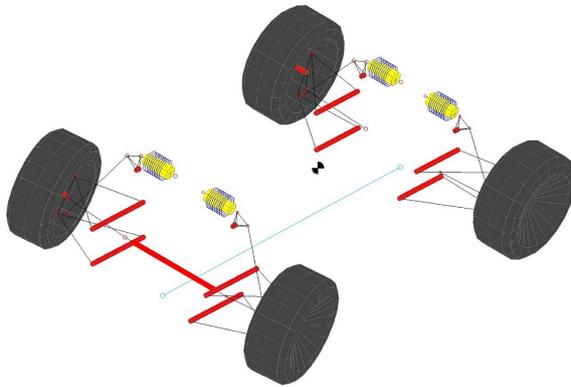


Figura 4. Sistema de suspensión simulado en Lotus Suspension Analysis.

Se analiza la elevación o el rebote de la suspensión en dirección vertical, lo que trata de simular es el paso del monoplaza por un bache u obstáculo de 30 mm de altura. Para este análisis se considera solo la rueda derecha del eje frontal y posterior, debido a que las ruedas izquierdas presentan un comportamiento similar.

La Figura 5 muestra que las ruedas delanteras en la situación de bote tienen una ganancia de caída negativa máxima de  $-1,13^\circ$ , y en rebote una caída positiva máxima de  $0,9^\circ$ . Las ruedas posteriores en la situación de bote tienen una ganancia de caída negativa máxima de  $-1,63^\circ$ , y en rebote una caída positiva máxima de  $1,41^\circ$ . El comportamiento del ángulo de caída es favorable según [13], debido a que cuando el vehículo pase por una curva, la rueda más cargada tendrá una ganancia de caída negativa y la rueda descargada una ganancia de caída positiva, mejorando el agarre lateral y a su vez la tracción. Con el fin de conseguir el máximo de las prestaciones del neumático y reducir el ángulo de caída positivo se puede establecer un ángulo de caída estático para la rueda delantera y posterior de  $-1^\circ$  y  $-1,5^\circ$  respectivamente. Las ruedas al disponer de una caída estática, con la máxima compresión se acercan

a una caída negativa de  $-2,6^\circ$ , manteniéndose dentro de un rango efectivo de  $1^\circ$  y  $-3^\circ$ , según el análisis de los neumáticos. De acuerdo con la recomendación de Carroll Smith [9], se puede reducir el ajuste de caída estática mejorando el agarre del neumático tanto en curvas como en trayectorias rectas.

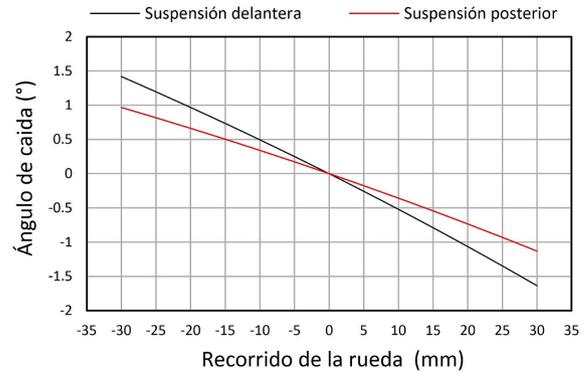


Figura 5. Variaciones del ángulo de caída con bote y rebote de la rueda.

De acuerdo con la Figura 6, el ángulo de avance delantero se hace positivo con el bote de la rueda y negativo con el rebote, mientras que el ángulo de avance posterior tiene una orientación positiva tanto en bote como rebote. El ángulo de avance contribuye a la ganancia del ángulo de caída durante un giro. Según los resultados, el ángulo de avance provocará durante las curvas que la rueda externa tenga una ganancia de caída negativa y la caída de la rueda interna tienda a ser positivo.

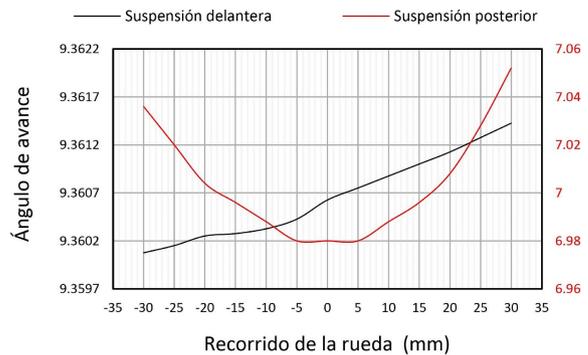
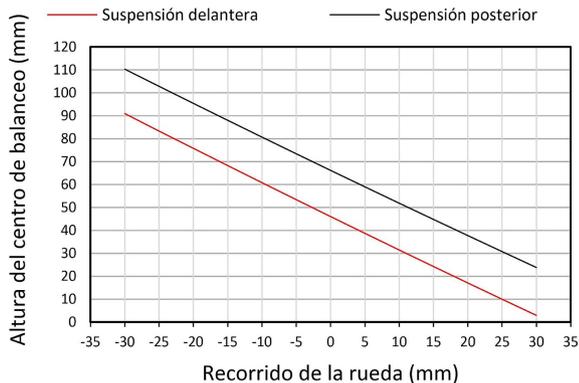


Figura 6. Variaciones del ángulo de avance con bote y rebote de la rueda.

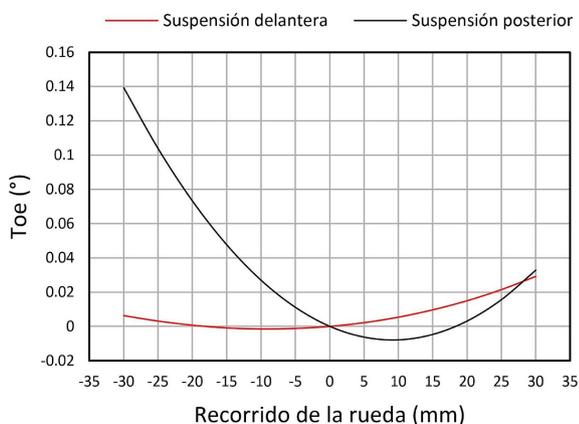
En la Figura 7 se muestra que el máximo recorrido vertical del centro de balanceo con el bote y rebote es de 80,344 mm y 86,4 mm para la suspensión delantera y posterior respectivamente. El centro de balanceo se mantiene en todo momento encima del plano del suelo, algo muy deseable según [14]. La altura del centro de balanceo al centro de gravedad y el efecto anti balanceo de los elementos elásticos, permiten que el

ángulo de balanceo del chasis sea de  $1^\circ$  a una aceleración lateral de 1 G, sin considerar la deformación de los neumáticos.



**Figura 7.** Variaciones de la altura del centro de balanceo con bote y rebote de la rueda.

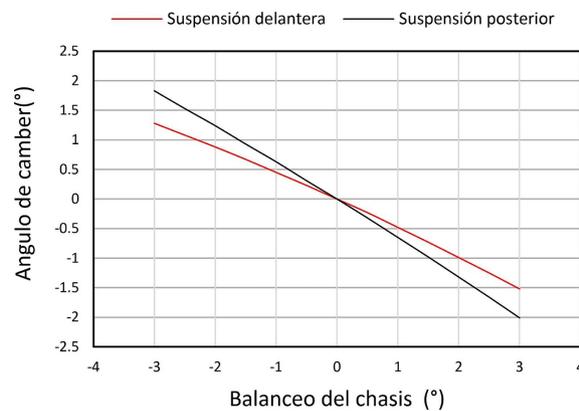
El toe posterior máximo es  $0,1393$  grados con rebote de la rueda y toe delantero máximo es  $0,0328$  grados con bote de la rueda, como se muestra en la Figura 8. Un toe ligeramente positivo reduce la resistencia al rodamiento y un toe negativo mejora la maniobrabilidad en curvas, sin embargo, el toe excesivo eleva el desgaste de los neumáticos. Los valores bajos se deben a que el efecto de *bump steer* es nulo, el cual se ha conseguido con una correcta geometría de los tirantes de dirección.



**Figura 8.** Variaciones del toe con bote y rebote de la rueda.

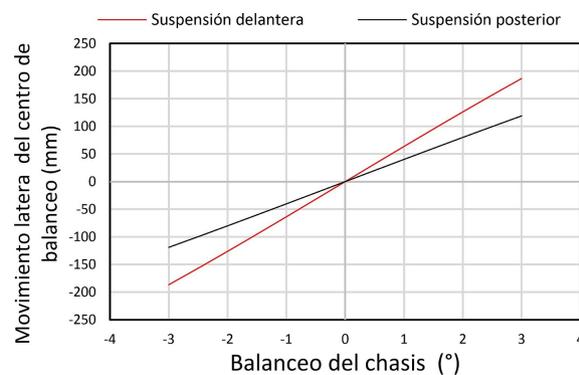
Se simula el paso del coche en curva, el cual hace que la suspensión se incline por efecto de la aceleración centrífuga, la fuerza lateral se traduce en ángulo de balanceo del chasis. De acuerdo con la Figura 9, cuando el balanceo del chasis es positivo la rueda es externa a la curva y si es negativo la rueda es interna a la curva. Con un balanceo de  $3^\circ$  del chasis, el ángulo de caída máximo para la rueda externa e interna del eje delantero es de  $1,28^\circ$  y  $-1,52^\circ$  respectivamente, mientras que en el eje posterior el máximo ángulo de caída es de  $1,83^\circ$  para la rueda exterior y  $2,01^\circ$  para la

rueda interior. En función de los resultados, las ruedas externas a la curva tienen una ganancia de caída negativa, permitiendo una mejora en la adherencia de los neumáticos.



**Figura 9.** Variaciones del ángulo de caída con balanceo del chasis.

En la Figura 10 se observa que los centros de balanceo posterior y delantero tienen un recorrido lateral de  $186,44$  mm y  $119,05$  mm respectivamente, con un balanceo máximo de  $3^\circ$  del chasis. Considerando el efecto en la reducción del balanceo de los elementos elásticos (muelles y barra estabilizadora), así como una aceleración lateral de 1 G; el chasis tendrá  $1^\circ$  de balanceo, donde la migración lateral del centro de balanceo será de  $63,57$  mm/G y  $40,25$  mm/G en la suspensión delantera y posterior respectivamente.



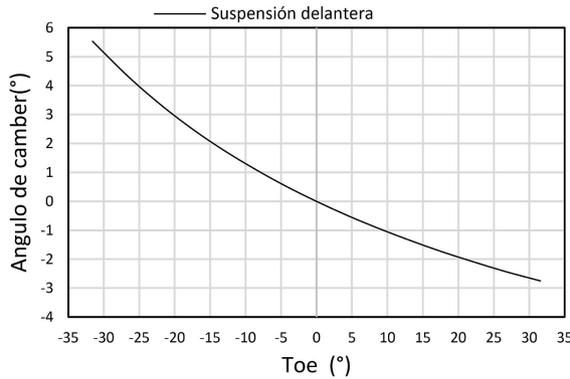
**Figura 10.** Movimiento lateral del centro de balanceo con balanceo del chasis.

La Figura 11 muestra el comportamiento de la rueda delantera derecha con el giro de la dirección. Cuando la rueda es interna a la curva y con el ángulo de giro máximo tiene una caída negativa de  $-2,75^\circ$ . Si la rueda es externa a la curva, con el giro máximo se genera una caída positiva de  $5,33^\circ$ .

#### 4. Resultados y análisis dinámico

Se realizan los cálculos de las fuerzas que se generan en los miembros del sistema de suspensión cuando el

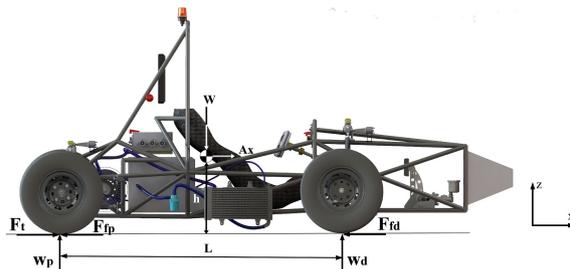
vehículo está sometido a diferentes escenarios de carga dinámica. Es importante considerar tantos escenarios como sea posible porque las fuerzas generadas variarán para cada miembro en función del caso de carga. Se establecen cinco escenarios de carga diferentes a las que el vehículo se somete en un entorno típico de carretera [15].



**Figura 11.** Variaciones del ángulo de caída con el giro de la dirección.

- Aceleración lineal
- Frenado lineal
- Paso por curva
- Aceleración en curva
- Frenado en curva
- Paso por obstáculo

Para cada escenario de carga se calculan las fuerzas que se generan en el sistema referencial, X en dirección longitudinal al vehículo, Z en dirección perpendicular al suelo y Y en dirección transversal al vehículo. Las fuerzas que se generan en el parche del neumático en las direcciones X y Z debido a la aceleración y frenado como se muestra en la Figura 12, vienen definidas por las ecuaciones 1-6:



**Figura 12.** Fuerzas presentes en el parche del neumático durante la aceleración y frenado.

$$Ax = \frac{v_f - v_o}{t} \quad (1)$$

$$Ft = \frac{\mu \times W \times b}{1 - \frac{h}{L} \times \mu} \quad (2)$$

$$Ffp = \mu \times \left( W_e - \frac{W \times Ax \times h}{l} \right) \quad (3)$$

$$Ffd = \mu \times \left( W_e - \frac{W \times Ax \times h}{l} \right) \quad (4)$$

$$Wd = W_{ed} + \frac{W \times Ax \times h}{l} \quad (5)$$

$$Wp = W_{ep} - \frac{W \times Ax \times h}{l} \quad (6)$$

Donde:

$Ax$  = aceleración longitudinal (m/s<sup>2</sup>)

$v_o$  = velocidad inicial (m/s)

$v_f$  = velocidad final (m/s)

$Ft$  = fuerza de tracción (N)

$W$  = peso del vehículo (N)

$l$  = distancia entre ejes (m)

$h$  = altura del centro de gravedad (m)

$\mu$  = coeficiente de adherencia

$W_{ed}$  = peso estático sobre el eje delantero (N)

$W_{ep}$  = peso estático sobre el eje posterior (N)

$Wd$  = peso dinámico sobre el eje delantero (N)

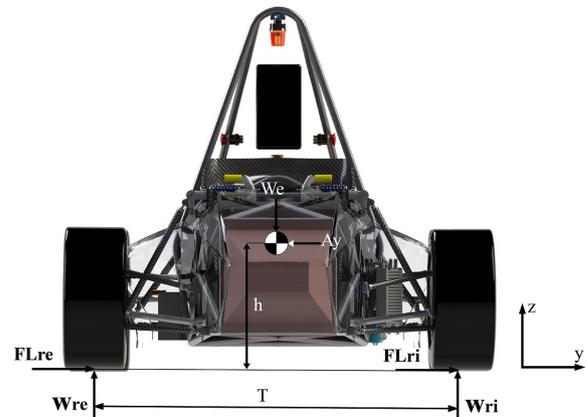
$Wp$  = peso dinámico sobre el eje posterior (N)

$Ffd$  = fuerza de frenado en el eje delantero (N)

$Ffp$  = fuerza de frenado en el eje posterior (N)

$b$  = distancia del eje posterior al centro de gravedad (m)

Las fuerzas que se generan en el parche del neumático en las direcciones Y y Z debido al paso por curva como se muestra en la Figura 13, se determinan por las ecuaciones 7, 8, 9.



**Figura 13.** Fuerzas presentes en el parche del neumático en paso por curva.

$$Fl = \frac{m \times v^2}{4 \times r} \quad (7)$$

$$w_{re} = \frac{W_e}{2} + \frac{W_e \times Ay \times h}{T} \quad (8)$$



$$[A] = \begin{bmatrix} u_{PRx} & u_{BCSFx} & u_{BCSTx} & \dots \\ u_{PRy} & u_{BCSFy} & u_{BCSTy} & \dots \\ u_{PRz} & u_{BCSFz} & u_{BCSTz} & \dots \\ (u_z r_y - u_y r_z)_{PR} & (u_z r_y - u_y r_z)_{BCSF} & (u_z r_y - u_y r_z)_{BCST} & \dots \\ (u_z r_x - u_x r_z)_{PR} & (u_z r_x - u_x r_z)_{BCSF} & (u_z r_x - u_x r_z)_{BCST} & \dots \\ (u_y r_x - u_x r_y)_{PR} & (u_y r_x - u_x r_y)_{BCSF} & (u_y r_x - u_x r_y)_{BCST} & \dots \\ \dots & u_{BCIFx} & u_{BCITx} & u_{BAx} \\ \dots & u_{BCIFy} & u_{BCITy} & u_{BAy} \\ \dots & u_{BCIFz} & u_{BCITz} & u_{BAz} \\ \dots & (u_z r_y - u_y r_z)_{BCIF} & (u_z r_y - u_y r_z)_{BCIT} & (u_z r_y - u_y r_z)_{BA} \\ \dots & (u_z r_x - u_x r_z)_{BCIF} & (u_z r_x - u_x r_z)_{BCIT} & (u_z r_x - u_x r_z)_{BA} \\ \dots & (u_y r_x - u_x r_y)_{BCIF} & (u_y r_x - u_x r_y)_{BCIT} & (u_y r_x - u_x r_y)_{BA} \end{bmatrix} \quad (16)$$

En las Tablas 5 y 6 se muestran las máximas fuerzas de tensión y compresión en los miembros del sistema de suspensión, como resultado de los diferentes escenarios de carga. Las máximas fuerzas de tensión en los miembros de los brazos de suspensión son de -4313 N y -5131 N en la parte delantera y posterior respectivamente, y las máximas fuerzas de compresión son de 4165 N y 5119 N. Las barras push-rod delantera y posterior trabajan solo a compresión donde las fuerzas son de 5358 N y 8544 N para la parte delantera y posterior respectivamente.

**Tabla 5.** Resultados de las fuerzas en los miembros de la suspensión delantera

Escenarios de carga	Fuerzas en los miembros de la suspensión delantera					
	FPR	FBCSF	FBCST	FBCIF	FBCIT	FBAD
Aceleración (N)	487	109	82	-272	-178	-58
Frenado (N)	1149	4162	-2726	-2021	3350	-2623
Curva (N)	1092	-1160	-1459	1063	957	825
Aceleración y curva (N)	296	-1339	-1594	1508	1248	918
Frenado y curva (N)	2495	1013	4165	146	-4313	-1109
Paso por obstáculo (N)	5358	1203	906	-2990	-1954	-629
Máxima fuerza (N)	5358	4162	4165	-2290	-4313	-2623

**Tabla 6.** Resultados de las fuerzas en los miembros de la suspensión posterior

Escenarios de carga	Fuerzas en los miembros de la suspensión posterior					
	FPR	FBCSF	FBCST	FBCIF	FBCIT	FBAD
Aceleración (N)	1494	-3942	2874	4775	-5131	-776
Frenado (N)	754	2582	-1333	-2437	988	482
Curva (N)	2239	998	-2225	-155	1297	-625
Aceleración y curva (N)	2090	-3168	238	5119	-2503	52
Frenado y curva (N)	956	-1772	-949	3553	-153	-268
Paso por obstáculo (N)	8544	1646	1986	-2593	-2915	521
Máxima fuerza (N)	8544	-3942	2874	5119	-5131	776

Se realizan ensayos de compresión y tracción para determinar si los miembros soportan las máximas car-

gas calculadas. En la prueba de tracción se mide la fuerza de unión entre los injertos de aluminio y el tubo de fibra de carbono [17]. El injerto es un elemento de aluminio pegado con un adhesivo de alta resistencia al tubo de fibra de carbono, permitiendo el anclaje al chasis o a la mangueta por medio de rótulas. Los tubos son de dos diámetros externos, de 18,1 mm y 21,3 mm con un espesor de 1,15 mm, El tubo de mayor diámetro es utilizado para la barra *push-rod* y los brazos de acoplamiento. El tubo de menor diámetro es utilizado para los brazos de suspensión.

**Tabla 7.** Resultados de los ensayos de compresión y tracción de los miembros de la suspensión

Diámetro de tubo (mm)	Fuerza de tracción (KN)	Fuerza de compresión (KN)
18,1	2,9	13,59
21,3	8,93	13,88

Según resultados de la Tabla 7, se puede decir que los miembros de los brazos de suspensión podrían fallar en tensión ya que de acuerdo con el ensayo de tracción la fuerza de unión máxima es de 2,9 KN, y la fuerza de tensión máxima en un miembro del brazo de suspensión es de -5,13 KN. Para el caso de compresión los miembros están sometidos a pandeo, por lo tanto, es necesario realizar un cálculo de pandeo crítico ( $P_{cr}$ ) y del factor de seguridad ( $F_s$ ) definidos por las ecuaciones 18 y 19. El cálculo permitirá predecir con más exactitud un caso de falla por compresión [18].

$$P_{cr} = \frac{C\pi^2 El}{l^2} \quad (17)$$

$$F_s = \frac{P_{cr}}{c} \quad (18)$$

Donde:

$C$  = constante de condición de extremos articulados

$P$  = fuerza axial (N/m<sup>2</sup>)

$E$  = módulo de elasticidad del material (N/m<sup>2</sup>)

$I$  = momento de inercia (m<sup>4</sup>)

$l$  = longitud de la barra (m)

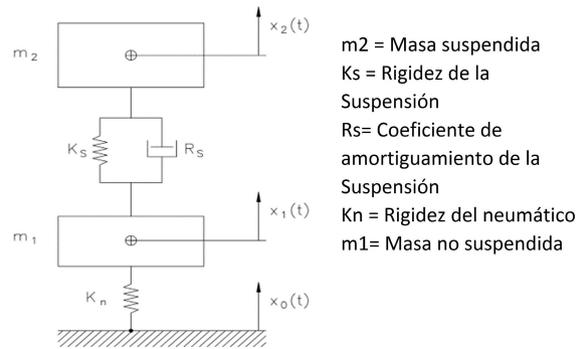
De acuerdo con los resultados de la Tabla 8, los miembros de los brazos de suspensión, push-rod y brazo de acoplamiento no fallarían por efectos de pandeo ya que según el cálculo tienen factores de seguridad mayores que 2 y soportan fuerzas de compresión mayores a 13 KN.

**Tabla 8.** Resultados del cálculo de pandeo crítico y factor de seguridad de los miembros de la suspensión que trabajan a compresión

Diámetro del tubo (mm)	Pandeo crítico (N)	Fuerza axial (N)	Factor de seguridad
18,1	14 181,35	5119	2,77
21,3	18 769,27	8544	2,19

Dado que una de las tareas más importantes del sistema de suspensión es absorber las irregularidades del camino sin perder tracción en los neumáticos, la gran mayoría de los autos están equipados con amortiguadores y resortes que cumplen con ello. En esta sección mediante un modelo de 2 grados de libertad del sistema de suspensión de 1/4 de vehículo [19], se realiza el análisis de las frecuencias de la suspensión,

haciendo una interacción entre el camino y el vehículo. En la Figura 16 se muestra el modelo de la suspensión de un cuarto de vehículo de 2 grados de libertad, en donde incluye la constante elástica del neumático, así como la masa no suspendida. La posición de la masa suspendida es  $X_1$ , de la masa no suspendida es  $X_2$  y  $X_0$  sirve para modelar las irregularidades del terreno.



**Figura 16.** Modelo completo de un cuarto de vehículo [11].

La función de transferencia de 2 grados de libertad viene dada por la siguiente expresión:

$$\frac{x_2(s)}{x_0(s)} = \frac{R_s \cdot K_n \cdot s \cdot K_s \cdot K_n}{(m_1 \cdot s^2 + R_s \cdot s + K_s + K_n)(m_2 \cdot s^2 + R_s \cdot s + K_s) - (R_s \cdot s - K_s)^2} \quad (19)$$

Con el modelado definido se establecen los parámetros iniciales necesarios que permitan realizar el estudio como se muestra en la Tabla 9.

**Tabla 9.** Parámetros del modelo de un cuarto de vehículo

Parámetro	Suspensión frontal	Suspensión posterior
m2: masa suspendida (kg)	61,1	74,75
Ks: rigidez de la suspensión (N/m)	26 220,47	34 960,62
Rs: coeficiente de amortiguamiento de la suspensión (Ns/m)	.....	.....
Kn: rigidez del neumático (N/m)	102 917,699	132 322,756
m1: masa no suspendida (kg)	10,9	13,25
MR: motion ratio	1,3	1,4
Kw: rigidez de la rueda (N/m)	15515,071	17837,051
fm2: frecuencia natural de la masa suspendida (Hz).	2,36	2,3
fm1: frecuencia natural de la masa no suspendida (Hz)	16,62	16,81
Ccr: coeficiente de amortiguación crítico (Ns/m)	2487,28	3233,274

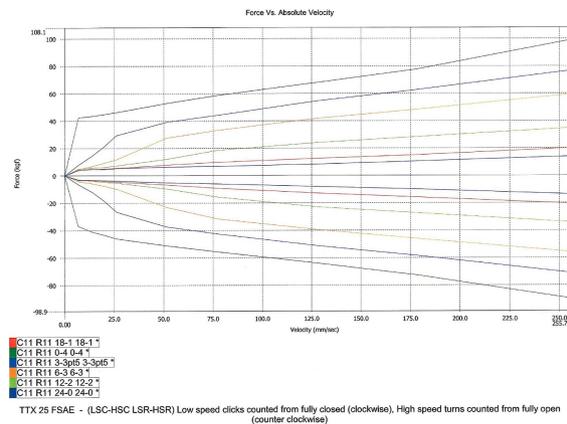
La fuerza desarrollada por un amortiguador ( $F_a$ ) está representada por la ecuación:

$$F_d = R_s \cdot v_p \quad (20)$$

Donde:

- $R_s$  = coeficiente de amortiguación [Ns/m]
- $v_p$  = velocidad en el pistón del amortiguador [m/s]

Usando el software matemático Matlab se analiza la transmisibilidad del sistema de suspensión a diferentes coeficientes de amortiguamiento para alta y baja velocidad que provee el amortiguador TTX 25 [20]. Por medio de la ecuación 21 y la gráfica de la Figura 17 se determinan las pendientes o coeficientes de amortiguación para los diferentes ajustes del amortiguador como se muestra en la Tabla 10.



**Figura 17.** Fuerza desarrollada por el amortiguador TTX25 para diferentes ajustes. [21]

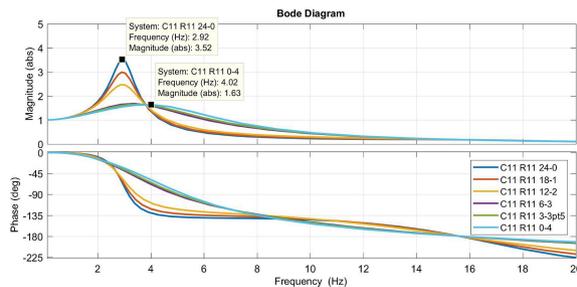
Para maximizar el área de tracción, se requiere la menor transmisibilidad posible. En las gráficas de las Figuras 18 y 19 se muestra la respuesta del modelo de

segundo grado de la suspensión frontal y posterior. Se puede observar que si a bajas frecuencias de entrada se aumenta el factor de amortiguación, la transmisibilidad se reduce al máximo, lo que significa que el neumático no perderá tracción. Después del punto de intersección, los factores de amortiguamiento bajos resultan con una menor transmisibilidad, atenuando el movimiento en el chasis [22].

**Tabla 10.** Coeficientes de amortiguación para diferentes ajustes del amortiguador

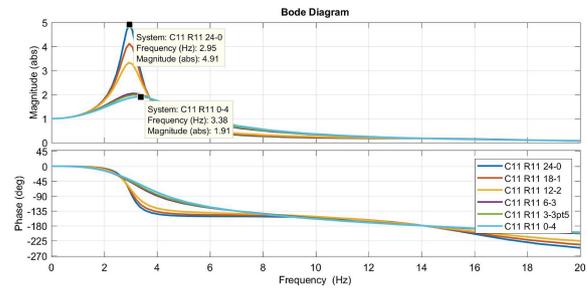
Ajuste del amortiguador	Bajas velocidades Pendiente [KN*s/m]	Altas velocidades Pendiente [N*s/m]
C11 R11 0-4	52,788	2223
C11 R11 3-3pt5	11,77	1962
C11 R11 6-3	5,282	1831
C11 R11 12-2	2,354	882,9
C11 R11 18-1	3,678	689,1
C11 R11 24-0	3,678	567,5

De acuerdo con el análisis de transmisibilidad es necesario un alto factor de amortiguamiento ( $\xi$ ) a bajas velocidades y un valor bajo para altas velocidades en el amortiguador. El amortiguador TTX25, para la suspensión delantera necesita un valor muy cercano de  $\xi = 0,73$ , el cual se logra con el ajuste C11 R11 6-3 para baja velocidad. Para altas velocidades el ajuste C11 R11 24.0 provee un  $\xi = 0,22$ . En la suspensión posterior se necesita un valor de  $\xi = 0,68$ , el cual se logra con el ajuste C11 R11 0-4 para baja velocidad. Para altas velocidades el ajuste C11 R11 18.1 provee un  $\xi = 0,22$ .



**Figura 18.** Transmisibilidad del modelo de segundo grado de la suspensión delantera.

Como el sistema se mueve tanto a compresión como extensión, según [23] es mejor tener un factor de amortiguamiento menor a compresión y mayor a extensión con relación al valor deseado para lograr evitar resonancia en el sistema (ver Figura 20).



**Figura 19.** Transmisibilidad del modelo de segundo grado de la suspensión posterior.

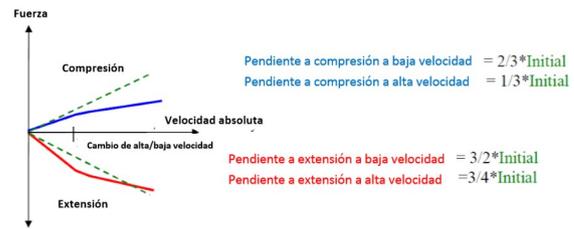


Figura 4. 22 Ajuste de pendiente para altas velocidades (fuente [19]).

**Figura 20.** Ajuste de la pendiente para altas velocidades y bajas velocidades. [23]

De acuerdo con el análisis realizado se establece utilizar el doble del factor de amortiguamiento de compresión para la extensión. De esta forma, se logra conseguir una buena adherencia de la rueda, una menor transmisibilidad y mejor maniobrabilidad. Las calibraciones que cumplen con estos requisitos se muestran en las Tablas 11 y 12.

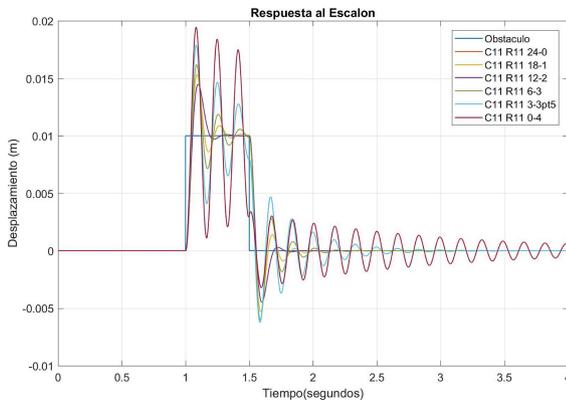
**Tabla 11.** Factor de amortiguamiento de la suspensión delantera

Ajuste del amortiguador	Compresión		Extensión	
	Baja velocidad	Alta velocidad	Baja velocidad	Alta velocidad
C11 R11 12-2	0,92	0,34	.....	.....
C11 R11 6-3	.....	.....	2,08	0,72

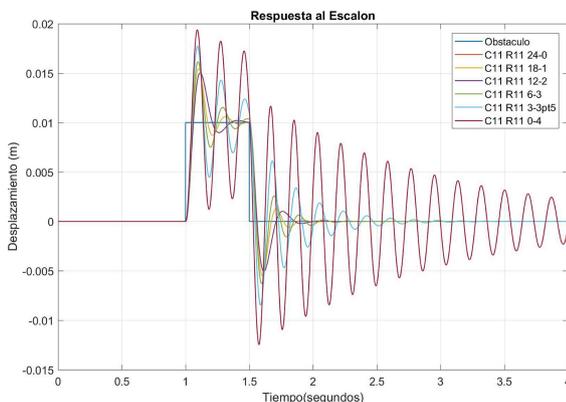
**Tabla 12.** Factor de amortiguamiento de la suspensión posterior

Ajuste del amortiguador	Compresión		Extensión	
	Baja velocidad	Alta velocidad	Baja velocidad	Alta velocidad
C11 R11 12-2	0,72	0,27	.....	.....
C11 R11 6-3	.....	.....	1,63	0,56

Las Figuras 21 y 22 muestran la respuesta del sistema de la suspensión delantera y posterior respectivamente ante un desplazamiento vertical como entrada. Se puede observar que las calibraciones del factor de amortiguamiento de baja velocidad en compresión atenúan en el menor tiempo posible las oscilaciones con respecto a otras calibraciones.



**Figura 21.** Respuesta del sistema de suspensión delantera ante un desplazamiento vertical como entrada.



**Figura 22.** Respuesta del sistema de suspensión posterior ante un desplazamiento vertical como entrada.

## 5. Conclusiones

Esta investigación ayuda a tener una visión más amplia de los sistemas de suspensión que utilizan los vehículos de competencia FSAE. Con el estudio de la cinemática se determinó el comportamiento de la suspensión del monoplaza bajo diferentes escenarios en pista, como el paso por curva o por un obstáculo. En función de los resultados se puede decir que la configuración que dispone la suspensión del monoplaza, permite un buen control direccional del vehículo (efecto *bump steer* nulo) y una ganancia de caída negativa adecuada de la rueda con el recorrido de la suspensión o el balanceo del chasis, dotando de un buen agarre lateral a los neumáticos, sin embargo, con el giro de la dirección hay una ganancia de caída positiva excesiva en las ruedas delanteras, que afectaría el agarre lateral en curvas muy cerradas. Con los ajustes adecuados en los ángulos de avance, salida, caída estática y convergencia, se podría asegurar las condiciones requeridas u óptimas de estabilidad del vehículo y de la dirección, permitiendo mayores aceleraciones, mejor frenado y pasos por curva más rápidos. De acuerdo con el estudio de las fuerzas en

los miembros de la suspensión ante cargas dinámicas, se determinó que los brazos de suspensión sometidos a cargas de tensión pueden fallar en los casos críticos, el problema está en la fuerza de unión entre los injertos de aluminio. Con el modelo de segundo grado de un cuarto de vehículo y con la ayuda de Matlab, se realizó un análisis de transmisibilidad que permitió definir las características que el amortiguador debe tener para garantizar máxima área de contacto, lo que produce una mayor tracción.

## Referencias

- [1] IMechE. Formula student. Institution of Mechanical Engineers. [Online]. Available: <https://goo.gl/Mkjf9n>
- [2] S. International. (2017) Formula sae rules. [Online]. Available: <https://goo.gl/pSeNqe>
- [3] Formula Studente Germany. (2017) Formula student electric - world ranking list. Mazur Events+Media. [Online]. Available: <https://goo.gl/2Q75AE>
- [4] A. Staniforth, *Competition Car Suspension: Design, Construction, Tuning*, Haynes, Ed., 1999. [Online]. Available: <https://goo.gl/2jhg7s>
- [5] Rapid-Racer. (2016) Suspension. [Online]. Available: <https://goo.gl/5Dpwjr>
- [6] W. F. Milliken and D. L. Milliken, *Race Car Vehicle Dynamics*, S. International, Ed., 1995. [Online]. Available: <https://goo.gl/iuhFqJ>
- [7] T. Pashley, *How to Build Motorcycle-engined Racing Cars*, V. P. Ltd, Ed., 2008. [Online]. Available: <https://goo.gl/XdxRGM>
- [8] M. Royce and S. Royce, *Learn & Compete: A Primer for Formula SAE, Formula Student and Formula Hybrid Teams*, R. Graphic, Ed., 2012. [Online]. Available: <https://goo.gl/9rxtrG>
- [9] C. Smith, *Tune to Win*, C. S. Consulting, Ed., 1978. [Online]. Available: <https://goo.gl/KaTkxq>
- [10] Milliken Research. (2018) Formula sae tire test consortium. Milliken Research Associates Incorporated. [Online]. Available: <https://goo.gl/ErGrP5>
- [11] G. P. Pillajo Quijia, "Estudio cinemático del comportamiento de la suspensión de un prototipo de formula sae student eléctrico del equipo upm racing," Master's thesis, Universidad Politécnica de Madrid. España, 2012. [Online]. Available: <https://goo.gl/aTb5mt>

- [12] P. De la fuente aguiler, "Análisis de la suspensión del vehículo monoplaça eléctrico UPM-03e del equipo UPM racing," Universidad Politécnica de Madrid. España., 2016. [Online]. Available: <https://goo.gl/PvvCV3>
- [13] S. Juvanteny Gimenez, "Estudio y diseño del sistema de suspensión para un prototipo de fórmula sae," Tesis de grado. Universidad Politécnica de Cataluña. España, 2015. [Online]. Available: <https://goo.gl/q93zhh>
- [14] E. I. Efler herranz, "Diseño de la suspensión trasera de un vehículo formula student," Tesis de grado. Universidad Politécnica de Madrid. España, 2016. [Online]. Available: <https://goo.gl/YkgNnv>
- [15] E. D. Flickinger, "Design and analysis of formula sae car suspension members," Master's thesis, California State University, Northridge. EEUU, 2014. [Online]. Available: <https://goo.gl/tcUw5g>
- [16] L. Borg, "An approach to using finite element models to predict suspension member loads in a formula sae vehicle," Master's thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University. USA, 2009. [Online]. Available: <https://goo.gl/i8bV4B>
- [17] A. C. Cobi, "Design of a carbon fiber suspension system for fsae applications," Bachelor thesis. Massachusetts Institute of Technology. USA, 2012. [Online]. Available: <https://goo.gl/h1tQU3>
- [18] R. G. Budynas and J. K. Nisbett, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, 9<sup>th</sup> ed., M. Mc Graw-HILL, Ed., 2012. [Online]. Available: <https://goo.gl/dumukn>
- [19] F. Aparicio Izquierdo, *Teoría de los vehículos automóviles*, E. T. S. d. I. I. Universidad Politécnica de Madrid, Ed., 1995. [Online]. Available: <https://goo.gl/M2EHoy>
- [20] J. Hurel, E. Teran, F. Flores, and B. Flores, "Modelo físico y matemático del sistema de suspensión de un cuarto de vehículo," in *15th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology. USA*, 2017. [Online]. Available: <https://goo.gl/7yrFEK>
- [21] 'OHLINS. (2017) Ttx25 mkii,. 'OHLINS. Advanced Suspension Technology. [Online]. Available: <https://goo.gl/Kra2dB>
- [22] A. Espejel Arroyo, "Rediseño de un sistema de suspensión para un auto de competencia mediante adams/car y matlab," Tesis de grado. Universidad Nacional Autónoma de México, 2015. [Online]. Available: <https://goo.gl/sTxBg9>
- [23] M. Giariffa and S. Brisson, "Tech tip: Spring & dampers, episode four. a new understanding," OPTIMUMG. Vehicle dynamics solutions, Tech. Rep., 2017. [Online]. Available: <https://goo.gl/kVkg6o>



# SISTEMA DE ACCESO USANDO UNA TARJETA RFID Y VERIFICACIÓN DE ROSTRO

## ACCESS SYSTEM USING AN RFID CARD AND FACE VERIFICATION

José Ignacio Vega-Luna<sup>1,\*</sup>, Francisco Javier Sánchez-Rangel<sup>1</sup>, Gerardo Salgado-Guzmán<sup>1</sup>, Mario Alberto Lagos-Acosta<sup>1</sup>

### Resumen

En este trabajo se presenta el desarrollo de un prototipo de sistema de acceso a un centro de datos usando como identificación una tarjeta de radio frecuencia o RFID y verificación del rostro del usuario. El sistema se compone de tres módulos de entrada y un módulo central. El objetivo fue diseñar un sistema para transmitir, desde cada módulo de entrada al módulo central, el identificador único universal de la tarjeta RFID o UUID y la imagen del rostro del usuario para consultar en una base de datos MySQL y en un directorio de fotografías si el usuario puede acceder al área correspondiente del módulo de entrada. Cada módulo de entrada consta de una tarjeta Raspberry Pi 3 B+, un lector de tarjetas RFID, una cámara de video y una pantalla de cristal líquido o LCD. El módulo central se compone de los mismos elementos que los módulos de entrada y cuenta con una pantalla táctil usada en la interfaz de usuario en lugar de una pantalla LCD. La comunicación entre los nodos es wifi, logrando una precisión del 99,2 % en la verificación del rostro y un tiempo de respuesta de 180 ms usando 310 fotografías entrenadas.

**Palabras clave:** cámara de video, MySQL, pantalla táctil, Raspberry Pi 3 B+, verificación de rostro, RFID.

### Abstract

This paper presents the development of an access system to a data center using a RFID card and verification of the user's face. The system consists of three input modules and a central module. The objective was to design a system to transmit, from each input module to the central module, the universal unique identifier of the RFID card or UUID for its acronym in English and the user's face image to consult in a MySQL database and in a directory of photographs if the user can access the corresponding area of the input module. Each input module consists of a Raspberry Pi 3 B+ card, an RFID card reader, a video camera and a liquid crystal display or LCD for its acronym in English. The central module is composed of the same elements as the input modules and has a touch screen used in the user interface instead of an LCD screen. The communication between the nodes is WiFi, achieving a precision of 99.2% in the verification of the face and a response time of 180 ms using 310 trained photographs.

**Keywords:** Face verification, MySQL, Raspberry Pi 3 B+, RFID, touchscreen, video camera.

<sup>1,\*</sup>Área de Sistemas Digitales, Departamento de Electrónica, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco Cd. de México, México. Autor para correspondencia ✉: vlji@correo.azc.uam.mx.

<https://orcid.org/0000-0002-4226-2936>,

<https://orcid.org/0000-0002-4182-5856>,

<https://orcid.org/0000-0002-0581-7410>,

<https://orcid.org/0000-0003-0455-007X>.

Recibido: 14-05-2018, aprobado tras revisión: 21-06-2018

Forma sugerida de citación: Vega-Luna, J. I.; Sánchez-Rangel, F. J.; Salgado-Guzmán, G. y Lagos-Acosta, M. A. (2018). «Sistema de acceso usando una tarjeta RFID y verificación de rostro». INGENIUS. N.º 20, (julio-diciembre). pp. 108-118. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n20.2018.10>.

## 1. Introducción

Los centros de procesamiento de datos (CPD), también llamados centros de datos, son instalaciones que concentran recursos y equipos necesarios para el procesamiento y almacenamiento de información, así como equipos de telecomunicaciones de empresas y organizaciones. En los centros de datos se usan distintos dispositivos para acceder a las instalaciones que incluyen cerraduras electromagnéticas, torniquetes, cámaras de video, detectores de movimiento, tarjetas de identificación, sistemas biométricos y teclados para introducir una clave de acceso, entre otros. Comúnmente, los centros de datos se dividen en secciones llamadas búnkeres y periódicamente son sometidos a auditorías para poder estar certificados. Un punto importante que consideran las auditorías son los procedimientos y técnicas usados en la seguridad y acceso a las instalaciones [1]. En la actualidad existen diferentes soluciones para la identificación de personas para controlar el acceso a los búnkeres de un centro de datos. Algunas soluciones biométricas se basan en el reconocimiento de huella digital, de rostro, de geometría de la mano, de iris, de patrón de retina, de voz y firma de la persona [2].

El presente trabajo considera el requerimiento de una empresa operadora de centro de datos. El objetivo formulado fue contar con un sistema de acceso que use como medio de identificación una tarjeta RfID y verificación del rostro del usuario para activar el actuador de la puerta de acceso del búnker donde el usuario está intentado acceder. El acceso debe contar con dos niveles de seguridad. Los requerimientos establecidos fueron un sistema confiable, fácil de ubicar y usar. Se requirió el empleo de tarjetas RfID por ser económicas y fáciles de utilizar. La distancia máxima del búnker más lejano a la oficina de monitoreo son 65 metros y al punto de acceso wifi 35 metros con línea de vista. La solución propuesta consistió de sistema integrado por tres módulos de entrada y un módulo central. El centro de datos cuenta con tres búnkeres en cuya puerta de acceso se instaló un módulo de entrada. El módulo central se instaló en la oficina de monitoreo del centro de datos. Los módulos de entrada se encargan de leer la información almacenada en la tarjeta RfID, capturar la fotografía del rostro del usuario y transmitir la información de la tarjeta y archivo de la fotografía JPEG al módulo central para su validación, usando tecnología wifi.

No se utilizó un segmento Ethernet para transmitir la información de identificación del usuario a la oficina de monitoreo para no instalar cableado adicional o modificar el existente. Una vez recibida la información, el módulo central consulta en la base de datos de usuarios si el UUID de la tarjeta RfID está autorizado a entrar al búnker asociado al módulo de entrada, verifica que el rostro del usuario sea el que se encuentra

registrado en el directorio de fotografías y registra en la base de datos la fecha y hora de solicitud de entrada. Si se cumplen las dos condiciones anteriores, el módulo central transmite la orden al módulo de entrada para activar el actuador de la puerta correspondiente. Los módulos de entrada y el módulo central se implantaron usando como base una tarjeta Raspberry Pi 3 B+ con sistema operativo Raspbian. La razón principal de usar la tarjeta Raspberry Pi fue porque existe una gran cantidad de aplicaciones y bibliotecas desarrolladas por la comunidad de código abierto de fácil instalación, configuración y uso en Raspbian [3]. En el sistema aquí presentado se implantó como primer mecanismo de seguridad el uso de una tarjeta RfID y se utilizó el dispositivo NFC/RfID 532 para la lectura de tarjetas. La tecnología de comunicación de campo cercano, NFC, surgió por la combinación de la tecnología RfID y las tarjetas inteligentes. Permite la identificación y caracterización de personas u objetos sin contacto físico usando las ondas de radio transmitidas por una etiqueta. La tecnología RfID permite el intercambio de información entre objetos ubicados cerca uno del otro. La comunicación con NFC es más segura que otras tecnologías ya que el transmisor y receptor están estrechamente acoplados y próximos, con una cercanía máxima de 10 centímetros, sin necesidad de ejecutar una aplicación. Los últimos años han aparecido varios usos de la tecnología NFC con teléfonos móviles, en Internet de las cosas o IoT y en el campo de sensores [4].

Aunque inicialmente se estableció usar tarjetas RfID, se exploraron tecnologías alternas para la identificación de usuarios. Tecnologías como los códigos de respuesta rápida o QR y el sistema iBeacon. Los códigos QR son una mejora a los códigos de barras, almacenan información en matrices de puntos o códigos de barras de forma bidimensional [5]. Cuando un dispositivo móvil lee un código QR ejecuta una aplicación para realizar una acción específica. En el desarrollo de este trabajo pudo usarse una combinación de tecnología RfID y códigos QR, pero resultaría un sistema un poco más costoso y lento, ya que además de usar un método de impresión del código QR en las tarjetas RfID, estas no podrían reutilizarse. Por otra parte, iBeacon es un protocolo usado en sistemas de posicionamiento en interiores, o IPS, patentado por Apple Inc. Está basado en transmisores de bajo costo y bajo consumo de energía que indican su presencia a un dispositivo con sistema operativo iOS y a algunos dispositivos con sistema operativo Android [6]. Existen proveedores de transmisores, llamados *beacons*, compatibles con iBeacon. Los *beacons* usan transmisores de tecnología Bluetooth de bajo consumo de energía o BLE por sus siglas, o Bluetooth 4.0, los cuales transmiten su UUID a dispositivos electrónicos móviles, permitiendo que un teléfono móvil o tableta ejecute una acción o aplicación basada en la ubicación del *beacon* al recibir la identificación, o dar seguimiento a clientes o usuarios

de beacons. El sistema iBeacon se utiliza en comercio móvil, donde una aplicación, ejecutándose en un teléfono móvil, puede encontrar la ubicación de un producto asociado a un *beacon* dentro de una tienda o un *beacon* puede enviar ofertas o promociones al teléfono móvil. En otras aplicaciones los beacons transmiten al teléfono móvil información de tiendas y restaurantes cercanos, así como tiempos de espera o distribución de mensajes de puntos de interés de acuerdo con el lugar donde se encuentre el teléfono. La tecnología iBeacon difiere de otras, como NFC/RFID, en que la transmisión realizada por el *beacon* es en un solo sentido y necesita que se ejecute una aplicación en iOS o Android. Pudo haber sido una opción usar iBeacon en el desarrollo de este trabajo, lo cual implicaría usar un *beacon* como identificador del usuario y un dispositivo con iOS en cada punto de acceso al centro de datos, lo que aumentaría la complejidad en el uso, instalación y costo del sistema [7].

Con la explosión de servicios basados en la Internet, o Internet de las cosas, la tecnología RFID continúa usándose en distintos desarrollos y aplicaciones de identificación, incluyendo cadena de suministros [8], cuidado de la salud, localización de objetos, automatización de hogares, sistemas de seguridad y entrega de productos en restaurantes [9]. Se han realizado trabajos de sistemas de acceso a instalaciones basados en Arduino, tarjetas RFID y bases de datos MySQL. La diferencia con respecto al aquí presentado es que se usa una tarjeta Raspberry de tecnología más reciente y menor costo que Arduino [10]. Adicionalmente, los trabajos que se han desarrollado usan comunicación Ethernet a la base de datos y en este trabajo se usó tecnología inalámbrica wifi cuya implantación es no intrusiva a las instalaciones del centro de datos [11]. De manera similar, se han realizado trabajos de sistemas de acceso a hogares, oficinas, e incluso a vehículos, que usan teléfonos inteligentes para emular tarjetas NFC y lectores NFC PN532 [12] como el utilizado en este trabajo. En estos sistemas el usuario debe portar un teléfono inteligente para identificarse, lo cual no es factible ni es una opción en los centros de datos debido al costo y que en ocasiones los usuarios son visitantes. Se han llevado a cabo también diversos trabajos que utilizan códigos QR o una combinación de estos con tarjetas RFID para controlar el acceso a instalaciones, para sistemas de localización y navegación [13] y para identificación de productos [14] e imágenes médicas. Inclusive, se han realizado sistemas de acceso a centros de datos combinando códigos QR y marcas de agua [15]. El uso de códigos QR proporciona un nivel de seguridad más alto que las tarjetas RFID, pero el costo de implantación y operación de estos sistemas es elevado, ya que una vez usada una tarjeta con un código QR no puede utilizarse para otro usuario y el *hardware* de impresión y lectura de códigos QR es de más alto precio que un lector NFC. Otros trabajos re-

alizados recientemente para identificación, localización y control de acceso integran tecnologías iBeacon y wifi [16] o Bluetooth LE. Estos sistemas tienen la limitante de usar dispositivos con sistema operativo iOS o Android, lo cual hace que sean de mayor costo que al desarrollado en este trabajo.

Como segundo mecanismo de seguridad se utiliza la verificación del rostro de la persona. El reconocimiento facial empezó a usarse en los años 60. Era un proceso semiautomático en el que un operador identificaba los rasgos de la persona en dos o más fotografías y calculaba las distancias a puntos de referencia para compararlas entre sí. Los avances tecnológicos de la computación en los últimos años han creado una explosión de algoritmos, técnicas y aplicaciones no intrusivas de reconocimiento facial automatizado que se ejecutan en una computadora para identificar una persona en una imagen digital. Tomando la imagen de una persona no conocida debe encontrarse un perfil con el mismo rostro en un conjunto de imágenes conocidas, también llamadas imágenes de entrenamiento. Esto se realiza con uno de dos propósitos: 1) Verificación o autenticación de rostros, comparando una imagen del rostro de una persona con otra imagen. La aplicación confirma o niega la identidad del rostro, el objetivo es asegurar que la persona es quien dice ser y 2) Identificación o reconocimiento de rostros, comparando la imagen de un rostro no conocido con las imágenes de rostros conocidos almacenados en una base de datos para determinar su identidad. El reconocimiento facial es un área que integra las siguientes tecnologías: procesamiento de imágenes, visión por computadora, reconocimiento de patrones, redes neuronales y aprendizaje de máquinas [17]. El procedimiento usado por los sistemas de reconocimiento facial consiste de manera general de cinco fases:

- Fase de registro, se captura la imagen del rostro de la persona a identificar usando una cámara fotográfica o una cámara de video.
- Fase de procesamiento de la imagen, se lleva a cabo la alineación del rostro basándose en algunas propiedades geométricas y se obtiene una imagen independiente de la iluminación y gama de colores de la imagen original.
- Fase de extracción de información biométrica, se obtienen las características faciales como un patrón biométrico.
- Fase de comparación, el patrón biométrico se compara el patrón de rostros almacenados en la base de datos. Es una comparación 1:N donde se determina el porcentaje de similitud de la persona a identificar respecto a las fotografías almacenadas en la base de datos.

- Fase de toma de decisiones, utilizando una matriz de similitudes, se identifica a la persona que resultó con mayor porcentaje de similitud de la base de datos usando un rango establecido.

Recientemente el uso de sistemas de reconocimiento facial ha experimentado un auge en diferentes tipos de aplicaciones, utilizándose para autenticar a los propietarios de dispositivos móviles, en la detección de conductores con sueño o cansados, en la trata de personas, en el análisis de riesgos y en situaciones en lugares de alta concentración de personas [18]. Microsoft aplica reconocimiento facial para acceder a una computadora con Windows [19], mientras que Apple está intentando contar con un mecanismo en el que los usuarios de iOS puedan compartir automáticamente fotos con amigos etiquetados. Facebook y Google se han enfrascado en una guerra en el diseño y uso de algoritmos de reconocimiento facial para etiquetar amigos y encontrar fotos de una persona. Pretenden lograr el algoritmo perfecto, reconociendo rostros mucho mejor que el ser humano. Google presentó en 2015 el sistema de reconocimiento facial denominado FaceNet, con una precisión del 99,63 %, reconociendo fotos en Google+ [20]. Este sistema usa aprendizaje de máquina generando un mapa en un espacio euclidiano compacto a partir de la imagen de un rostro humano, donde las distancias corresponden directamente a la medida de similitud del rostro. Con este espacio, las tareas de verificación y reconocimiento de una imagen, se pueden realizar fácilmente usando técnicas estándares como la de vectores de FaceNet embeddings. El sistema FaceNet usa una red neuronal convolucional profunda entrenada con más de 260 millones de imágenes de rostros. Los autores de FaceNet indican que han desarrollado el estado del arte de los métodos de reconocimiento facial usando solo 128 bytes para cada rostro y más de 13 000 imágenes de rostros de la Internet para verificar si dos imágenes son la misma persona, mientras que el sistema de reconocimiento YouTube Faces logra el 95,12 %. La tecnología usada por Facebook para reconocimiento facial se llama DeepFace, fue desarrollada por la compañía israelí face.com y liberada en 2013 [21]. Los creadores de DeepFace indican que pueden lograr una precisión del 97,25 % al comparar dos rostros.

En años recientes el reconocimiento facial se ha estado utilizando en sistemas de acceso en centros de datos. Se pueden lograr sistemas confiables y con porcentaje de precisión aceptable sin usar algoritmos tan sofisticados como los desarrollados por compañías como Google y Facebook que, además, son algoritmos patentados y propietarios. Existen bastantes algoritmos de código abierto que pueden utilizarse en el sistema operativo de una computadora pequeña, de bajo costo y poderosa como la tarjeta Raspberry Pi 3 B+. Uno de estos algoritmos es el de histograma de gradientes orientados u HOG, denominado algo-

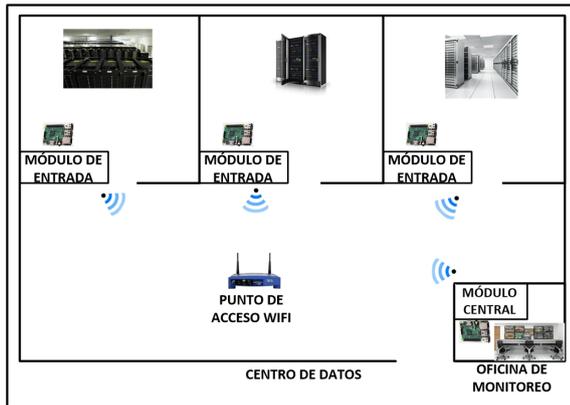
ritmo HOG [22]. Este algoritmo se desarrolló en 2005, es de los más avanzados y continuamente se mejora para optimizarlo y lograr mayor precisión. Un HOG es un descriptor de características usado en visión por computadora y procesamiento de imágenes para la detección de objetos. Este cuenta las ocurrencias de orientación de gradientes en partes definidas de una imagen. Los descriptores pueden utilizarse como datos de entrada o características para un algoritmo de aprendizaje de máquina. Existen bibliotecas de código abierto que implantan las fases de un sistema de reconocimiento facial con el algoritmo HOG y aprendizaje profundo de máquina, las cuales son fáciles de instalar y utilizar reduciendo significativamente el código del programa [23]. Una de estas bibliotecas es Face\_Recognition y es la que se utilizó en este trabajo para verificar el rostro de usuarios. Esta biblioteca usa una red neuronal entrenada y está basada en dlib, la herramienta estado de arte en reconocimiento de rostros construida con aprendizaje profundo. Los autores de Face\_Recognition indican que su precisión es del 99,38 % y proporciona varias funciones con las cuales se pueden realizar algunas acciones como encontrar rostros en una fotografía, determinar la ubicación de los puntos de referencia de un rostro, manipular las características faciales de un rostro, codificar biométricamente un rostro, comparar dos rostros codificados, reconocer rostros en video de tiempo real y reconocer rostros localizados en una fotografía usando un directorio de fotografías de personas obteniendo el nombre de cada persona. Para poder usar la biblioteca Face\_Recognition deben instalarse las siguientes herramientas en Raspian: biblioteca de Python para picamera (python3-picamera), dlib v19.6 y OpenCV.

Por otro lado, se ha realizado una gran variedad de sistemas de acceso a centros de datos a través de dispositivos biométricos. Algunos de estos sistemas llevan a cabo reconocimiento facial usando una computadora de escritorio para implantar el proceso de reconocimiento [24] y comunicación alámbrica entre la computadora y la cámara de video [25] o cámara web, son eficientes pero su costo y tamaño es mayor al aquí desarrollado. Otros sistemas de este tipo se basan en la lectura del iris del ojo [26] usando un lector instalado en la puerta de acceso o por medio del teléfono inteligente del usuario. Estos sistemas son más seguros que los de tarjetas RFiD, códigos QR, lectura de huellas digitales o reconocimiento facial 2D, pero el costo del lector es mucho más alto.

## 2. Materiales y métodos

La metodología utilizada en el diseño de este sistema consistió dividirlo en dos componentes: los módulos de entrada y el módulo central. Posteriormente, se implantó el sistema eligiendo los elementos adecuados

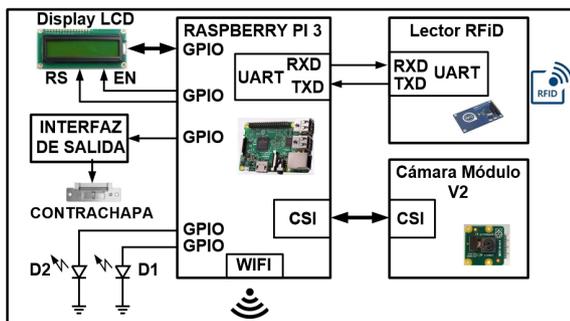
de menor costo de acuerdo con los requerimientos establecidos. El diagrama de bloques funcional del sistema se muestra en la Figura 1.



**Figura 1.** Diagrama de bloques funcional del sistema de acceso

## 2.1. Los módulos de entrada

Se construyeron tres módulos de entrada, todos con la misma arquitectura como la mostrada en la Figura 2. Las funciones principales de estos módulos son las siguientes: explorar continuamente si se encuentra una tarjeta bajo el alcance del lector RfId y leer el UUID, capturar la imagen del rostro de la persona que intenta acceder, transmitir al módulo central la información leída de la tarjeta y la fotografía de la persona en un archivo JPEG y esperar del módulo central la respuesta para permitir o negar el acceso al usuario. Cada módulo de entrada está compuesto por: una tarjeta Raspberry Pi 3 B+, un lector de tarjetas RfId, una cámara de video, una pantalla LCD 2x16 y una interfaz de salida.



**Figura 2.** Diagrama de bloques de los módulos de entrada

La tarjeta Raspberry Pi 3 B+ usada en este módulo cuenta con los siguientes recursos *hardware*: 1 GB de memoria RAM, 40 terminales GPIO, interfaz serie para cámara, o CSI, puerto DSI para pantalla táctil, puerto Ethernet Gigabit, ranura para memoria SD y una interfaz wifi. El lector de tarjetas RfId usado es el dispositivo NFC/RfId PN532. Este lector es de los

más usados en aplicaciones que usan tecnología NFC, tarjetas y etiquetas RfId de 13.56 MHz, ya que su principal circuito integrado está embebido en muchos teléfonos inteligentes. Puede escribir tarjetas y etiquetas RfId tipo 1 a 4 e integra una antena cuyo alcance son 10 centímetros.

Existe una gran cantidad de herramientas de código abierto para realizar aplicaciones con el NFC/RfId PN532. Una de estas herramientas es la biblioteca libnfc. Tanto en los módulos de entrada como en el módulo central, el lector RfId se conectó al puerto UART de la Raspberry Pi y se descargó en ella la versión 1.7.0 de la biblioteca libnfc. Antes de instalar y configurar libnfc se deshabilitó, en el núcleo del sistema operativo de la Raspberry Pi, el UART como puerto de consola usando la herramienta paspi-config y editando el archivo `/boot/config.txt`. A continuación, se instaló y construyó la biblioteca libnfc usando los siguientes comandos: `sudo make clean` y `sudo make install all`, los cuales crearon los drivers, archivos de documentación, binarios y ejecutables correspondientes. Los módulos de entrada contienen también un módulo de cámara para Raspberry V2 conectado a la interfaz CSI de la Raspberry Pi 3 B+. Este módulo de cámara, cuenta con un sensor de alta resolución Sony IMX219 de 8 megapíxeles. Permite capturar fotografías con una resolución máxima de 3238 x 2464 y video de alta definición.

Existen bibliotecas de código abierto para usar la cámara y manipular fotos y video que pueden invocarse desde Raspbian o desde un programa en Python. La cámara puede controlarse usando el comando `raspinstall`, sin embargo, en este trabajo se utilizó la biblioteca `python-picamera` de Python en caso de que posteriormente, en el sistema, sea necesario modificar las características de captura de fotografías o video. La cámara de los módulos de entrada se habilitó a través de la herramienta `raspi-config` de Raspbian y posteriormente se instaló la biblioteca `python-picamera` utilizando el comando: `sudo apt-get install python3-picamera`. Una vez realizado lo anterior, se pudo usar la función `camera.capture('archivo.jpg')` para capturar una imagen en un archivo JPEG. El programa que se ejecuta en los nodos de captura se realizó en Python 3.6 y realiza las siguientes acciones: configura temporizadores, el puerto UART, la interfaz wifi, terminales GPIO y dispositivos periféricos, lector RfId, cámara de video y pantalla LCD, muestra en la pantalla LCD el mensaje que indica al usuario colocar la tarjeta RfId en el lector y a continuación entra en un ciclo continuo donde explora cada 0.5 segundos el lector RfId ejecutando la función `nfc-pool_8c`.

La comunicación entre los módulos de entrada y el de control se llevó a cabo usando intercambio de mensajes con `sockets` bajo el esquema cliente-servidor, los módulos de entrada son los clientes y el de control es el servidor. Cuando el lector detecta una tarjeta,

muestra un mensaje en la pantalla LCD solicitando al usuario se coloque al frente de la cámara de video y captura en un archivo JPEG la imagen del rostro de la persona. Posteriormente, el programa transmite al módulo central, a través de un *socket*, el UUID de la tarjeta RFiD y el archivo JPEG. Una vez realizado lo anterior, el programa espera en el socket la respuesta del módulo central. Si la respuesta indica que el usuario está autorizado a entrar, el módulo de entrada activa el actuador de la puerta de acceso, a través de la interfaz conectada a una terminal GPIO de la tarjeta Raspberry y enciende un led verde (D1), conectado a otra terminal GPIO, durante 3 segundos. Si el usuario no está autorizado, enciende un led rojo (D2) intermitentemente durante 5 segundos. En la Figura 3 se indica el diagrama de flujo del programa.

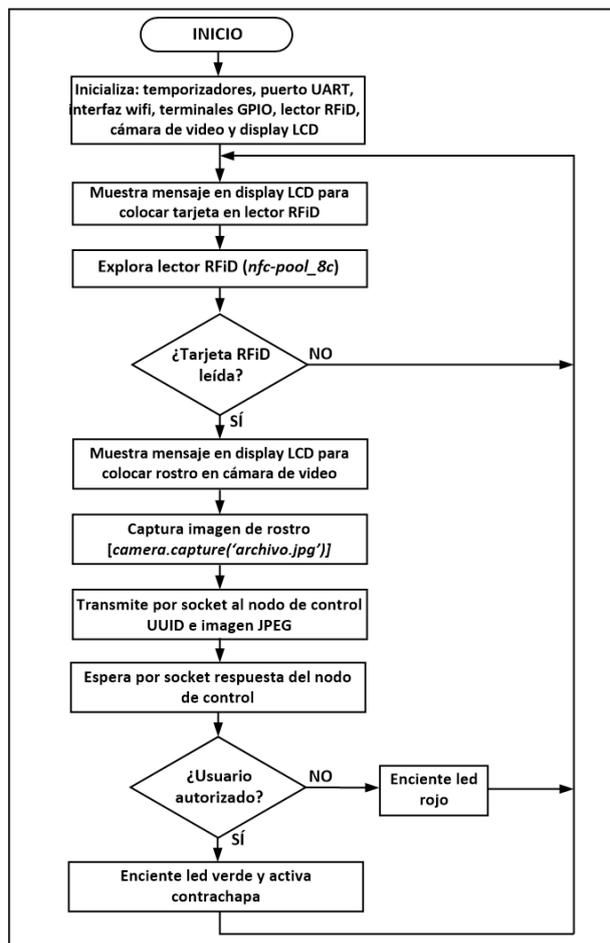


Figura 3. Diagrama de flujo del programa de los módulos de entrada

Para poder usar *sockets* desde Python debe instalarse la biblioteca correspondiente ejecutando el comando siguiente: `sudo apt-get install socket`. La interfaz de salida que controla el actuador de la puerta de entrada se conectó a una terminal GPIO de la tarjeta Raspberry como se muestra en la Figura 4.

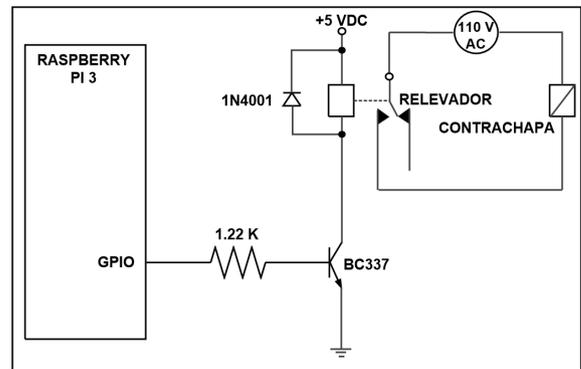


Figura 4. Interfaz de salida del actuador de la puerta de entrada

## 2.2. El módulo central

El módulo central está constituido por los siguientes componentes: una tarjeta Raspberry Pi 3 B+, un lector de tarjetas RFiD, una cámara de video y una pantalla táctil Pi+TFT de 3,5". En la Figura 5 se indica el diagrama de bloques de la arquitectura del módulo central.

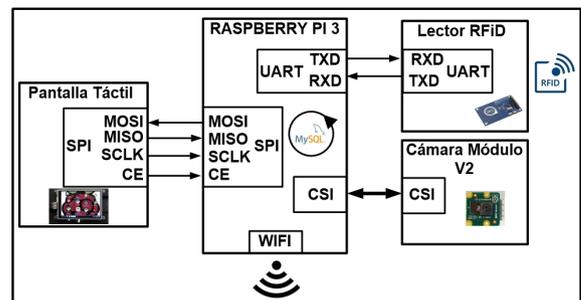


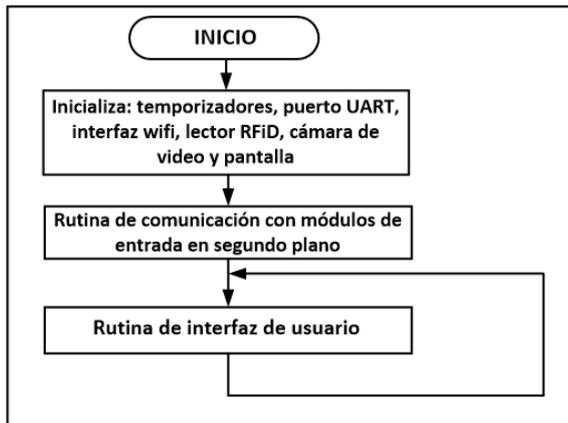
Figura 5. Diagrama de bloques del módulo central

La programación del módulo central se realizó en Python 3.6 y se divide en tres partes: el programa principal, la rutina de comunicación con los módulos de entrada y la rutina de la interfaz de usuario. El programa principal configura temporizadores, el puerto UART, la interfaz wifi y dispositivos periféricos, lector RFiD, cámara de video y pantalla táctil e invoca las dos rutinas del sistema, como se indica en el diagrama de flujo de la Figura 6.

En este módulo se creó una base de datos, manejada con MySQL, que almacena la información de usuarios autorizados a acceder a los búnkeres y un directorio con las fotografías del rostro de los usuarios anteriores.

La rutina de comunicación con los módulos de entrada ejecuta un programa en segundo plano que realiza las siguientes funciones: 1) Crea un *socket* a través del cual recibe desde los módulos de entrada el UUID y el archivo JPEG. 2) Accede la base de datos MySQL para determinar si el usuario está autorizado

a entrar al área correspondiente. 3) Invoca la rutina que verifica que el rostro del usuario se encuentre en el directorio de fotografías. 4) Actualiza el registro del usuario en la base de datos MySQL con fecha y hora de entrada. 5) Transmite el mensaje al módulo de entrada para activar el actuador de la puerta o negar la entrada. 6) Actualiza la bitácora de registro de intentos de acceso almacenando en ella el archivo JPEG.

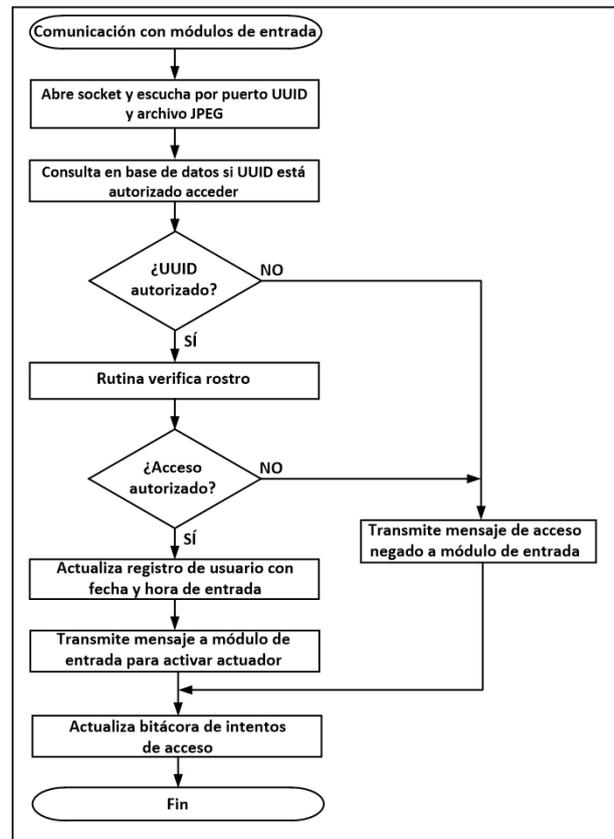


**Figura 6.** Diagrama de flujo del programa principal del módulo central

En la Figura 7 se indica en el diagrama de flujo de esta rutina. Tanto la base de datos como el directorio de fotografías codificadas y entrenadas residen en la tarjeta SD de 16 GB de la Raspberry Pi. En la base de datos se creó una tabla que contiene los registros de usuarios. Cada registro almacena el UUID de la tarjeta RFID asignada, número de puertas a las que tiene acceso, nombre, compañía y correo electrónico del usuario. Para crear la base de datos y tabla de usuarios se llevaron a cabo las siguientes tareas:

- 1.- Instalación del servidor y cliente de MySQL, así como el API de Python para acceder MySQL.
- 2.- Creación de la base de datos ejecutando los siguientes comandos: `mysql -u root -p, mysql> CREATE DATABASE RFID_DB; CREATE TABLE users_tbl (id INT NOT NULL PRIMARY KEY AUTO_INCREMENT, UUID VARCHAR(20), puertas VARCHAR(20), nombre VARCHAR(20), apellidos VARCHAR(30), company VARCHAR(20), email VARCHAR(30)).`

Una vez creada la base de datos, se realizó el programa en Python para acceder la misma. Python usa un objeto o estructura de datos, llamada cursor, para acceder los datos de la tabla. Este objeto permite realizar operaciones de creación, lectura, actualización y remoción de registros en la base de datos. El programa ejecuta de manera general las siguientes acciones:

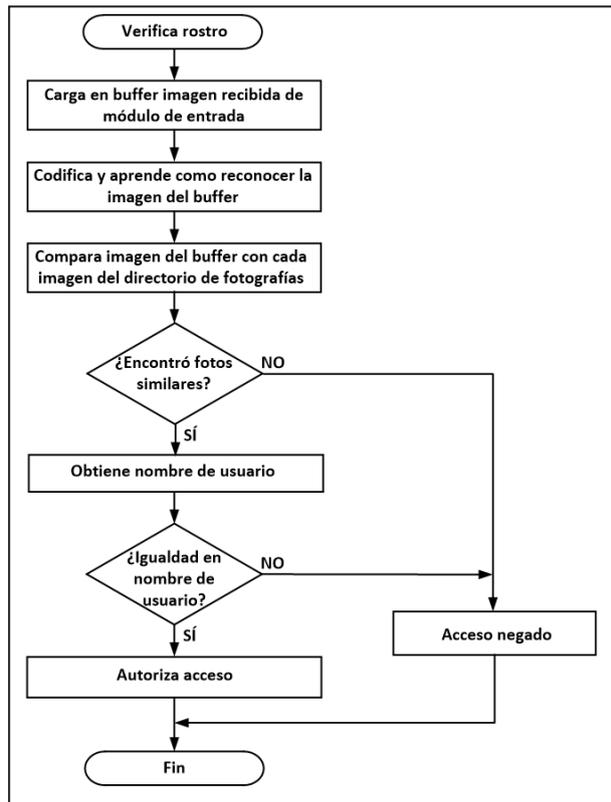


**Figura 7.** Diagrama de flujo de la comunicación con los módulos de entrada

- 1.- Importa el API de Python para MySQL: `import MySQLdb`.
- 2.- Realiza la conexión a la base de datos: `db=MySQLdb.connect("localhost", "root", "password", "RFID_DB")`.
- 3.- Define el objeto cursor: `cursor=db.cursor()`.
- 4.- Espera la opción seleccionada por el usuario en la interfaz gráfica.
- 5.- Dependiendo de la opción, define uno de los siguientes query's de SQL: `cursor.execute("INSERT INTO users_tbl")`, `cursor.execute("SELECT * FROM users_tbl")`, `cursor.execute("UPDATE users_tbl SET")` o `cursor.execute("DELETE FROM users_tbl WHERE")`
- 6.- Ejecuta el query: `db.commit()`.

En el directorio de fotografías, el nombre de cada archivo corresponde al nombre del usuario registrado en la base de datos MySQL. La rutina que verifica si el rostro del usuario se encuentra en el directorio de fotografías realiza las siguientes acciones: carga en un *buffer* la imagen del rostro recibida de un módulo de entrada utilizando la función `face_recognition.load_image_file`, codifica y aprende

a reconocer la imagen almacenada en el *buffer* usando la función `face_recognition.face_encodings` y entra a un ciclo donde compara la imagen codificada del *buffer* con cada imagen del directorio de fotografías codificadas, el ciclo termina cuando encuentra igualdad entre las dos imágenes analizadas o cuando exploró el directorio completo sin encontrar igualdad. La comparación se realiza a través de la función `face_recognition.compare_faces`, la cual obtiene, en caso de ser exitosa, el nombre del usuario de la fotografía. Si el nombre obtenido es igual al nombre leído del registro del usuario en la base de datos, retorna a la rutina que la invocó autorizando el acceso al usuario, como se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 8. Se consideró que la imagen recibida del módulo de entrada solo contiene un rostro, de lo contrario tendría que usarse la función `face_recognition.face_locations` para encontrar los rostros en la imagen y codificarlos individualmente.



**Figura 8.** Diagrama de flujo de la rutina de verificación de rostro

La rutina que implanta la interfaz gráfica de usuario, permite acceder y administrar la base de datos usando la pantalla táctil. La pantalla utilizada en el módulo central es el dispositivo Pi+TFT de 3,5" el cual tiene una resolución de 480 x 320 y se conectó al puerto SPI de la tarjeta Raspberry Pi. En la interfaz de usuario, el administrador puede realizar las siguientes operaciones: altas, bajas y cambios de usuarios, así como mostrar los usuarios registrados y la bitácora

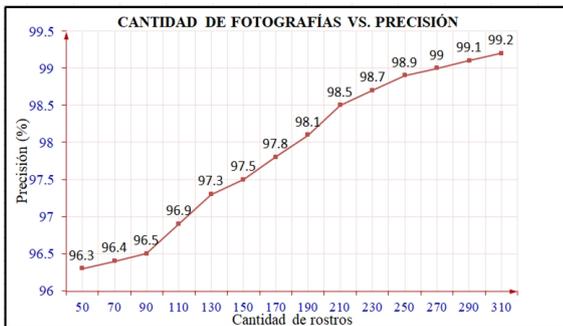
de registro de intentos de acceso. El lector de tarjetas RFiD y la cámara del módulo de validación se usan al dar de alta o realizar cambios en el registro de un usuario. La interfaz de usuario se realizó usando `pygame`. La herramienta `pygame` es un conjunto de bibliotecas que pueden usarse en un programa de Python para la implantación de videojuegos, programas multimedia e interfaces gráficas de usuario, ya que permite mostrar texto, imágenes y sonidos en una pantalla táctil y controlar la posición del cursor. Esta herramienta se instala por defecto con la versión de Raspbian para Raspberry Pi. La dirección IP de la interfaz wifi de cada módulo de entrada es fija y es usada por el módulo central para determinar el número de puerta en la que está intentando el usuario acceder.

### 3. Resultados y discusión

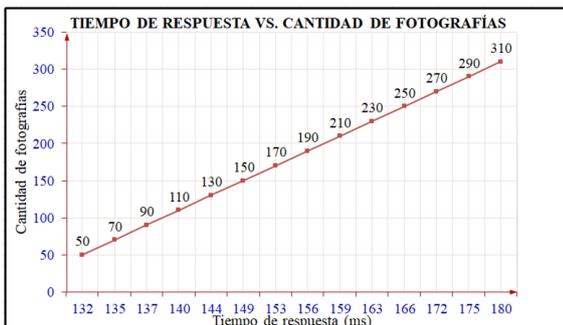
Se realizaron cuatro grupos de pruebas. El primer grupo tuvo como objetivo medir el alcance del lector RFiD de los módulos de entrada. Colocando 50 tarjetas en el lector de los módulos se determinó que el alcance son 14 centímetros, un poco más de lo indicado en las especificaciones del fabricante. El segundo grupo de pruebas tuvo como objetivo almacenar las fotografías de 50 usuarios en el directorio del módulo de central y entrenar la red neuronal. El tamaño promedio de cada fotografía fue 110 KB. El tercer grupo de pruebas tuvo como objetivo determinar la precisión del sistema de verificación del rostro de usuarios registrados en la base de datos. Este grupo de pruebas se llevó a cabo en varias fases. En la primera, el directorio de fotografías entrenadas almacenó 50 rostros y en cada una de las siguientes se adicionaron 20 fotografías hasta tener 310. En cada fase se realizó la verificación de 40 rostros diferentes. Con algunos rostros el reconocimiento no fue exitoso a pesar de estar registrados en el módulo central. La cantidad de reconocimientos no exitosos trajo como consecuencia que en la primera fase la precisión fuera del 96,3 %, la cual fue aumentando conforme creció el número de fotografías entrenadas hasta llegar al 99,2 % como se muestra en la gráfica de la Figura 9.

El cuarto grupo de pruebas tuvo como objetivo medir el tiempo de respuesta del sistema. Para realizar estas pruebas en cada una de las fases del grupo de pruebas anterior, se registró en un archivo en el módulo de entrada la hora de captura del rostro de una persona registrada en la base de datos y la hora al recibir respuesta del módulo central una vez verificada la persona autorizada. El tiempo de respuesta en la primera fase fue 132 ms en promedio y aumentó hasta 180 ms en la última fase, casi imperceptible para el usuario como se indica en la gráfica de la Figura 10. Las fotografías del directorio del módulo central fueron tomadas con suficiente iluminación ambiental, de frente, sin anteojos, poses u objeto que impidan ver claramente el rostro. Es

recomendable que al dar de alta nuevos usuarios se capturaran varias fotografías del rostro usando diferentes poses con lo cual el sistema podría ser más tolerante y mejorar tanto la precisión como el tiempo de respuesta. La implantación de este trabajo no requirió instalar cableado adicional para transmisión de datos ni modificar el existente, el módulo central se instala en una oficina de control del centro de datos, esto lo hace más práctico a los comercialmente disponibles que usan comunicación alamburada. El costo del sistema es \$350,00 USD, más bajo que los comercialmente existentes cuyo costo es \$1700,00 USD en promedio.



**Figura 9.** Precisión del sistema con diferentes cantidades de rostros entrenados



**Figura 10.** Tiempo de respuesta del sistema

## 4. Conclusiones

El resultado de este trabajo fue un sistema de acceso con doble mecanismo de seguridad más robusto que los disponibles comercialmente que usan solo un mecanismo, fue construido usando componentes de reciente tecnología y bajo costo y *software* de código abierto y la comunicación es a través de wifi, la cual no impacta en las instalaciones del centro de datos, llevando a cabo una aplicación práctica que cumple con los requisitos establecidos. El alcance de lectura de tarjetas RfID logrado fue 14 centímetros. En la verificación del rostro se logró una precisión del 99,2 % y un tiempo de respuesta de 180 ms usando 310 fotografías entrenadas.

## Trabajos futuros

Con el porcentaje de precisión y tiempo de respuesta logrados, el centro de datos solicitó realizar una segunda versión que incorpore las siguientes funcionalidades: 1) Incorporar un servidor *web* al módulo central y una pantalla táctil en los módulos de entrada de forma tal que el administrador pueda acceder la base de datos de usuarios y directorio de fotografías desde cualquier módulo de entrada y 2) Incorporar un lector de huellas digitales en todos los módulos para contar con un nivel adicional de seguridad. Estas funcionalidades son factibles de realizar con la arquitectura actual de los módulos del sistema.

## Agradecimientos

Se agradece el apoyo proporcionado por el Departamento de Electrónica de la Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco.

## Referencias

- [1] M. V. M. Lima, R. M. F. Lima, and F. A. A. Lins, "A multi-perspective methodology for evaluating the security maturity of data centers," in *2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, Oct 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/SMC.2017.8122775>, pp. 1196–1201.
- [2] M. Levy and J. O. Hallstrom, "A new approach to data center infrastructure monitoring and management (dcimm)," in *2017 IEEE 7th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, Jan 2017. textscdoi: <https://doi.org/10.1109/CCWC.2017.7868412>, pp. 1–6.
- [3] I. B. Mustafa and S. F. B. M. Khairul, "Identification of fruit size and maturity through fruit images using opencv-python and raspberry pi," in *2017 International Conference on Robotics, Automation and Sciences (ICORAS)*, Nov 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICORAS.2017.8308068>, pp. 1–3.
- [4] J. Mihal'ov and M. Hulič, "Nfc/rfid technology using raspberry pi as platform used in smart home project," in *2017 IEEE 14th International Scientific Conference on Informatics*, Nov 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/INFORMATICS.2017.8327257>, pp. 259–264.
- [5] N. Goel, A. Sharma, and S. Goswami, "A way to secure a qr code: Sqr," in *2017 International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA)*, May 2017. DOI:

- <https://doi.org/10.1109/CCAA.2017.8229850>, pp. 494–497.
- [6] S. Menon, A. George, N. Mathew, V. Vivek, and J. John, “Smart workplace – using ibeacon,” in *2017 International Conference on Networks Advances in Computational Technologies (NetACT)*, July 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/NETACT.2017.8076803>, pp. 396–400.
- [7] X. Li, D. Xu, X. Wang, and R. Muhammad, “Design and implementation of indoor positioning system based on ibeacon,” in *2016 International Conference on Audio, Language and Image Processing (ICALIP)*, July 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICALIP.2016.7846648>, pp. 126–130.
- [8] M. Chamekh, S. E. Asmi, M. Hamdi, and T. H. Kim, “Context aware middleware for rfid based pharmaceutical supply chain,” in *2017 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, June 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/IWCMC.2017.7986576>, pp. 1915–1920.
- [9] K. B. Eric and W. H. Ya, “Iot based smart restaurant system using rfid,” in *4th International Conference on Smart and Sustainable City (ICSSC 2017)*, June 2017. DOI: <https://doi.org/10.1049/cp.2017.0123>, pp. 1–6.
- [10] M. Andriansyah, M. Subali, I. Purwanto, S. A. Irianto, and R. A. Pramono, “e-ktp as the basis of home security system using arduino uno,” in *2017 4th International Conference on Computer Applications and Information Processing Technology (CAIPT)*, Aug 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/CAIPT.2017.8320693>, pp. 1–5.
- [11] S. Nath, P. Banerjee, R. N. Biswas, S. K. Mitra, and M. K. Naskar, “Arduino based door unlocking system with real time control,” in *2016 2nd International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I)*, Dec 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/IC3I.2016.7917989>, pp. 358–362.
- [12] J. Cui, D. She, J. Ma, Q. Wu, and J. Liu, “A new logistics distribution scheme based on nfc,” in *2015 International Conference on Network and Information Systems for Computers*, Jan 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICNISC.2015.48>, pp. 492–495.
- [13] W. Xiao-Long, W. Chun-Fu, L. Guo-Dong, and C. Qing-Xie, “A robot navigation method based on rfid and qr code in the warehouse,” in *2017 Chinese Automation Congress (CAC)*, Oct 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/CAC.2017.8244199>, pp. 7837–7840.
- [14] H. Keni, M. Earle, and M. Min, “Product authentication using hash chains and printed qr codes,” in *2017 14th IEEE Annual Consumer Communications Networking Conference (CCNC)*, Jan 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/CCNC.2017.7983126>, pp. 319–324.
- [15] P. Pramkeaw, T. Ganokratanaa, and S. Phatchuay, “Integration of watermarking and qr code for authentication of data center,” in *2016 12th International Conference on Signal-Image Technology Internet-Based Systems (SITIS)*, Nov 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/SITIS.2016.111>, pp. 669–672.
- [16] H. Zou, Z. Chen, H. Jiang, L. Xie, and C. Spanos, “Accurate indoor localization and tracking using mobile phone inertial sensors, wifi and ibeacon,” in *2017 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL)*, March 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISISS.2017.7935650>, pp. 1–4.
- [17] Z. Yu, F. Liu, R. Liao, Y. Wang, H. Feng, and X. Zhu, “Improvement of face recognition algorithm based on neural network,” in *2018 10th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA)*, Feb 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICMTMA.2018.00062>, pp. 229–234.
- [18] N. Mokoena, H. D. Tsague, and A. Helberg, “2d methods for pose invariant face recognition,” in *2016 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)*, Dec 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/CSCI.2016.0163>, pp. 841–846.
- [19] D. Goldman. (2015) Microsoft will let you unlock windows 10 with your face. CNN tech. [Online]. Available: <https://goo.gl/tgo8pM>
- [20] F. Schroff, D. Kalenichenko, and J. Philbin, “Facenet: A unified embedding for face recognition and clustering,” in *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, June 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/CVPR.2015.7298682>, pp. 815–823.
- [21] S. Srisuk and S. Ongkittikul, “Robust face recognition based on weighted deepface,” in *2017 International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, March 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEECON.2017.8075885>, pp. 1–4.

- [22] M. Wiglasz and L. Sekanina, “Evolutionary approximation of gradient orientation module in hog-based human detection system,” in *2017 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP)*, Nov 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/GlobalSIP.2017.8309171>, pp. 1300–1304.
- [23] J. Zeng, X. Zhao, C. Qin, and Z. Lin, “Single sample per person face recognition based on deep convolutional neural network,” in *2017 3rd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC)*, Dec 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/CompComm.2017.8322819>, pp. 1647–1651.
- [24] X. Chen, L. Qing, X. He, J. Su, and Y. Peng, “From eyes to face synthesis: a new approach for human-centered smart surveillance,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 14 567–14 575, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2803787>.
- [25] A. H. M. Amin, N. M. Ahmad, and A. M. M. Ali, “Decentralized face recognition scheme for distributed video surveillance in iot-cloud infrastructure,” in *2016 IEEE Region 10 Symposium (TENSYMP)*, May 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/TENCONSpring.2016.7519389>, pp. 119–124.
- [26] Ş. Karahan and Y. S. Akgül, “Eye detection by using deep learning,” in *2016 24th Signal Processing and Communication Application Conference (SIU)*, May 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/SIU.2016.7496197>, pp. 2145–2148.

## 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 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 interdisciplinarmente 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:** 5.000 a 6.500 palabras de texto, incluyendo título, resúmenes, palabras clave, tablas y referencias.
- **Informes, propuestas y productos:** 5.000 a 6.500 palabras de texto, incluyendo título, resúmenes, tablas y referencias.

- **Revisiones:** 6.000 a 7.000 palabras de texto, incluidas tablas y referencias. Se valora especialmente las referencias justificadas, actuales y selectivas de alrededor de unas 40 obras.

La revista INGENIUS publica trabajos originales e inéditos redactados en español e inglés, no pueden haber sido publicados a través de ningún medio impreso ni electrónico, ni estar en proceso de arbitraje o publicación.

Todo artículo será sometido a un riguroso proceso de arbitraje; la evaluación del artículo se hará conforme a criterios de originalidad, pertinencia, actualidad, aportes, rigurosidad científica y cumplimiento de las normas editoriales establecidas.

Por tratarse de una publicación arbitrada, el Consejo Editorial aprueba su publicación en base al concepto de pares especializados. La recepción de un documento no implica compromiso de publicación.

Es indispensable presentar una carta de presentación y cover letter que se puede descargar de: <<https://goo.gl/xB0wE1>>.

Las contribuciones deben ser enviadas única y exclusivamente a través del OJS (Open Journal System) <<https://goo.gl/4xxjuo>>, en el cual todos los autores deben registrarse como usuario previamente. Para cualquier consulta del procedimiento se debe contactar a:

<[revistaingenius@ups.edu.ec](mailto:revistaingenius@ups.edu.ec)>,  
<[jcalles@ups.edu.ec](mailto:jcalles@ups.edu.ec)> ó  
<[mquinde@ups.edu.ec](mailto:mquinde@ups.edu.ec)>.

### 3. Presentación y estructura de los manuscritos

Para aquellos trabajos que se traten de investigaciones de carácter empírico, los manuscritos seguirán la estructura IMRDC (Introducción, Materiales y Métodos, Resultados y Discusión y Conclusiones), siendo opcionales los epígrafes de Notas y Apoyos. Aquellos 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 Discusión y Conclusiones. En todas las tipologías de trabajos son obligatorias las Referencias.

Los artículos pueden estar escritos sobre Microsoft Word (.doc o .docx) o L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X(.tex). La plantilla a ser utilizada puede ser descargada del sitio web de la revista, en formato de Microsoft Word en: <<https://goo.gl/ZA2XAk>>, mientras que para L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X en: <<https://goo.gl/Mwv8IC>>, es necesario que el archivo esté anonimizado en Propiedades de Archivo, de forma que no aparezca la identificación de autor/es.

Las Figuras, Gráficos y/o Ilustraciones, así como las Tablas deberán estar numeradas secuencialmente incluyendo una descripción explicativa para cada una. Las ecuaciones incluidas en el artículo deberán también estar numeradas; tanto las figuras, tablas y ecuaciones deben estar citadas en el texto.

Use espacio después de punto, comas y signos de interrogación.

Use enter al final de cada párrafo, título encabezamiento. No use enter en ningún otro lugar, deje al programa procesador de palabras romper automáticamente las líneas.

No centre encabezamientos o subencabezamientos ya que deben estar alineados a la izquierda.

Las Tablas deben estar creadas en el mismo programa usado para el cuerpo del documento. 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

editorial, según el formato establecido en: <https://goo.gl/XAc9a3>.

#### 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 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. **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

#### 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 in-  
dustria 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 cir-  
cuit 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 re-  
flector arrays” [Online]. Available:  
<https://goo.gl/4cJkCF>

### 3.3. Epígrafes, tablas y figuras

Los epígrafes del cuerpo del artículo se de-  
ben numerar en arábigo. Irán sin caja completa  
de mayúsculas, ni subrayados, ni negritas. La  
numeración ha de ser como máximo de tres ni-  
veles: 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, ma-  
pas 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 even-  
tualmente al tamaño final de la revista 21 x 28  
cm. Asegúrese de que las inscripciones o deta-  
lles, así como las líneas, tengan tamaños y gro-  
sores adecuados de tal manera que no queden  
ilegibles cuando sean reducidos a su tamaño  
final (números, letras y símbolos deben ser re-  
ducidos 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 fi-  
nal de publicación. Diferentes elementos en la  
misma figura deben ser deletreados a, b, c, etc.

Las fotografías deben grabarse con alto con-  
traste y en alta resolución. Recuerde que las  
fotografías frecuentemente pierden contraste  
en el proceso de impresión.

Dibujos lineales y mapas deben ser prepa-  
rados en color negro.

El texto de las figuras y mapas debe escri-  
birse con letras fácilmente legibles.

Si las figuras han sido previamente usadas,  
es de responsabilidad del autor obtener el per-  
miso correspondiente para evitar problemas  
posteriores relacionados con los derechos de  
autor.

Cada figura debe ser entregada en un ar-  
chivo 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>>, de

manera obligatoria dos archivos se deberán cargar, como archivo original el manuscrito en .pdf sin datos de autor y anonimizado, mientras que en archivos complementarios se deberá cargar la presentación y cover letter de acuerdo a lo antes descrito, adicionalmente se deberá cargar el manuscrito completo en .doc o .docx (archivo de Word), es decir con los datos del autor/es y su adscripción institucional; también se deben cargar en archivos independientes 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.

Todos los autores deben ingresar la información requerida en la plataforma OJS 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 por parte del equipo editorial 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 enviará un correo al autor para que realice las correcciones solicitadas. El autor ejecutará las correcciones y enviará nuevamente la contribución a través de un mail como respuesta a la notificación y también cargará el manuscrito corregido en archivos complementarios del OJS.

El equipo editorial verificará que las correcciones solicitadas han sido incorporadas, si cumple, el manuscrito iniciará la segunda parte del proceso y podrá ser seguido por el autor a través de OJS, caso contrario se notificará al autor y se archivará el manuscrito.

La segunda fase del proceso consiste en la evaluación bajo la metodología de pares ciegos (doble-blind review), en los que se incluyen expertos nacionales y extranjeros considerando los siguientes pasos:

- El editor asigna dos o más revisores para el artículo.
- Una vez revisado el artículo, los revisores remitirán el informe de la evaluación, con uno de los siguientes resultados.
  - Publicable
  - Publicable con cambios sugeridos
  - Publicable con cambios obligatorios
  - No Publicable
- El editor una vez recibida la evaluación por parte de los revisores analizará los resultados y determinará si el artículo es aceptado o negado.
- Si el artículo es aceptado se notificará al autor para que realice las correcciones en caso de ser requeridas y se continuará con el proceso editorial correspondiente.

- 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 1 de enero y el 1 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

Javier Herrán Gómez, 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](http://www.ups.edu.ec)  
Cuenca – Ecuador

INGENIUS, Revista de Ciencia y Tecnología,  
publicación semestral, N.º 20, julio/diciembre 2018  
John Calle Sigüencia, Editor Responsable  
[revistaingenius@ups.edu.ec](mailto: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](mailto: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.

