

## EDITORIAL

CÉSAR AUGUSTO GARCÍA UBAQUE  
DIRECTOR

## INVESTIGACIÓN

### Modelos de horno de arco eléctrico para estudios del efecto flicker

Electric arc furnace models for flicker study  
CATALINA GONZÁLEZ CASTAÑO, ALFONSO ALZATE GÓMEZ, JESSER JAMES MARULANDA DURANGO

### Estimación del factor $K$ en transformadores de distribución usando modelos de regresión lineal

K factor estimation in distribution transformers using linear regression models  
JUAN MIGUEL ASTORGA GÓMEZ, RODRIGO ALFONSO ARÓSTICA CÓRDOVA, YURI ANTONIO IRIARTE SALINAS

### Una prueba fuera del laboratorio de una interfaz cerebro computador basada en potenciales de estado estable evocados visualmente

Steady state visually evoked potentials based Brain computer interface test outside the lab  
EDUARDO FRANCISCO CAICEDO BRAVO, JAIBER EVELIO CARDONA ARISTIZÁBAL

### Diseño e implementación de una red de emuladores para recrear escenarios clínicos del sistema respiratorio de pacientes neonatales

Design and implementation of a network of emulators to recreate clinical scenarios of the respiratory system in neonatal patients  
EDWARD JULIÁN RAMOS BALLESTEROS, GLORIA MARGARITA VARÓN DURÁN, LUIS CARLOS MÉNDEZ CÓRDOBA

### Algoritmos para asignación de espectro en redes de radio cognitiva

Algorithms for spectrum allocation in cognitive radio networks  
CESAR HERNÁNDEZ, LUIS FERNANDO PEDRAZA MARTÍNEZ, FREDY HERNÁN MARTÍNEZ SARMIENTO

### Efecto de la temperatura en el potencial de aprovechamiento energético de los productos de la pirólisis del cuesco de palma

Effect of temperature on energy potential of pyrolysis products from oil palm shells  
LINA MARÍA ROMERO MILLÁN, MARÍA ALEJANDRA CRUZ DOMÍNGUEZ, FABIO EMIRO SIERRA VARGAS

### 13 Análisis de sequías meteorológicas para la cuenca del río Dagua, Valle del Cauca, Colombia 101

Analysis of meteorological drought for Dagua river basin, Valle del Cauca, Colombia  
NATHALIA GONZÁLEZ LÓPEZ, YESID CARVAJAL ESCOBAR, WILMAR LOAIZA CERÓN

## ESTUDIO DE CASO

### 15 Evaluación de la resistencia a la compresión en morteros de pega de acuerdo con la dosificación establecida por el código Sismo Resistente Colombiano. Estudio de caso 115

Evaluation of compressive strength in cement mortars, according to the dosage established by the colombian seismic resistance code. Case study  
SERGIO GIOVANNY VALBUENA PORRAS, MILTON MENA SERNA, CÉSAR AUGUSTO GARCÍA-UBAQUE

### 29 Implementación de un controlador de posición y movimiento de un robot móvil diferencial 123

Implementation of a position and movement controller for a differential mobile robot  
GERMÁN HERNÁNDEZ MILLÁN, LUIS HERNANDO RÍOS GONZALES, MAXIMILIANO BUENO LÓPEZ

### 41 Control difuso aplicado a un convertidor DC-DC buck para una carga no lineal 137

Buck DC DC converter using fuzzy logic control for no linear load  
RUBÉN DARIO BONILLA ISAZA

## 53 REVISIÓN DE TEMA

### Implementación de algoritmos basados en máquinas de soporte vectorial (SVM) para sistemas eléctricos: revisión de tema 149

No hay propuesta de traducción de título  
JEFFERSON JARA ESTUPIÑAN, DIEGO GIRALFERNANDO MARTÍNEZ SANTA

### 69 Techniques for modeling photovoltaic systems under partial shading 171

Técnicas para modelar sistemas fotovoltaicos bajo sombreado parcial  
LUZ ADRIANA TREJOS GRISALES, CARLOS ANDRÉS RAMOS-PAJA, ANDRÉS JULIÁN SAAVEDRA-MONTES

### Instrucciones para los autores 185

Instructions for authors 193

### SUSCRIPCIÓN 201

SIGN UP 202

Tecnura

p-ISSN: 0123-921X  
Volumen 20 - Número 48  
Abril - junio de 2016

Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Facultad Tecnológica



UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Revista Tecnura • Volumen 20 - Número 48 • Abril - Junio de 2016  
p-ISSN: 0123-921X • e-ISSN: 2248-7638 • Bogotá D.C. Colombia

# Tecnura

Tecnología y cultura, afirmando el conocimiento

Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Facultad Tecnológica

Modelos de horno de arco eléctrico para estudios del efecto flicker

Diseño e implementación de una red de emuladores para recrear escenarios clínicos del sistema respiratorio de pacientes neonatales

Efecto de la temperatura en el potencial de aprovechamiento energético de los productos de la pirólisis del cuesco de palma

Techniques for modeling photovoltaic systems under partial shading

ISSN 0123-921X



9 770123 921001

# Tecnura

Tecnología y cultura, afirmando el conocimiento

Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Facultad Tecnológica

Vol. 20 No. 48  
Abril - Junio de 2016  
p-ISSN: 0123-921X  
e-ISSN: 2248-7638



UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

**Revista *TECNURA***  
**Tecnología y cultura, afirmando el conocimiento**  
**Universidad Distrital Francisco José de Caldas**  
**Facultad Tecnológica**

p-ISSN: 0123-921X - e-ISSN: 2248-7638

**EDITOR**

Ph.D. Ing. César Augusto García Ubaque  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

**COMITÉ EDITORIAL**

Ph.D. Ing. Electo Eduardo Silva  
Universidad Federal de Itajuba, Brasil

Ph.D. Ing. Manuel Karim Sapag  
Universidad Nacional de San Luis, Argentina

Ph.D. Ing. José Antonio Velásquez Costa  
Universidad Ricardo Palma, Perú

Ph.D. Ing. Johan José Sánchez Mora  
Universidad Simón Bolívar, Venezuela

Ph.D. Ing. Mario Ricardo Arbulu Saavedra  
Universidad de La Sabana, Colombia

Ph.D. Ing. Edgar Francisco Vargas  
Universidad de Los Andes, Colombia

Ph.D. Ing. Jorge Mario Gómez  
Universidad de Los Andes, Colombia

Ph.D. Ing. Ingrid Patricia Páez Parra  
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Ph.D. Ing. César Augusto García Ubaque  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Ph.D(c). Ing. César Augusto Hernández Suárez  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

**COMITÉ CIENTÍFICO**

Ph.D. Ing. Enrique Rodríguez de la Colina  
Universidad Autónoma Metropolitana, México

Ph.D. Ing. Alfonso Prieto Guerrero  
Universidad Autónoma Metropolitana, México

Ph.D. Ing. Fernando Martirena  
Universidad Central de Las Villas, Cuba

Ph.D. Ing. Juan Antonio Conesa  
Universidad de Alicante, España

Ph.D. Ing. Steven M. LaValle  
University of Illinois, Estados Unidos

Ph.D. Ing. Graciela Perera Olivares  
Youngstown University, Estados Unidos

Ph.D. Ing. Clara Inés Buritica  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

**EVALUADORES**

Ph.D. Ing. Angela Zona Ortiz  
Universidad Sergio Arboleda, Colombia

Ph.D. Ing. Carlos Alberto Restrepo Patiño  
Universidad Técnica Federico Santa María, Chile

Ph.D. Ing. Carlos Felipe Urazán Bonnells  
Universidad de la Salle, Colombia

Ph.D. Ing. Danilo Alfonso López Sarmiento.  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Ph.D. Ing. Enrique Alegre Gutiérrez  
Universidad de León, España

Ph.D. Ing. Fernando Sánchez Lasheras  
Universidad de Oviedo, España

Ph.D. Ing. Joaquín Barreiro García  
Universidad de León, España

Ph.D. Ing. Lina Mabel Castro Heredia  
Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile

Ph.D. Ing. Oscar Rodríguez Rocha  
Politecnico di Torino, Italia

M.Sc. Ing. Jesus Antonio Vega Uribe  
Universidad de los Andes, Colombia

Msc. Ing. Ana Cecilia Villa Parra  
Universidad Politecnica Salesiana, Ecuador

M.Sc. Ing. Alvaro Rodriguez Paez  
Escuela de Ingenieros Militares, Colombia

M.Sc. Ing. Amed Alfonso Alfonso Cristancho  
Universidad Militar Nueva Granada, Colombia

M.Sc. Ing. Hector Fabio Bermudez Orozco  
Universidad del Quindío, Colombia

M.Sc. Ing. Lucio Rojas Cortes  
Universidad Militar Nueva Granada, Colombia

M.Sc. Ing. William Vallejo Quintero  
Institucion Universitaria Pascual Bravo, Colombia

**ASISTENTES DE LA REVISTA TECNURA**

M.Sc (c). Hans Raúl Márquez Ramos

M.Sc (c). Diego Armando Giral Ramírez

**COORDINACIÓN EDITORIAL**

Diony Constanza Pulido Ortega  
Centro de investigaciones y desarrollo tecnológico - CIDC  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

# Tecnura

Vol. 20 No. 48

Abril - Junio de 2016

## REVISTA *TECNURA*

La revista *Tecnura* es una publicación institucional de la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de carácter científico-tecnológico, arbitrada mediante un proceso de revisión entre pares de doble ciego. La periodicidad de la conformación de sus comités Científico y Editorial está sujeta a la publicación de artículos en revistas indexadas internacionalmente por parte de sus respectivos miembros.

## PERIODICIDAD

Es una publicación de carácter científico-tecnológico con periodicidad trimestral, que se publica los meses de enero, abril, julio y octubre. Su primer número apareció en el segundo semestre del año 1997 y hasta la fecha ha mantenido su regularidad.

## COBERTURA TEMÁTICA

Las áreas temáticas de interés de la revista *Tecnura* están enfocadas a todos los campos de la ingeniería, como la electrónica, telecomunicaciones, electricidad, sistemas, industrial, mecánica, catastral, civil, ambiental, entre otras. Sin embargo, no se restringe únicamente a estas, también tienen cabida los temas de educación y salud, siempre y cuando estén relacionados con la ingeniería. La revista publicará únicamente artículos de investigación científica y tecnológica, de reflexión y de revisión.

## MISIÓN

La revista *Tecnura* tiene como misión divulgar resultados de proyectos de investigación realizados en el área de la ingeniería, a través de la publicación de artículos originales e inéditos, realizados por académicos y profesionales pertenecientes a instituciones nacionales o extranjeras del orden público o privado.

## PÚBLICO OBJETIVO

La revista *Tecnura* está dirigida a docentes, investigadores, estudiantes y profesionales interesados en la actualización permanente de sus conocimientos y el seguimiento de los procesos de investigación científico-tecnológica, en el campo de la ingeniería.

## INDEXACIÓN

*Tecnura* es una publicación de carácter académico indexada en el Índice Bibliográfico Nacional Publindex (IBN) de Colciencias (Colombia) en la categoría A2, en los índices regionales Scielo Colombia (Colombia) y Redalyc (México); además de las siguientes bases bibliográficas: INSPEC del Institution of Engineering and Technology (Inglaterra), Fuente Académica Premier de EBSCO (Estados Unidos), CABI (Inglaterra), IndexCorpernicus (Polonia), Informe Académico de Gale Cengage Learning (México), Periódica de la Universidad Nacional Autónoma de México (México), Oceanet (España) y Dialnet de la Universidad de la Rioja (España); también hace parte de los siguientes directorios: Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal Latindex (México); Índice Bibliográfico Actualidad Iberoamericana (Chile), e-Revistas (España), DOAJ (Suecia), Ulrich de Proquest (Estados Unidos).

## FORMA DE ADQUISICIÓN

La revista *Tecnura* se puede adquirir a través de compra, canje o suscripción.

## SUSCRIPCIÓN

El precio unitario de la revista es de 10000 pesos (el precio no incluye el valor del envío). La suscripción anual tiene un costo de 45000 pesos para Colombia, 40 USD para América Latina y el Caribe, 60 USD para otras regiones (el precio incluye el valor del envío). Para suscribirse utilice el formato ubicado al final de la revista.

## REPRODUCCIÓN

Se autoriza la reproducción total o parcial de los artículos de esta revista para uso académico o interno de las instituciones citando la fuente y el autor. Las ideas expresadas se publican bajo la exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento del Comité Editorial de la revista.

## DIRECCIÓN POSTAL

Enviar a Ing. Cesar Augusto García Ubaque,  
Ph.D. Director y Editor Revista *Tecnura*  
Sala de Revistas, Bloque 5, Oficina 305.  
Facultad Tecnológica  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Transversal 70B No. 73A - 35 sur  
Teléfono: 571 - 3238400, extensión: 5003  
Celular: 57 - 3153614852  
Bogotá, D.C., Colombia  
Correo electrónico:  
[tecnura@udistrital.edu.co](mailto:tecnura@udistrital.edu.co), [tecnura@gmail.com](mailto:tecnura@gmail.com)  
Tecnura en internet:  
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>

## DISEÑO ORIGINAL

Julián Hernández - Taller de Diseño

## CORRECCIÓN DE ESTILO PARA ESPAÑOL

Fernando Carretero Padilla

## CORRECCIÓN DE ESTILO PARA INGLÉS

Francisco Suárez Díaz

## DIAGRAMACIÓN ELECTRÓNICA Y DISEÑO DE CUBIERTA

Julián Hernández - Taller de Diseño

## IMPRESIÓN

Imprenta Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Formato: 21.5 x 28 cm  
Papel: Bond 75g  
Fuente: Times New Roman  
Tiraje: 400 ejemplares



UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

**Tecnura**  
**Technology And Culture, Affirming Knowledge**  
**District University Francisco José De Caldas**  
**Faculty Of Technology**

**EDITOR**

Ph.D. Ing. Cesar Augusto García Ubaque  
District Francisco José de Caldas University, Colombia

**EDITORIAL COMMITTEE**

Ph.D. Ing. Electo Eduardo Silva  
Universidade Federal de Itajuba, Brasil

Ph.D. Ing. Manuel Karim Sapag  
Universidad Nacional de San Luis, Argentina

Ph.D. Ing. José Antonio Velásquez Costa  
Universidad Ricardo Palma, Perú

Ph.D. Ing. Johan José Sánchez Mora  
Universidad Simón Bolívar, Venezuela

Ph.D. Ing. Mario Ricardo Arbulu Saavedra  
Universidad de la Sabana, Colombia

Ph.D. Ing. Edgar Francisco Vargas  
Universidad de los Andes, Colombia

Ph.D. Ing. Jorge Mario Gomez  
Universidad de los Andes, Colombia

Ph.D. Ing. Ingrid Patricia Páez Parra  
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Ph.D. Ing. Cesar Augusto García Ubaque  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Ph.D (c). Ing. Cesar Augusto Hernández Suárez  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

**SCIENTIFIC COMMITTEE**

Ph.D. Ing. Enrique Rodríguez de la Colina  
Universidad Autónoma Metropolitana, México

Ph.D. Ing. Alfonso Prieto Guerrero  
Universidad Autónoma Metropolitana, México

Ph.D. Ing. Fernando Martirena  
Universidad Central de Las Villas, Cuba

Ph.D. Ing. Juan Antonio Conesa  
Universidad de Alicante, España

Ph.D. Ing. Steven M. LaValle  
University of Illinois, Estados Unidos

Ph.D. Ing. Graciela Perera Olivares  
Youngstown University, Estados Unidos

Ph.D. Ing. Clara Inés Buritica  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

**EVALUATORS**

Ph.D. Ing. Angela Zona Ortiz  
Universidad Sergio Arboleda, Colombia

Ph.D. Ing. Carlos Alberto Restrepo Patiño  
Universidad Técnica Federico Santa María, Chile

Ph.D. Ing. Carlos Felipe Urazán Bonnells  
Universidad de la Salle, Colombia

Ph.D. Ing. Danilo Alfonso López Sarmiento.  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Ph.D. Ing. Enrique Alegre Gutiérrez  
Universidad de León, España

Ph.D. Ing. Fernando Sánchez Lasheras  
Universidad de Oviedo, España

Ph.D. Ing. Joaquín Barreiro García  
Universidad de León, España

Ph.D. Ing. Lina Mabel Castro Heredia  
Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile

Ph.D. Ing. Oscar Rodríguez Rocha  
Politecnico di Torino, Italia

M.Sc. Ing. Jesus Antonio Vega Uribe  
Universidad de los Andes, Colombia

Msc. Ing. Ana Cecilia Villa Parra  
Universidad Politecnica Salesiana, Ecuador

M.Sc. Ing. Alvaro Rodriguez Paez  
Escuela de Ingenieros Militares, Colombia

M.Sc. Ing. Amed Alfonso Alfonso Cristancho  
Universidad Militar Nueva Granada, Colombia

M.Sc. Ing. Hector Fabio Bermudez Orozco  
Universidad del Quindío, Colombia

M.Sc. Ing. Lucio Rojas Cortes  
Universidad Militar Nueva Granada, Colombia

M.Sc. Ing. William Vallejo Quintero  
Institucion Universitaria Pascual Bravo, Colombia

**TECNURA JOURNAL ASSISTANTS**

M.Sc (c). Hans Raúl Márquez Ramos

M.Sc (c). Diego Armando Giral Ramírez

**EDITORIAL COORDINATION**

Diony Constanza Pulido Ortega

Centro de investigaciones y desarrollo tecnológico - CIDC  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

# Tecnura

Vol 20 No. 48

April - June de 2016

## TECNURA JOURNAL

Tecnura Journal is an institutional scientific-technological publication from the Faculty of Technology at District University Francisco José de Caldas, arbitrated by means of a double-blinded peer review process. The periodicity for its Scientific and Editorial committees line-up is subject to the publication of articles in internationally indexed magazines by its own members.

## PERIODICITY

Tecnura journal is a scientific-technological publication with quarterly periodicity, published in January, April, July and October. Its first edition appeared in the second term, 1997 and its editions have normally continued from that year and on.

## THEMATIC COVERAGE

The thematic areas of interest at Tecnura journal are focused on all fields of engineering such as electronical, telecommunications, electrical, computer, industrial, mechanical, cadastral, civil, environmental, etc. However, it is not restricted to those, there is also room for education and health topics as well, as long as they are related to engineering. The journal will only publish scientific and technological research, reflection and review articles.

## MISSION

Tecnura journal is aimed at publishing research project results carried out in the field of engineering, through the publishing of original and unpublished articles written by academics and professionals from national or international public or private institutions.

## TARGET AUDIENCE

Tecnura journal is directed to professors, researchers, students and professionals interested in permanent update of their knowledge and the monitoring of the scientific-technological research processes in the field of engineering.

## INDEXING

Tecnura is an academic publication indexed in the Índice Bibliográfico Nacional Publindex (IBN) from Colciencias (Colombia) in the category A2, in the Regional Index Scielo Colombia (Colombia) and Redalyc (México); as well as the following bibliographic databases: INSPEC of the Institution of Engineering and Technology (England), Fuente Académica Premier of EBSCO (United States), CABI (England), Index Copernicus (Poland), Informe Académico of Gale Cengage Learning (México), Periódica of the Universidad Nacional Autónoma de México (México), Oceanet (Spain) and Dialnet of the Universidad de la Rioja (Spain); it is also part of the following directories: Online Regional Information System for Scientific journals from Latin America, Caribbean, Spain and Portugal Latindex (México), bibliographic index Actualidad Iberoamericana (Chile), e-Revistas (Spain), DOAJ (Sweden), Ulrich of Proquest (United States).

## FORM OF ACQUISITION

Tecnura journal is available through purchase, exchange or subscription.

## SIGN UP

The unit price of the journal is 6 USD (the price does not include shipping). The annual sign up is 28 USD for Colombia; 40 USD in Latin America and the Caribbean; 60 USD in other regions (the price includes shipping). To sign up, use the format located at the end of the journal.

## REPRODUCTION

The total or partial reproduction of the articles of this journal is authorized for academic or internal purpose of the institutions citing the source and the author. Ideas expressed are published under exclusive responsibility of the authors and they do not necessarily reflect the thought of the editorial committee of the journal.

## POSTAL ADDRESS

Send to Engr. Cesar Augusto García Ubaque, Ph.D. Director and Editor Revista Tecnura  
Sala de Revistas, Bloque 5, Oficina 305.  
Faculty of Technology  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Transversal 70B No. 73A - 35 sur  
Telephone Number: 571 - 3238400, extension: 5003  
Cell phone Number: 57 - 3153614852  
Bogotá D.C., Colombia  
E-mail:  
tecnura@udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com  
Tecnura on internet:  
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>

## ORIGINAL DESIGN

Julián Hernández - Taller de Diseño

## STYLE CORRECTION IN SPANISH

Fernando Carretero Padilla

## STYLE CORRECTION IN ENGLISH

Francisco Suárez Díaz ELECTRONIC

## LAYOUT AND TITLE PAGE DISEGN

Julián Hernández - Taller de Diseño

## PRINTED BY

Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas Press  
Format: 21.5 x 28 cm  
Paper: Bond 75g  
Font: Times New Roman  
Printing: 400 copies

## DECLARACIÓN DE ÉTICA Y BUENAS PRÁCTICAS

El comité editorial de la revista *Tecnura* está comprometido con altos estándares de ética y buenas prácticas en la difusión y transferencia del conocimiento, para garantizar el rigor y la calidad científica. Es por ello que ha adoptado como referencia el Código de Conducta que, para editores de revistas científicas, ha establecido el Comité de Ética de Publicaciones (COPE: Committee on Publication Ethics) dentro de los cuales se destaca:

### Obligaciones y responsabilidades generales del equipo editorial

En su calidad de máximos responsables de la revista, el comité y el equipo editorial de *Tecnura* se comprometen a:

- Aunar esfuerzos para satisfacer las necesidades de los lectores y autores.
- Propender por el mejoramiento continuo de la revista.
- Asegurar la calidad del material que se publica.
- Velar por la libertad de expresión.
- Mantener la integridad académica de su contenido.
- Impedir que intereses comerciales comprometan los criterios intelectuales.
- Publicar correcciones, aclaraciones, retractaciones y disculpas cuando sea necesario.

### Relaciones con los lectores

Los lectores estarán informados acerca de quién ha financiado la investigación y sobre su papel en la investigación.

### Relaciones con los autores

*Tecnura* se compromete a asegurar la calidad del material que publica, informando sobre los objetivos y normas de la revista. Las decisiones de los editores para aceptar o rechazar un documento para su publicación se basan únicamente en la relevancia del trabajo, su originalidad y la pertinencia del estudio con relación a la línea editorial de la revista.

La revista incluye una descripción de los procesos seguidos en la evaluación por pares de cada trabajo recibido. Cuenta con una guía de autores en la que se presenta esta información. Dicha guía se actualiza regularmente y contiene un vínculo a la presente declaración ética. Se reconoce el derecho de los autores a apelar las decisiones editoriales. Los editores no modificarán su decisión en la aceptación de envíos, a menos que se detecten irregularidades o situaciones extraordinarias. Cualquier cambio en los miembros del equipo editorial no afectará las decisiones ya tomadas, salvo casos excepcionales en los que confluían graves circunstancias.

### Relaciones con los evaluadores

*Tecnura* pone a disposición de los evaluadores una guía acerca de lo que se espera de ellos. La identidad de los evaluadores se encuentra en todo momento protegida, garantizando su anonimato.

### Proceso de evaluación por pares

*Tecnura* garantiza que el material remitido para su publicación será considerado como materia reservada y confidencial mientras que se evalúa (doble ciego).

### Reclamaciones

*Tecnura* se compromete responder con rapidez a las quejas recibidas y a velar para que los demandantes insatisfechos puedan tramitar todas sus quejas. En cualquier caso, si los interesados no consiguen satisfacer sus

reclamaciones, se considera que están en su derecho de elevar sus protestas a otras instancias.

### Fomento de la integridad académica

*Tecnura* asegura que el material que publica se ajusta a las normas éticas internacionalmente aceptadas.

### Protección de datos individuales

*Tecnura* garantiza la confidencialidad de la información individual (por ejemplo, de los profesores y/o alumnos participantes como colaboradores o sujetos de estudio en las investigaciones presentadas).

### Seguimiento de malas prácticas

*Tecnura* asume su obligación para actuar en consecuencia en caso de sospecha de malas prácticas o conductas inadecuadas. Esta obligación se extiende tanto a los documentos publicados como a los no publicados. Los editores no sólo rechazarán los manuscritos que planteen dudas sobre una posible mala conducta, sino que se consideran éticamente obligados a denunciar los supuestos casos de mala conducta. Desde la revista se realizarán todos los esfuerzos razonables para asegurar que los trabajos sometidos a evaluación sean rigurosos y éticamente adecuados.

### Integridad y rigor académico

Cada vez que se tenga constancia de que algún trabajo publicado contiene inexactitudes importantes, declaraciones engañosas o distorsionadas, debe ser corregido de forma inmediata.

En caso de detectarse algún trabajo cuyo contenido sea fraudulento, será retirado tan pronto como se conozca, informando inmediatamente tanto a los lectores como a los sistemas de indexación.

Se consideran prácticas inadmisibles, y como tal se denunciarán las siguientes: el envío simultáneo de un mismo trabajo a varias revistas, la publicación duplicada o con cambios irrelevantes o parafraseo del mismo trabajo, o la fragmentación artificial de un trabajo en varios artículos.

### Relaciones con los propietarios y editores de revistas

La relación entre editores, editoriales y propietarios estará sujeta al principio de independencia editorial. *Tecnura* garantizará siempre que los artículos se publiquen con base en su calidad e idoneidad para los lectores, y no con vistas a un beneficio económico o político. En este sentido, el hecho de que la revista no se rija por intereses económicos, y defienda el ideal de libre acceso al conocimiento universal y gratuito, facilita dicha independencia.

### Conflicto de intereses

*Tecnura* establecerá los mecanismos necesarios para evitar o resolver los posibles conflictos de intereses entre autores, evaluadores y/o el propio equipo editorial.

### Quejas/denuncias

Cualquier autor, lector, evaluador o editor puede remitir sus quejas a los organismos competentes.

## CODE OF ETHICS AND GOOD PRACTICE

The editorial board of *Tecnura* journal is committed to ethics high standards and good practice for knowledge dissemination and transfer, in order to ensure rigour and scientific quality. That is why it has taken as reference the Code of Conduct, which has been established by the Committee on Publication Ethics (COPE) for scientific journal editors; outlining the following:

### General duties and responsibilities of the editorial board

As most responsible for the journal, *Tecnura* committee and the editorial board are committed to:

- Joining efforts to meet the readers and authors' needs.
- Tending to the continuous improvement of the Journal.
- Ensuring quality of published material.
- Ensuring freedom of expression.
- Maintaining the academic integrity of their content.
- Prevent commercial interests compromise intellectual standards.
- Post corrections, clarifications, retractions and apologies when necessary.
- Relations with readers
- Readers will be informed about who has funded research and their role in the research.

### Relations with authors

*Tecnura* is committed to ensuring the quality of published material, informing the goals and standards of the journal. The decisions of publishers to accept or reject a paper for publication are based solely on the relevance of the work, originality and pertinence of the study with journal editorial line.

The journal includes a description of the process for peer evaluation of each received work, and has an authors guide with this information. The guide is regularly updated and contains a link to this code of ethics. The journal recognizes the right of authors to appeal editorial decisions. Publishers will not change their decision in accepting or rejecting articles, unless extraordinary circumstances or irregularities are detected. Any change in the editorial board members will not affect decisions already made, except for unusual cases where serious circumstances converge.

### Relations with evaluators

*Tecnura* makes available to reviewers a guide to what is expected from them. Reviewers' identity is protected at all times, ensuring anonymity.

### Peer review process

*Tecnura* ensures that material submitted for publication will be considered private and confidential issue while being reviewed (double blind).

### Claims

*Tecnura* is committed to respond quickly to complaints and ensure that dissatisfied claimant can process all

complaints. In any case, if applicants fail to satisfy their claims, the journal considers that they have the right to raise their protests to other instances.

### Promoting Academic Integrity

*Tecnura* ensures that the published material conforms to internationally accepted ethical standards.

### Protection of individual data

*Tecnura* guarantees the confidentiality of individual information (e.g. participant teachers and/or students as collaborators or subjects of study in the presented research).

### Tracking malpractice

*Tecnura* accepts the obligation to act accordingly in case of suspected malpractice or misconduct. This obligation extends both to publish and unpublished documents. The editors not only reject manuscripts with doubts about possible misconduct, but they are considered ethically obligated to report suspected cases of misconduct. From the journal every reasonable effort is made to ensure that works submitted for evaluation are rigorous and ethically appropriate.

### Integrity and academic rigour

Whenever evidence that a published work contains significant misstatements, misleading or distorted statements, it must be corrected immediately.

In case of any work with fraudulent content is detected, it will be removed as soon as it is known, and immediately informing both readers and indexing systems.

Practices that are considered unacceptable and as such will be reported: simultaneous sending of the same work to various journals, duplicate publication with irrelevant changes or paraphrase of the same work, or the artificial fragmentation of a work in several articles.

### Relations with owners and journal editors

The relation between editors, publishers and owners will be subject to the principle of editorial independence. *Tecnura* will ensure that articles are published based on their quality and suitability for readers, and not for an economic or political gain. In this sense, the fact that the journal is not governed by economic interests, and defends the ideal of universal and free access to knowledge, provides that independence.

### Conflict of interest

*Tecnura* will establish the necessary mechanisms to avoid or resolve potential conflicts of interest between authors, reviewers and/or the editorial board itself.

### Complaints / allegations

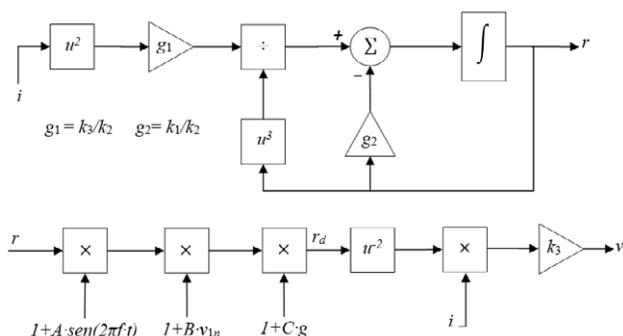
Any author, reader, reviewer or editor may refer their complaints to the competent authorities.

# Contenido

EDITORIAL

11

## INVESTIGACIÓN

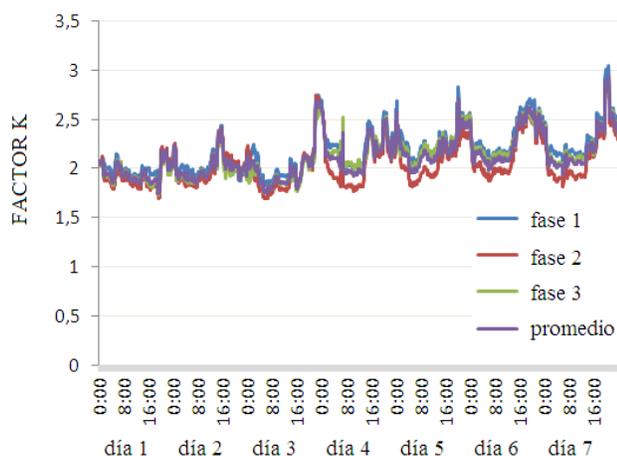


### Modelos de horno de arco eléctrico para estudios del efecto flicker

15

Electric arc furnace models for flicker study

CATALINA GONZÁLEZ CASTAÑO, ALFONSO ALZATE GÓMEZ, JESSER JAMES MARULANDA DURANGO

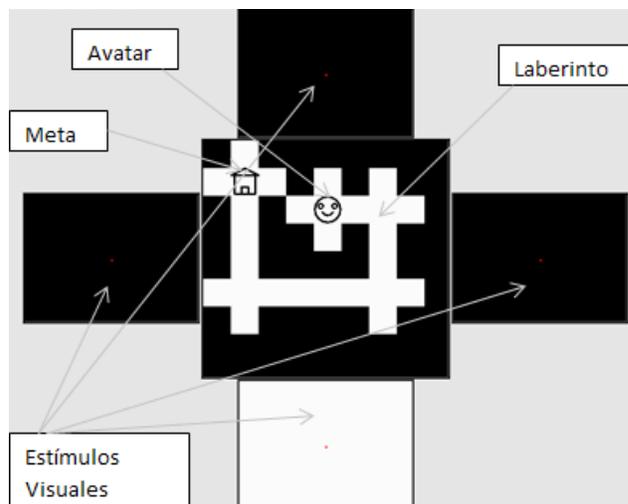


### Estimación del factor K en transformadores de distribución usando modelos de regresión lineal

29

K factor estimation in distribution transformers using linear regression models

JUAN MIGUEL ASTORGA GÓMEZ, RODRIGO ALFONSO ARÓSTICA CÓRDOVA, YURI ANTONIO IRIARTE SALINAS

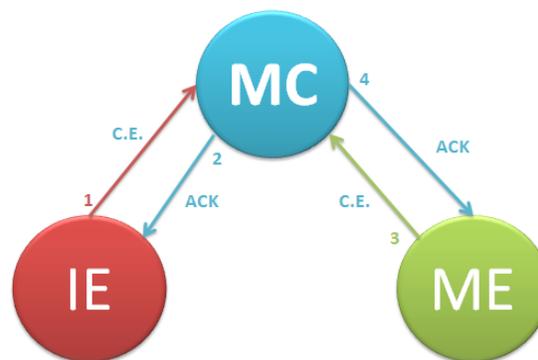


### Una prueba fuera del laboratorio de una interfaz cerebro computador basada en potenciales de estado estable evocados visualmente

41

Steady state visually evoked potentials based Brain computer interface test outside the lab

EDUARDO FRANCISCO CAICEDO BRAVO, JAIBER EVELIO CARDONA ARISTIZÁBAL



### Diseño e implementación de una red de emuladores para recrear escenarios clínicos del sistema respiratorio de pacientes neonatales

53

Design and implementation of a network of emulators to recreate clinical scenarios of the respiratory system in neonatal patients

EDWARD JULIÁN RAMOS BALLESTEROS, GLORIA MARGARITA VARÓN DURÁN, LUIS CARLOS MÉNDEZ CÓRDOBA

**Algoritmos para asignación de espectro en redes de radio cognitiva** 69

Algorithms for spectrum allocation in cognitive radio networks

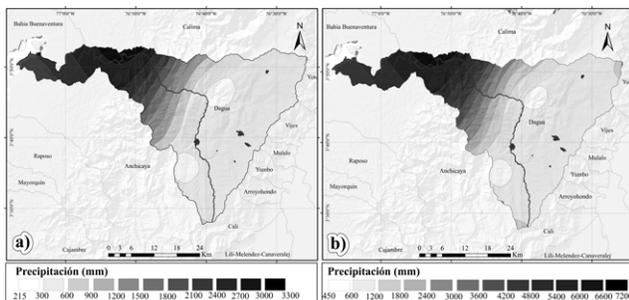
CÉSAR HERNÁNDEZ, LUIS FERNANDO PEDRAZA MARTÍNEZ, FREDY HERNÁN MARTÍNEZ SARMIENTO



**Efecto de la temperatura en el potencial de aprovechamiento energético de los productos de la pirólisis del casco de palma** 89

Effect of temperature on energy potential of pyrolysis products from oil palm shells

LINA MARÍA ROMERO MILLÁN, MARÍA ALEJANDRA CRUZ DOMÍNGUEZ, FABIO EMIRO SIERRA VARGAS



**Análisis de sequías meteorológicas para la cuenca del río Dagua, Valle del Cauca, Colombia** 101

Analysis of meteorological drought for Dagua river basin, Valle del Cauca, Colombia

NATHALIA GONZÁLEZ LÓPEZ, YESID CARVAJAL ESCOBAR, WILMAR LOAIZA CERÓN

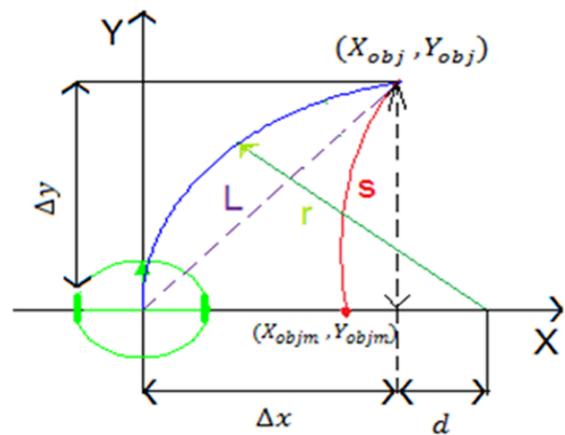
**ESTUDIO DE CASO**

**Evaluación de la resistencia a la compresión en morteros de pega de acuerdo con la dosificación establecida por el código Sismo Resistente Colombiano. Estudio de caso** 115

Evaluation of compressive strength in cement mortars, according to the dosage established by the Colombian seismic resistance code.

Case study

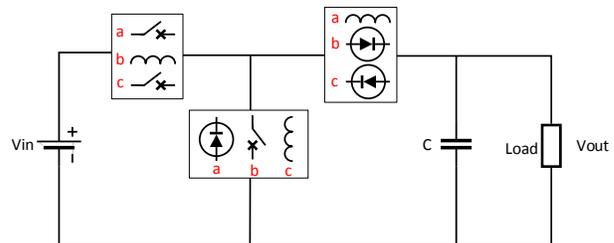
SERGIO GIOVANNY VALBUENA PORRAS, MILTON MENA SERNA, CÉSAR AUGUSTO GARCÍA-UBAQUE



**Implementación de un controlador de posición y movimiento de un robot móvil diferencial** 123

Implementation of a position and movement controller for a differential mobile robot

GERMÁN HERNÁNDEZ MILLÁN, LUÍS HERNANDO RÍOS GONZALES, MAXIMILIANO BUENO LÓPEZ

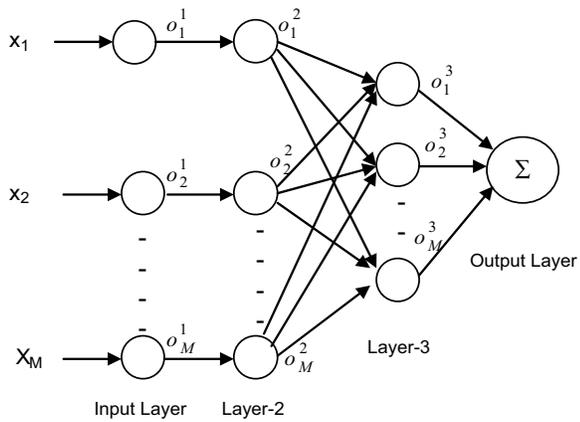


**Control difuso aplicado a un convertidor DC-DC buck para una carga no lineal** 137

Buck DC DC converter using fuzzy logic control for no linear load

RUBÉN DARÍO BONILLA ISAZA

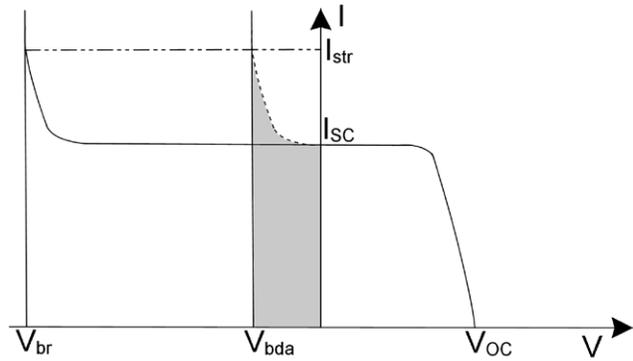
## REVISIÓN DE TEMA



### Implementación de algoritmos basados en máquinas de soporte vectorial (SVM) para sistemas eléctricos: revisión de tema 149

No hay propuesta de traducción de título

JEFFERSON JARA ESTUPIÑAN, DIEGO GIRAL,  
FERNANDO MARTÍNEZ SANTA



### Techniques for modeling photovoltaic systems under partial shading

171

Técnicas para modelar sistemas fotovoltaicos bajo sombreado parcial

LUZ ADRIANA TREJOS GRISALES, CARLOS ANDRÉS RAMOS-PAJA, ANDRÉS JULIÁN SAAVEDRA-MONTES

De acuerdo con los resultados de diferentes estudios realizados, tanto de carácter local como regional sobre el cambio climático, la pérdida de biodiversidad y otros problemas ambientales que ya evidencian consecuencias a nivel global, se puede afirmar que la base de los problemas ambientales del planeta planteada en términos económicos, radica en el exceso de la demanda de los servicios que nuestra especie se surte de él. El planeta nos provee soporte para nuestras funciones vitales, suministro de recursos y materias primas para la producción de bienes y servicios, y lo utilizamos como vertedero de desechos; ignorando durante mucho tiempo que todos los ecosistemas tienen capacidades de oferta limitadas. Desde el mismo punto de vista económico, y a diferencia de cualquier otro bien, en el que a mayor demanda, se genera una mayor oferta; para el caso de los recursos ambientales, ya se sabe que pueden llegar a su agotamiento; y no existe precio suficiente que permita que la oferta se incremente. Los servicios ambientales son bienes totalmente inelásticos.

El crecimiento poblacional de nuestra especie durante los últimos 100 años, que ha sido casi exponencial, sumado al patrón de desarrollo adoptado por la gran mayoría de países basado en el principio del crecimiento económico para satisfacer sus necesidades; ha producido el deterioro ambiental cuyas consecuencias estamos enfrentando. Este principio adoptado como paradigma para determinar el desarrollo de las naciones, ha traído consigo una paradoja que consiste en que para tener unas mejores condiciones de vida de la población, se debe aumentar el consumo de bienes y servicios. Aun de aquellos que no son necesarios y que tampoco contribuyen significativamente a mejorar los índices de calidad de vida, pero que dentro de este patrón, se deben consumir para generar mayor cantidad de empleos y condiciones de vida para quienes participan en el proceso de producción. La consecuencia ha sido un

círculo vicioso que se ha escalado con tendencia a volverse espiral y que no se ha podido redirigir a comportamientos que aseguren un uso racional generalizado de los recursos que podemos utilizar.

Otro valor que creo va en contra de comportamientos respetuosos por el medio ambiente es el criterio de "belleza simétrica". La urgencia por alcanzar criterios de homogeneidad, de cero defectos, de acercarse a prototipos promedio que no reflejan la realidad de nadie ni de nada, lleva a que aún en alimentos, en flores, en animales, etc., se quiera bajo cualquier método llegar al prototipo ideal, presionando los procesos de productivos y reproductivos mediante abonos, modificaciones genéticas, pesticidas, etc., que permitan obtener especies "homogéneas" y "bellas", que son las que más se venden. Independientemente del real valor que deben proporcionar: nutrición, utilización, entre otros.

Aunque la agricultura y la ganadería ya son bastante agresivas con la diversidad de los ecosistemas, el demandar productos más grandes, en perfecto estado, de bellos colores, con una mayor productividad en cuanto a cantidad, entre otros; conlleva a que las prácticas para su producción sobrepasen el límite de soporte, sumidero, regulación y suministro que tienen los ecosistemas donde se producen. Resulta trágico además que, estos beneficios no lleguen a las personas que más hambre o necesidades insatisfechas padecen, sino a los que ya tienen suficiente, pero que pueden pagar por estas características adicionales que no le agregan valor real a los productos.

Este tipo de valores que no son propios de todas las culturas del planeta, si han venido siendo apropiados de manera global por todos los países, debido a que se han arraigado en el imaginario colectivo, y se consideran "exitosos" en el sentido de generar bienestar a las culturas que los aplican. Aunque ya se evidencian los problemas y las consecuencias que trae consigo, este patrón

incontrolado de consumo; la tendencia a profundizar su aplicación se ha mantenido. Así las cosas, si este modelo de crecimiento basado en el aumento del consumo persiste; los escenarios que se vislumbran no dan lugar para ser optimistas sobre la viabilidad de nuestra especie en nuestro propio planeta.

A pesar que la gran mayoría de la población ya es consciente que de seguir en este modelo, en algún momento la humanidad va a colapsar, por lo menos en las características básicas de crecimiento como hoy se conoce, no se ha podido generar otro tipo de valores que permitan que el bienestar de una comunidad dependa de otros factores. No parece realista por ahora desarrollar tecnologías que permitan un desarrollo sostenible; y menos aun que con las actuales se logren los resultados necesarios para detener el deterioro del ambiente, porque lo que han logrado en el mejor de los casos es retrasar el proceso, pero no a la velocidad necesaria para hacer autosostenible el planeta. El desarrollo científico y tecnológico se ha enfocado a hacer más eficientes los procesos productivos desde el punto de vista del rendimiento económico, sin lograr impactar bloques grandes de interacción hombre-naturaleza.

Personalmente creo que pretender detener el deterioro del medio ambiente conservando nuestro actual patrón de desarrollo y consumo, es absolutamente irreal. Es por ello que las acciones que se han tomado no tienen realmente un impacto relevante. Considero que los valores de "éxito" deben reevaluarse para conseguir que las diferentes

comunidades logren unos niveles de vida dignos pero que no se lleguen a niveles de "comodidad" realmente superfluos que lejos de dar sentido a la vida de las personas, terminan frustrándola y quitando sentido a su paso por este planeta. Mientras las personas pensemos que lo que tenemos es lo que nos define; realmente será muy difícil que tomemos decisiones fundamentales como: reciclaje, ahorro, optimización de los recursos que usamos y que adoptemos patrones de "austeridad" que nuestra cultura no acepta de buen agrado y por el contrario, prefiere ambientes de abundancia y que obviamente son tremendamente depredadores. Se consume de más y se desecha de más. Esto no le sirve a nadie, y representa apenas solo el valor de una transacción.

El crecimiento que se da a costa del medio ambiente favoreciendo a quienes ya gozan de estándares altos de condiciones de vida, se está convirtiendo en nuestra espada de Damocles. La sociedad en general y la cultura misma, también deben orientarse a que se inculquen y premien valores de ahorro, de consumir lo mínimo para que alcance para todos. El valor a buscar, debe ser el bienestar, la estabilidad y no el crecimiento económico como hoy se define, porque hasta dónde se crece? Acaso más que mi vecino? El otro es una competencia? ,o, más bien es un colaborador? Enfocar nuestra creatividad y nuestros conocimientos hacia estos valores, constituye hoy por hoy no solo un reto, sino quizá la única manera de redirigir la evolución de nuestra especie. Que aunque ha logrado grandes avances, parece ir inevitablemente al deterioro.

CÉSAR AUGUSTO GARCÍA-UBAQUE  
Director

## EDITORIAL

---

According to the results of different studies conducted both local and regional about climate change, biodiversity loss and other environmental problems that reflect global consequences; we can conclude that the basis of global environmental problems, in economic terms, is excess of demand for the services that our planet provide. Human beings need the soil support for our vital functions, resources and raw materials for production of goods and services and a place for landfill waste; but we ignore for a long time that our ecosystems have limited offer capabilities. From the economic point of view, and unlike any other good, in which an increased demand generates increased supply; in the case of environmental resources, it is known that they can reach their exhaustion because their services are totally inelastic and there is not enough money to satisfy the supply increases.

Human population growth over the past 100 years has been almost exponential, coupled with the development pattern adopted by the vast majority of countries based on the principle of economic growth to meet their needs; it has produced an environmental degradation whose consequences we are facing right now. This principle adopted as a paradigm to determine the nations development, has brought a paradox, for have better living conditions of the population we should increase consumption of goods and services. Even those that are not needed and do not contribute significantly to improving the quality life index, but that within this pattern should be consumed to generate more jobs and better living conditions for those involved in production process. The result has been a vicious circle that has climbed with a tendency to become spiral and has not been redirected to learn widespread behaviors that ensure rational use of resources we can use.

Another value that goes against respectful behavior for the environment is the “symmetrical

beauty” criterion, the urgency to achieve homogeneity criteria, zero defects, reach to average prototypes that do not reflect the reality of anyone or anything, leads to obtain even food, flowers, animals, etc., under any method to reach the ideal prototype, pressing the productive and reproductive processes by fertilizers, genetic modifications, pesticides, etc., required to obtain “homogeneous” and “beautiful” species that are most sold. Regardless the real value: nutrition, use, among others.

Although agriculture and animal breeding are already quite aggressive with ecosystems diversity, to claim for larger products, in perfect conditions, with beautiful colors, with higher productivity in terms of quantity, etc.; leads to production practices that exceed the environmental services limits, of landfill, regulation and supply of ecosystems where they occur. It also tragic that these benefits do not reach the people who suffer from hunger or unmet needs, but those who already have enough, and can pay for these additional features that do not add actual value to the products.

This type of values, that are not distinctive of all cultures of the world, whether they have come to be appropriate globally by all countries, because they are rooted in the collective imagination, and are considered “successful” in the sense of generating welfare cultures. Although the problems and the consequences it brings, this uncontrolled consumption pattern is already evident; the tendency to deepen its implementation has been maintained. So, if this growth model based on consumption growth persists; looming scenarios do not result to be optimistic about the viability of our species on our own planet.

Although the vast majority of population is already aware about mankind collapse if they continue in this model, at least in the basic characteristics of growth as known now, it has not been able to generate other values that allow that community

welfare depends on other factors. It seems unrealistic for now, develop technologies that enable sustainable development; and even less than current technology could stop the deterioration of the environment, because what they have achieved at best case scenario is delay the process, but not fast enough to make self-sustaining planet. Scientific and technological development has focused to streamline production processes from the point of view of economic performance without impacting achieves large blocks of interaction between man and nature.

I personally think that trying to stop environment deterioration, preserving our current pattern of development and consumption, is absolutely unreal. That is why the actions that have been taken do not really have a significant impact. I believe that the values of "success" should be reassessed to ensure that the different communities to achieve a decent standard of living but not reach superfluous "comfort" levels that far from giving meaning to the lives of people, give them frustration. While people think that what we have is what defines us;

really it is very difficult to take fundamental decisions such as recycling, saving, optimization of resources we use and to adopt patterns of "austerity" that our culture does not accept willingly and on the other hand, prefer environments abundance and which are tremendously predators. It is consumed more and discarded more. This does not serve anyone, and represents only the value of a single transaction.

The growth that comes at the expense of the environment favoring those who already enjoy high standards of living; it is becoming our sword of Damocles. The society and culture itself must also be oriented to inculcate values and reward savings to consume the least to reach everyone. The value to search, should be the welfare, stability and economic growth not as defined today, because ¿as far as we grow?, ¿more than my neighbor?, ¿the other is a rival?, ¿or rather it is a collaborator? Focus our creativity and our knowledge to these values today is not only a challenge but the only way to redirect the evolution of our species. That although it has made great strides, it seems inevitably is going to decline.

CÉSAR AUGUSTO GARCÍA-UBAQUE  
Director



## Modelos de horno de arco eléctrico para estudios del efecto flicker

### Electric arc furnace models for flicker study

Catalina González Castaño<sup>1</sup>, Alfonso Alzate Gómez<sup>2</sup>, Jesser James Marulanda Durango<sup>3</sup>

**Fecha de recepción:** 26 de agosto de 2015

**Fecha de aceptación:** 15 de febrero de 2016

**Cómo citar:** González Castaño, C., Alzate Gómez, A., & Marulanda Durango, J. J. (2016). Modelos de horno de arco eléctrico para estudios del efecto flicker. *Revista Tecnura*, 20(48), 15-27. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.2.a01

#### RESUMEN

**Objetivo:** El objetivo de este artículo es evaluar las fluctuaciones de voltaje o flicker de dos modelos de un horno de arco eléctrico a través de la comparación con datos reales.

**Método:** El primer modelo se fundamenta a partir del principio de conservación de la energía, de la cual se obtiene una ecuación diferencial no lineal que captura la característica voltaje – corriente del arco eléctrico. Las fluctuaciones de voltaje se generan con un circuito de caos que modula la amplitud del voltaje del arco eléctrico. El segundo modelo está basado en las relaciones empíricas entre la longitud de arco, la tensión y la corriente a través del arco. Las fluctuaciones de voltaje se obtienen agregando una señal aleatoria a la longitud del arco eléctrico. Ambos modelos son implementados en PSCAD™.

**Resultados:** Los resultados de ambos modelos son comparados con mediciones reales tomadas en la etapa más crítica de la operación del horno, y muestran que el modelo basado en la conservación de la potencia presenta un menor error medio cuadrático

promedio en los voltajes y corrientes de 5,6 V y 1.7 kA frente a 27,2 V y 3.38 kA obtenidos con el segundo modelo.

**Conclusiones:** Ambos modelos consideran la no linealidad y comportamiento aleatorio que exhibe este tipo de carga, validando su inclusión en modelos computacionales de sistemas eléctricos de potencia.

**Palabras clave:** Armónicos, horno de arco, modelo dinámico.

#### ABSTRACT

**Objective:** The aim of this paper is to evaluate voltage fluctuations or flicker of two electric arc furnace models through comparison with real data.

**Method:** The first proposed model is founded on the energy conservation principle, which generates a non-linear differential equation modelling the electric arc voltage – current characteristics. Voltage fluctuations are generated using a chaotic circuit that modulates the amplitude of arc voltage. The second model is based on the empirical relationship

1 Ingeniera Electrónica, Master en Ingeniería Eléctrica. Docente de la Universidad Surcolombiana. Neiva, Colombia. Contacto: [catalina.gonzalez@usco.edu.co](mailto:catalina.gonzalez@usco.edu.co).

2 Ingeniero Electricista, Magister en Sistemas de Generación Eléctrica. Docente de la Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia. Contacto: [alalzate@utp.edu.co](mailto:alalzate@utp.edu.co)

3 Ingeniero Electricista, Magister en Ingeniería Eléctrica. Docente de la Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia. Contacto: [jjmarulanda@utp.edu.co](mailto:jjmarulanda@utp.edu.co)

between the arc diameter or length as well as voltage and electrical current on the arc. Voltage fluctuations are considered adding a random signal in the arc length. Both models are implemented in PSCAD™.

**Results:** The results of both models are compared with real data taken at the most critical stage of the operation of the furnace, and they show that the model based on energy conservation has a lower

average mean square error in the voltages and currents 5.6 V and 1.7 kA against 27,2 V y 3.38 kA obtained with the second model.

**Conclusions:** Both models consider the nonlinearity and random behavior present in this type of load, validating their inclusion in computer models of electric power systems.

**Keywords:** Arc furnace, dynamic models, harmonics.

---

## INTRODUCCIÓN

El término *calidad de la potencia*, o *power quality* (PQ), se refiere a una amplia variedad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan la tensión y la corriente de un sistema de potencia en un instante y en un lugar determinados. Hoy en día, este tema es de especial atención para los entes encargados de regular el sistema eléctrico, para las empresas que prestan los servicios de energía eléctrica, para los usuarios que están conectados a los sistemas de distribución y para los fabricantes de equipos electrónicos. Por esta razón, existen normas técnicas que exigen a las empresas prestadoras del servicio unos márgenes de valores de *percibility short time* (PST) y de forma de onda garantizando a los usuarios una buena calidad de energía eléctrica (Standard CEI/IEC 61000-4-15, 1997). La calidad de la potencia se ve agravada en la actualidad por el incremento de cargas no lineales conectadas a la red.

Por lo general, el horno de arco eléctrico es el más utilizado por la industria metalúrgica, en donde este tipo de carga, además de ser no lineal, es caótica e inestable (Alves, Assis, Peixoto y Goncalves, 2010). Por tanto, cobra importancia implementar modelos que se aproximen al comportamiento real de los hornos, con el propósito de realizar estudios que permitan medir su impacto en un sistema eléctrico de potencia. Los modelos propuestos en la literatura son paramétricos

que se basan en las características y en sus condiciones físicas de operación del horno, los cuales proporcionan sus principales aspectos de funcionamiento (Göl *et al.*, 2010). El presente trabajo forma parte del resultado del trabajo de investigación "Análisis y atenuación de problemas de calidad de energía causados por hornos de arco en sistemas eléctricos", y de las tesis de maestría: "Modelo de horno de arco eléctrico para estudios del efecto flicker y sus métodos de compensación" y "Desarrollo de una metodología para reducir el efecto flicker generado por un horno de arco eléctrico", de la Universidad Tecnológica de Pereira. Estos trabajos presentan la forma de modelar matemáticamente un horno de arco eléctrico y el desempeño de sistemas de compensación basados en electrónica de potencia cuya función principal es atenuar los efectos nocivos sobre el sistema eléctrico de potencia que generan los hornos de arco. En este trabajo se presenta la comparación de dos modelos paramétricos propuestos en la literatura. Los resultados experimentales demuestran las características de cada modelo, adicionalmente, los modelos son comparados con mediciones reales tomadas en la etapa más crítica de la operación del horno. Se muestran las bondades y las aproximaciones de los modelos con los datos reales.

En este artículo se presenta, en principio, los métodos y modelos matemáticos aplicados que describen el horno de arco eléctrico, además de detallar el circuito de potencia que alimenta el

horno. Luego, se presentan los resultados obtenidos en simulación de los dos modelos y su comparación con los voltajes y las corrientes del arco eléctrico presentadas en Cano y Tacca (2005). Por último, se plantean las conclusiones de la investigación.

## METODOLOGÍA

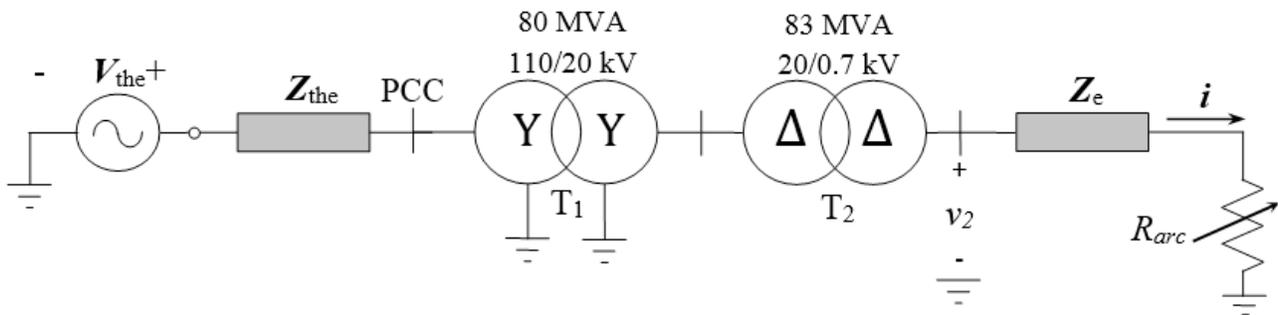
A continuación se describe los distintos elementos y componentes utilizados para el desarrollo de la simulación en el *software* especializado *PS-CAD™*. Los métodos descritos están conformados por las características del circuito eléctrico de este tipo de cargas y la representación de los modelos matemáticos que describen el comportamiento eléctrico del horno de arco eléctrico, con el fin de comparar su funcionalidad en la simulación de fenómenos que pueden ser causados por la conexión de un horno de arco eléctrico.

### Circuito eléctrico del horno de arco

El fenómeno del arco eléctrico entre los electrodos se puede representar por una resistencia variable (Trageser, 1980). Otra característica del circuito eléctrico del horno de arco es que las impedancias de los conductores que conectan los electrodos al secundario del transformador están balanceadas.

El circuito equivalente unifilar del horno para el análisis de sus características eléctricas se puede simplificar y representar como el mostrado en la figura 1.

La resistencia del arco eléctrico es sustituida por la resistencia variable  $R_{arc}$ , mientras que la reactancia del mismo es descartada; esto es válido porque las reactancias son causadas por campos magnéticos alternos, lo que tiene una influencia insignificante para arcos eléctricos cortos (Trageser, 1980). La red de alimentación en el punto de acoplamiento común PCC se modela por un circuito equivalente de Thevenin que consta de una fuente de voltaje trifásica de secuencia positiva  $V_{the}$  en serie con una impedancia serie RL (resistencia e inductancia)  $Z_{the}$ . Las potencias nominales de los transformadores que forman parte del circuito eléctrico del horno se indican en la figura 1. Se utiliza un transformador de horno conexión delta-delta para eliminar los armónicos de corriente múltiplos de tres veces la frecuencia fundamental. Para simplificar el circuito no se han considerado filtros ni sistemas de compensación en el secundario del transformador  $T_2$  muy utilizados en la mayoría de estas instalaciones. Los valores utilizados para las resistencias y reactancias equivalentes del circuito de la figura 1 corresponden a valores típicos reportados en la literatura y se muestran en la tabla 1.



**Figura 1.** Circuito eléctrico del horno de arco

**Fuente:** elaboración propia.

**Tabla 1.** Parámetros de los elementos del circuito de la figura 1

Impedancia	Resistencia	Reactancia
$Z_{the}$	0,3669 $\Omega$	0,0195 $\Omega$
$T_1$	0,0125 pu	0,125 pu
$T_2$	0,01 pu	0,1 pu
$Z_e$	0,38 m $\Omega$	3,238 m $\Omega$

Fuente: elaboración propia.

### Modelos dinámicos para un arco eléctrico alterno o de CA

Si en un arco alimentado por una corriente alterna se miden la tensión  $v$  y la corriente  $i$ , se encuentran curvas deformadas que dependen del tipo del medio del arco, del material de los electrodos y de la frecuencia de la corriente (Orille, 1993). En la parte izquierda de la figura 2 se muestran estas curvas para un arco en aire, con electrodos de carbón.

La forma del voltaje alterno del arco es similar a una onda cuadrada y la forma de la corriente se asemeja a una señal sinusoidal pero con componentes armónicas, básicamente la tercera, quinta y séptima armónica (Alzate, Marulanda y Escobar,

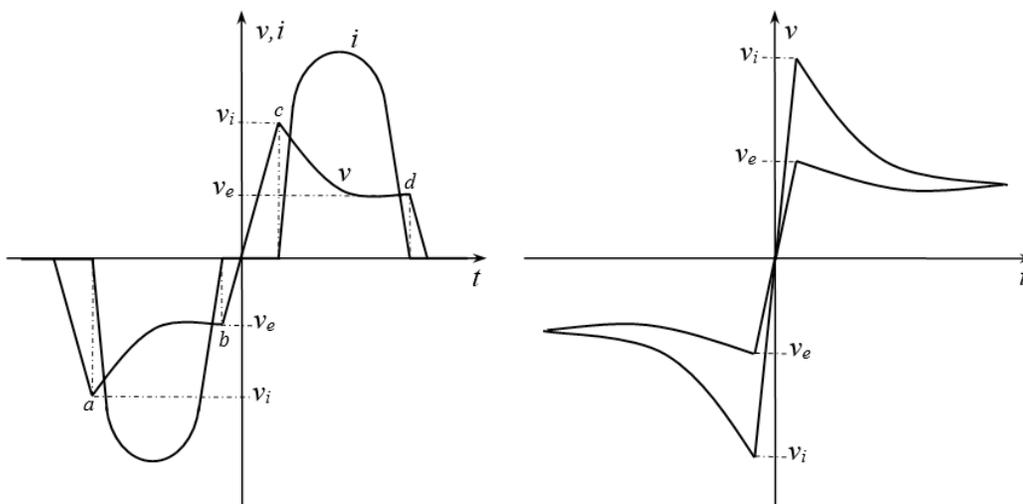
2010). En los tiempos  $a$  y  $c$  se efectúan las descargas y en los puntos  $b$  y  $d$  se extingue el arco. Durante el intervalo comprendido entre los puntos  $b$  y  $c$  existen descargas inestables. El voltaje  $v_i$  se conoce como el voltaje de ignición y el voltaje  $v_e$  es el voltaje de extinción. Partiendo de estas curvas, puede derivarse la característica voltaje/corriente, como se muestra en la parte derecha de la figura 2.

### Modelo basado en la conservación de la potencia

La característica del arco eléctrico de la figura 2 se puede obtener de forma aproximada con la ecuación diferencial no lineal (1) derivada en (O'Neill *et al.*, 1999), que se basa en el principio de conservación de la energía (ecuación (1)),

$$k_1 r^2 + k_2 r \frac{dr}{dt} - k_3 \frac{i^2}{r} = 0, \quad (1)$$

Donde  $r$  es el radio del arco eléctrico;  $i$  es la corriente instantánea del arco, y  $k_1$ ,  $k_2$  y  $k_3$  son parámetros que se relacionan con la potencia eléctrica convertida en calor por el arco. En el modelo trifásico del horno de arco se debe obtener un  $r$  para cada fase. Una vez determinado  $r$ , la segunda



**Figura 2.** Curvas típicas de voltaje y corriente de un arco eléctrico producido por una corriente alterna

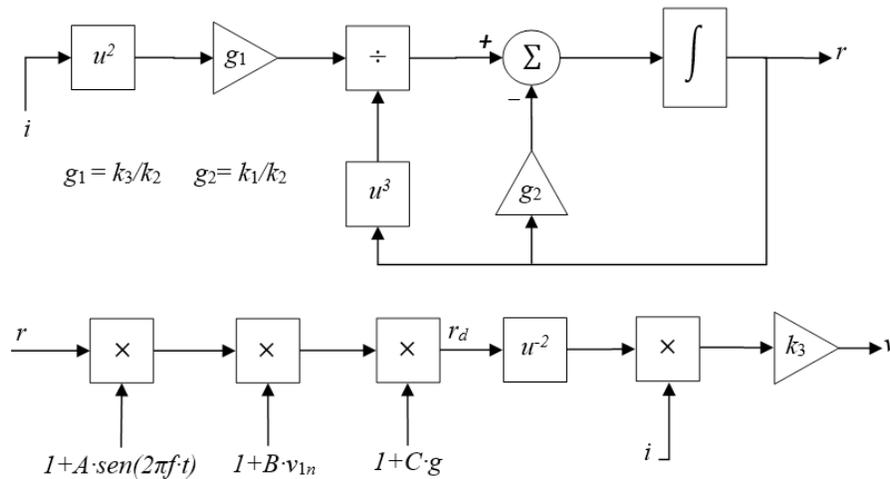
Fuente: Orille (1993).

parte del modelo determina el *voltaje dinámico* del arco eléctrico.

Luego, la naturaleza variable de la longitud del arco se refleja en el modelo introduciendo un comportamiento de tipo determinista, aleatorio y caótico a la variable de estado  $r$  de forma simultánea. Para esto, se realiza la modulación de amplitud de  $r$  con una señal sinusoidal, una señal de naturaleza caótica, y una señal aleatoria con distribución gaussiana. En la figura 3 se ilustra la implementación en diagrama de bloques de la segunda fase del modelo.

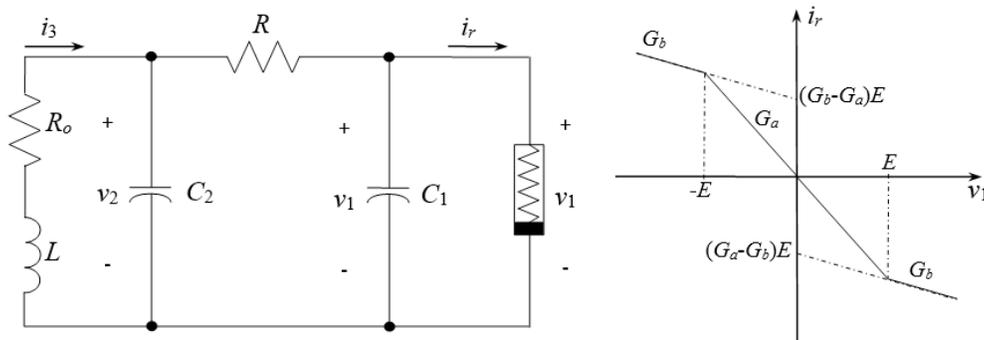
En la figura 3,  $v_{1n}$  es una señal caótica de baja frecuencia normalizada (de valor máximo igual a 1), generada con el oscilador de Chua, y  $g$  es una señal aleatoria que tiene una distribución de probabilidad gaussiana con media 0 y desviación estándar  $C$ . Las constantes  $A$ ,  $B$  y  $C$  representan los índices de modulación de amplitud (por fase) para las tres señales moduladoras. Una vez obtenido el radio dinámico  $r_d$ , el voltaje dinámico del arco eléctrico por fase  $v$  se determina con la ecuación (2).

$$v = \frac{k_3}{r_d^2} i, \quad (2)$$



**Figura 3.** Implementación en diagrama de bloques del modelo dinámico del arco eléctrico basado en el principio de conservación de la energía

**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 4.** Circuito no lineal de Chua y característica  $i$ - $v$  del diodo de Chua

**Fuente:** elaboración propia.

El oscilador de Chua se representa con el circuito que se muestra en la parte izquierda de la figura 4, y se implementa usando elementos lineales conectados a un dispositivo no lineal, conocido como el diodo de Chua, caracterizado por la curva  $i_r-v_1$  que se muestra en la parte derecha de la figura 4.

El circuito es no lineal, autónomo y de tercer orden (tres elementos almacenadores de energía), que ha servido de prueba para áreas de investigación que involucran procesos de bifurcación y caos. La ecuación (3) describe la relación voltaje/corriente en el diodo de Chua,

$$i_r = G_b v_1 + \frac{1}{2}(G_a - G_b)(|v_1 + E| - |v_1 - E|), \quad (3)$$

Las ecuaciones (4), (5) y (6) relacionan los elementos lineales, se obtienen usando la ley de corriente de Kirchhoff.

$$L \frac{di_3}{dt} = -R_0 i_3 - v_2, \quad (4)$$

$$C_2 \frac{dv_2}{dt} = i_3 - \frac{1}{r}(v_2 - v_1), \quad (5)$$

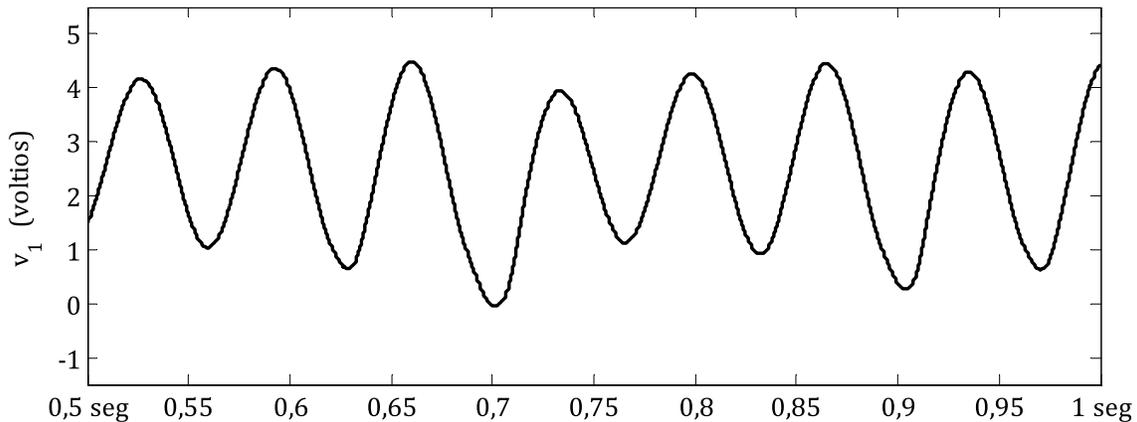
$$C_1 \frac{dv_1}{dt} = \frac{1}{R}(v_2 - v_1) - i_r, \quad (6)$$

Este sistema de ecuaciones resulta de gran ayuda para implementar el oscilador de Chua con diagrama de bloques en programas en donde no es posible especificar las condiciones iniciales de las variables  $v_1$ ,  $v_2$  e  $i_3$ . Usando los valores  $R_0 = 12.5 \Omega$ ,  $L = 3.6 \text{ mH}$ ,  $C_1 = 2 \mu\text{F}$ ,  $C_2 = 20 \mu\text{F}$ ,  $R = 1.873 \text{ k}\Omega$ ,  $E = 1 \text{ V}$ ,  $G_a = -757.576 \text{ U}$  y  $G_b = -409.091 \text{ U}$ , se obtiene en  $v_1$  una señal caótica de baja frecuencia en el rango de  $[12, 20] \text{ Hz}$ , como se muestra en la figura 5.

La señal  $v_{1n}$  que se utiliza en el modelo del horno de arco corresponde al voltaje  $v_1$  dividido entre su valor máximo. Información más detallada acerca del oscilador de Chua se encuentra en Kennedy (1993a, 1993b).

### Modelo hiperbólico del arco eléctrico

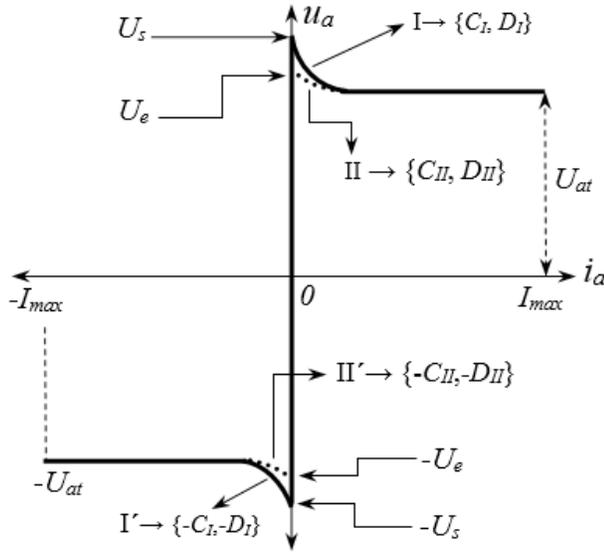
Este modelo parte de la relación entre el voltaje y la corriente del arco eléctrico presentado en Cavallini, Montanari, Pitti y Zaninelli, 1995). Se fundamenta a partir de la característica voltaje/corriente del arco eléctrico, tal como se observa en la parte izquierda de la figura 2 y se redibuja con mayor detalle en la figura 6. En esta última se distinguen cuatro regiones I, II, I' y II'. Las regiones I



**Figura 5.** Voltaje en el capacitor C1, que corresponde a una señal caótica con baja frecuencia en el intervalo de  $[12, 20] \text{ Hz}$

**Fuente:** elaboración propia.

y  $I'$  indican la característica de *encendido* del arco eléctrico en el semiciclo positivo y negativo respectivamente de la corriente del arco. Las regiones II e III muestran la parte de *extinción* de la corriente del arco, en el semiciclo positivo y negativo respectivamente de la corriente.



**Figura 6.** Característica de voltaje/corriente del arco eléctrico

**Fuente:** elaboración propia.

La ecuación (7) captura con precisión la característica  $u_a-i_a$  del arco eléctrico de la figura 6 (Montanari *et al.*, 1994).

$$u_a(i_a) = U_{at} + \frac{C}{D + i_a}, \quad (7)$$

Donde  $U_{at}$  que puede ser positivo (semiciclo positivo) o negativo (semiciclo negativo), es el voltaje umbral, el cual representa el voltaje del arco correspondiente al mayor valor de corriente ( $\pm I_{m\acute{a}x}$ ). Los valores de  $C$  y  $D$  dependen de la evolución de la corriente del arco; por ejemplo, cuando el arco se enciende (región I o I')  $C = \pm C_I$  y  $D = \pm D_I$  (+ para el semiciclo negativo y - para el semiciclo positivo). Luego, a medida que la corriente crece, el voltaje del arco tiende al voltaje umbral

$\pm U_{at}$ . Una vez la corriente del arco alcanza su valor máximo  $\pm I_{m\acute{a}x}$ , ella empieza a decrecer y las constantes cambian ahora a  $C = \pm C_{II}$  y  $D = \pm D_{II}$ . Finalmente, el arco eléctrico se extingue en el paso por cero de la corriente. La condición  $i_a = 0$  da los valores del voltaje de arco de encendido y de extinción, para el semiciclo positivo de la corriente del arco se dan con las ecuaciones (8) y (9).

$$U_s = U_{at} + \frac{C_I}{D_I}, \quad (8)$$

$$U_e = U_{at} + \frac{C_{II}}{D_{II}}, \quad (9)$$

Con  $U_s$  mayor que  $U_e$ . Para el semiciclo negativo, estos voltajes cambian de signo. En este trabajo se ajustan los parámetros con los valores utilizados en Mousavi, Hosseinian, Askarian y Moaddabi, 2010), que son  $C_I = 190000$  W,  $D_I = 5000$  A,  $C_{II} = 39000$  W y  $D_{II} = 5000$  A, y un voltaje umbral  $U_{at0} = 240$  V para cada fase. La resistencia del arco eléctrico  $r_a$  se determina utilizando la ecuación (10).

$$r_a = \frac{u_a}{i_a}. \quad (10)$$

En el momento de realizar la implementación del modelo, existe un problema de estabilidad debido al tiempo de paso de integración, causando que la resistencia del horno tome el valor calculado en el paso previo. Por tal razón, el valor de la corriente esperada para el tiempo de simulación  $t_{i+1}$ , es estimada en el tiempo  $t_i$  mediante la ecuación (11).

$$i_a(t_{i+1}) = i_a(t_i) + \frac{di_a(t_i)}{dt}(t_{i+1} - t_i). \quad (11)$$

El modelo de horno de arco debe ser viable para reproducir las condiciones que causan el efecto *flicker*. La variación de la tensión de horno de arco depende de la variación de la longitud de arco y se encuentran relacionados con la ecuación (12) (Cavallini, Montanari, Pitti y Zaninelli, 1995):

$$U_{at}(l) = A + Bl, \quad (12)$$

Donde  $l$  es la longitud de arco en cm,  $A$  es la constante que considera la suma de las caídas de tensión en los electrodos y  $B$  es la constante que representa la caída de tensión por unidad de longitud de arco. Para la implementación del modelo se consideran los valores típicos  $A = 40$  V y  $B = 10$  V/cm (Mousavi, Hosseinian, Askarian y Moaddabi, 2010). Para introducir fluctuaciones de tensión al voltaje se utiliza la variable  $k$ , que se relaciona con el voltaje del arco ( $u_a$ ) con la ecuación (13).

$$u_a(i_a) = k(i_a) \cdot U_{at}, \quad (13)$$

Con  $k$  dado como se indica en la ecuación (14).

$$k = \frac{A + Bl}{A + Bl_0}, \quad (14)$$

$U_{at}$  y  $l_0$  son el voltaje y la longitud de arco cuando  $i_a$  tiene un valor máximo. Se propone utilizar los dos comportamientos, el aleatorio y el periódico, para el modelo del horno de arco. Por tanto, el radio  $k$  no solo tendrá un movimiento cíclico sino a su vez será un movimiento aleatorio para así poder generar las fluctuaciones de tensión causadas por este tipo de comportamiento característico de los hornos de arco eléctrico (Alzate, Marulanda y Escobar, 2010). El anterior paso es descrito con la ecuación (15).

$$k = 1 - \frac{(U_{\max} - U_{\min})(1 + \text{sen}(\omega t))}{2U_{at0}} (1 + \text{std}(g_n)), \quad (15)$$

La señal  $g_n$  es ruido generado, el cual tiene una distribución gaussiana con media cero y desviación estándar de  $g_n$ , que se denota como  $\text{std}(g_n)$ , es un parámetro de entrada al modelo y es necesario establecer previamente su rango de variación. El diagrama de bloques que muestra la implementación del modelo hiperbólico del arco eléctrico se muestra en la figura 7.

En la figura 7,  $I_{\min'}$  que es la diferencia de corriente en el cruce por 0 de la característica voltaje/corriente del arco eléctrico, se estableció en  $I_{\min'} = 0.7$  kA. La variable  $k$  es la longitud de radio de horno de arco definida en la ecuación 15, con  $U_{\max} = 600$  V y  $U_{\min} = -600$  V.

## RESULTADOS

### Base de datos

Se utilizaron las formas de onda de voltajes y corrientes reales presentadas en Cano y Tacca (2005) para comparar el funcionamiento de los dos modelos de horno de arco eléctrico. Los datos tienen una frecuencia de muestreo de 2048 mps (muestras por segundo), una frecuencia fundamental de 50 Hz y seis ciclos de voltajes y corrientes.

### Software de desarrollo de los modelos

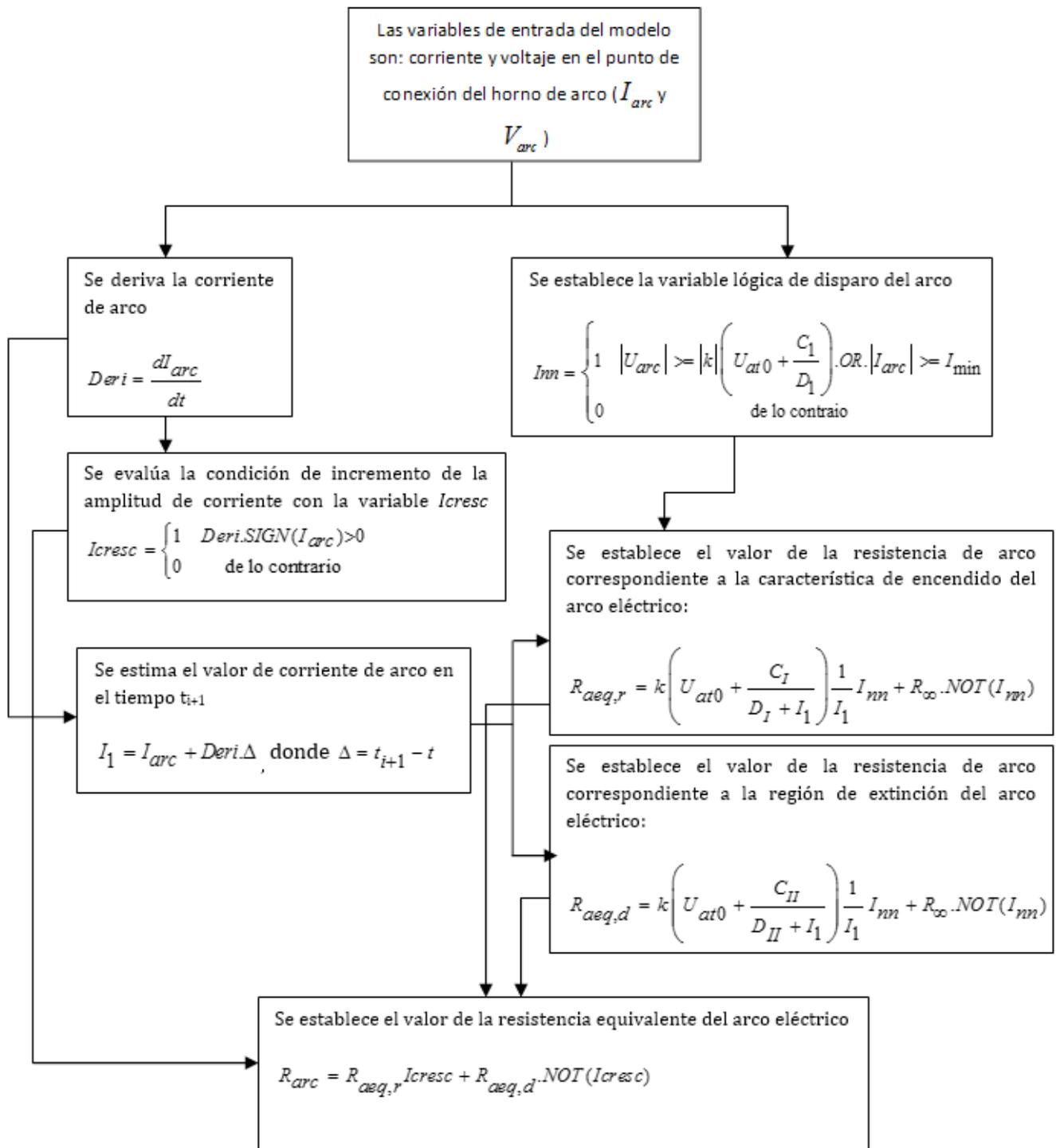
Se utilizó el programa *PSCAD-EMTDC* para desarrollar los dos modelos de horno de arco. Para la simulación se estableció un paso de 97.656  $\mu$ S, un tiempo de simulación de cinco segundos y se usó el compilador Compaq Visual Fortran Professional Edition 6.1 para el desarrollo de algunas librerías utilizadas en la implementación de los modelos.

### Resultados

Para efectos de presentación de resultados, el modelo 1 hace referencia al basado en el principio de conservación de la energía, y el modelo 2 será el modelo hiperbólico. Las mediciones para la comparación fueron tomadas en el secundario del transformador de la subestación del horno, es decir el transformador  $T_2$ ; y están referenciados al final de la etapa de fusión.

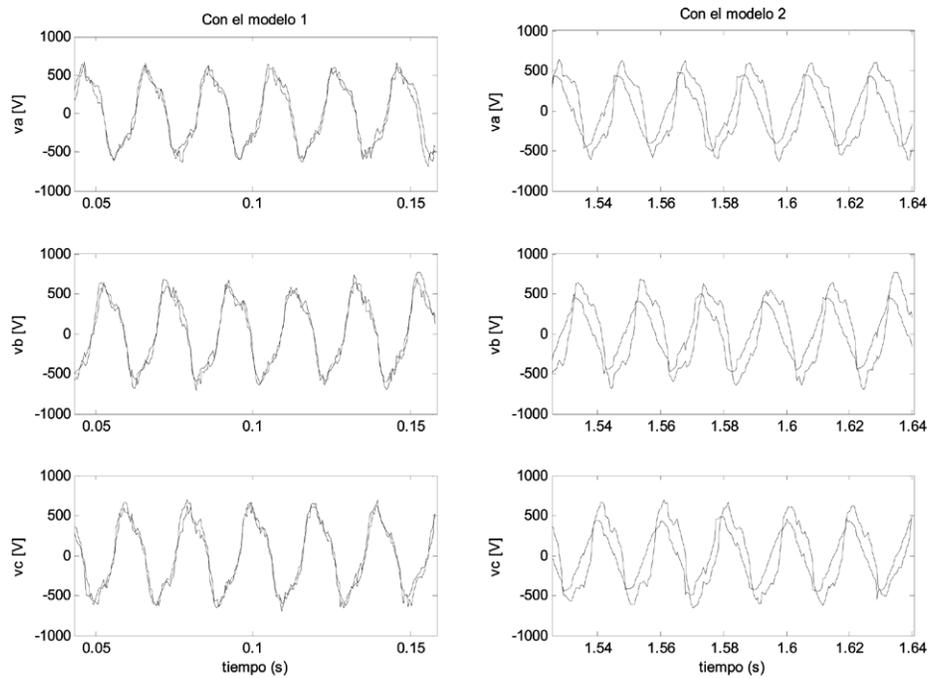
Las formas de onda de los voltajes de fase en el secundario del transformador  $T_2$ , reales y simulados se muestran en la figura 8. En esta se observa que ambos modelos del horno de arco capturan la naturaleza no lineal de los voltajes reales, es decir, los voltajes se asemejan a los valores reales de los datos en cuanto a magnitud y forma. Además, se observa una mejor aproximación del modelo 1 a los voltajes reales, ya que casi ni se distinguen en el gráfico las líneas discontinuas.

Una comparación similar se ha realizado para las formas de onda de las corrientes del arco eléctrico.



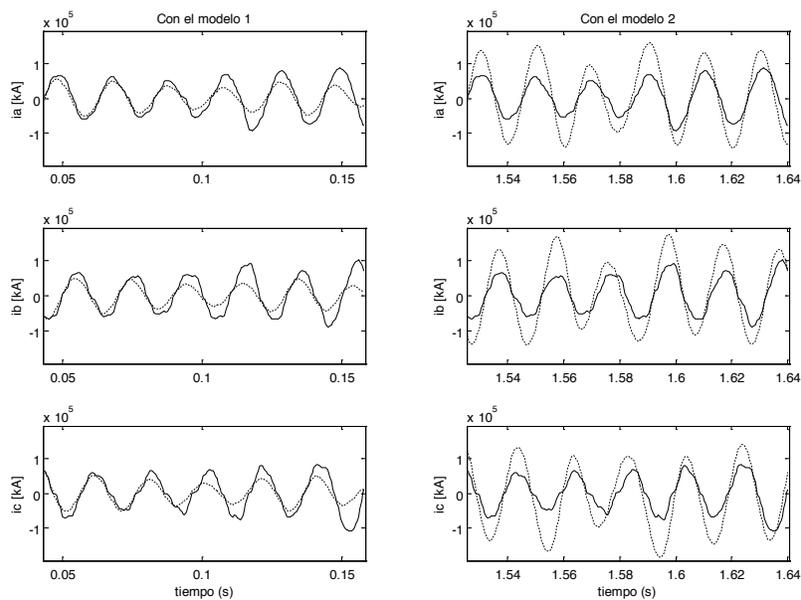
**Figura 7.** Implementación en diagramas de bloques del modelo hiperbólico del arco eléctrico

**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 8.** Voltajes de fase en el secundario del transformador  $T_2$  reales (continuo) y simulados (discontinuo), usando el modelo 1 (izquierda), y con el modelo 2 (derecha)

**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 9.** Formas de onda de las corrientes del arco eléctrico para las tres fases, comportamiento real (continuo) y simulado (discontinuo) utilizando el modelo 1 (izquierda), y con el modelo 2 (derecha)

**Fuente:** elaboración propia.

En la figura 9 se muestran las corrientes del arco eléctrico real y simulado para las tres fases. Los resultados muestran que la aproximación en la dinámica del comportamiento del modelo de horno de arco, sigue la característica de operación de la carga, validando su inclusión en un sistema de potencia para efectuar análisis en calidad de la energía.

Se determinó el error medio cuadrático de las formas de onda de tensión y corriente de los datos reales y simulados, y para cada modelo se compararon los resultados. El error medio cuadrático se determinó con la ecuación (16).

$$E = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_{is} - x_{ir})^2}, \quad (16)$$

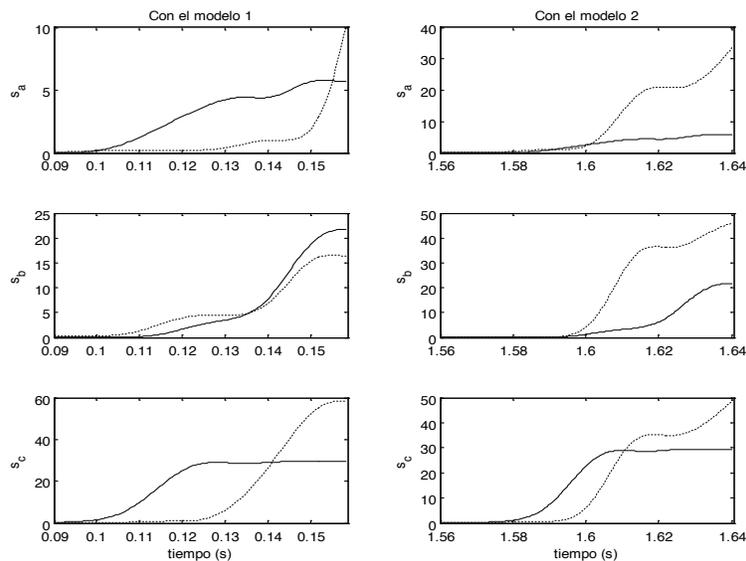
Donde  $N$  es el número de datos de la señal simulada  $x_{is}$  (que puede ser un voltaje o una corriente) y  $x_{ir}$  es la señal real (de voltaje o corriente). Los resultados se muestran en la tabla 2.

El nivel instantáneo de flicker que se denota con la letra  $s$ , es una medida de la cantidad de sensación de flicker producida por alguna fluctuación de tensión. Esta variable tiene en cuenta la sensibilidad del ojo humano respecto a la frecuencia de cambios de la luminosidad de una lámpara incandescente (Standard CEI/IEC 61000-4-15, 1997). La figura 10 muestra el comportamiento de  $s$  (para cada voltaje) producido por las fluctuaciones de tensión de los datos simulados

**Tabla 2.** Comparación del error medio cuadrático de los voltajes y las corrientes usando los dos modelos.

	Modelo 1		Modelo 2	
	Voltaje [V]	Corriente [A]	Voltaje [V]	Corriente [A]
Fase a	5,9092	1,5561e3	45,718	3,2695e3
Fase b	5,5002	1,8349e3	18,836	3,3331e3
Fase c	5,5280	1,8149e3	17,073	3,5449e3
Promedio	5,6485	1,735e3	27,209	3,3822e3

**Fuente:** elaboración propia.



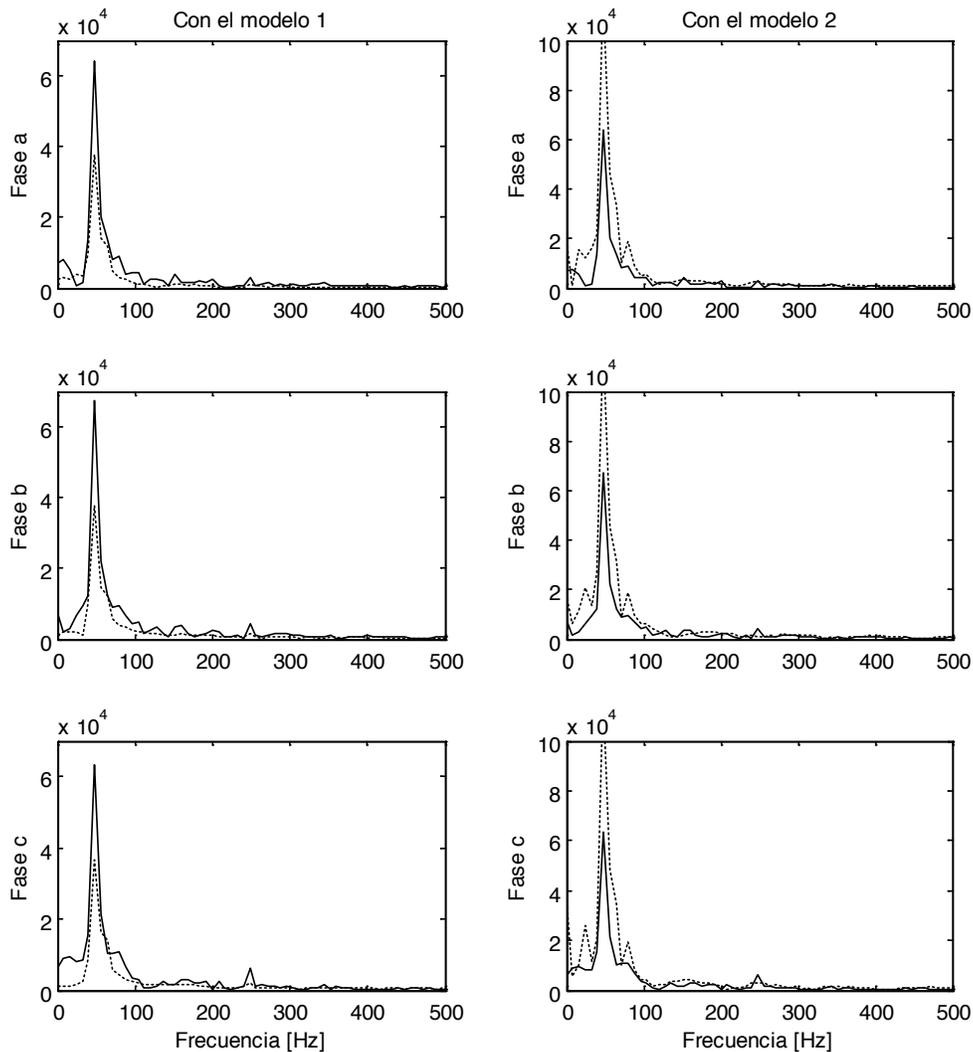
**Figura 10.** Sensación instantánea de flicker real (continua) y simulada (discontinua) de los voltajes utilizando el modelo 1 (izquierda) y el modelo 2 (derecha)

**Fuente:** elaboración propia.

y su comparación con los correspondientes datos reales. Se observa cómo la evolución en el tiempo de  $s$  guarda cierto nivel de similitud en el voltaje de la fase  $b$  obtenido con el modelo 1 y del voltaje de la fase  $c$  del modelo 2. Para los demás voltajes de ambos modelos la similitud con los correspondientes valores reales sus diferencias

aumenta. Al final del tiempo, siempre son mayores los valores de  $s$  de los voltajes del modelo 2 comparados con los reales.

Debido a que el horno de arco es por naturaleza una fuente de armónicos, el modelo debe reproducir en forma cercana los armónicos de voltaje y corriente. La figura 11 muestra el espectro



**Figura 11.** Sensación instantánea de flicker real (continua) y simulada (discontinua) de los voltajes utilizando el modelo 1 (izquierda) y el modelo 2 (derecha)

**Fuente:** elaboración propia.

armónico de las corrientes del arco eléctrico reales y simuladas con los dos modelos.

Ambas curvas presentan un comportamiento similar, produciendo componentes interarmónicas y armónicas de orden par e impar. Sin embargo, el modelo 1 presenta una mejor aproximación a los armónicos de corriente.

## CONCLUSIONES

La comparación de los resultados obtenidos a partir de las simulaciones realizadas con los datos reales, permite observar que los modelos implementados reflejan el comportamiento caótico y aleatorio de la carga y valida su inclusión en los problemas que se van a analizar en la red de distribución.

Los resultados muestran que los modelos se aproximan a la dinámica de comportamiento del horno de arco, con mejores efectos de aproximación en forma de ondas de corriente y tensión siguiendo la característica de operación de la carga, validando su inclusión en un sistema de potencia para efectuar análisis en calidad de energía.

El modelo 1 implementado logra una mejor aproximación de la forma de onda de voltajes y corriente, pero al observar el comportamiento del fenómeno índice de severidad de flicker de corta duración, se evidencia que el modelo 2 presenta una fluctuación mayor de tensión a la luz del comportamiento de esta variable. Como un trabajo futuro se recomienda utilizar una técnica de identificación de parámetros que minimice el error entre los datos reales y los simulados en ambos modelos.

## FINANCIAMIENTO

Universidad Tecnológica de Pereira y Colciencias. Financiación del convenio 467/08.

## REFERENCIAS

- Alves, M.; Assis P., Z.; Peixoto G., C. y Goncalves G., D. (2010). An integrated model for the study of flicker compensation in electrical networks. *Electric Power Systems Research*, 80, 1299-1305.
- Alzate, A.; Marulanda, J. y Escobar, A. (2010). *Electric Arc Furnace Modeling for Power Quality Analysis*. Bogotá: IEEE Conference of the Andean Council ANDESCON.
- Cano, E. y Tacca, H. (2005). Arc furnace modeling in ATP EMTP. Montreal Canada: Presented at the International Conference on Power Systems Transientes.
- Cavallini, A.; Montanari, G.; Pitti, L. y Zaninelli, D. (mayo-junio de 1995). ATP Simulation for Arc-Furnace Flicker Investigation. *European Transactions on Electrical Power Engineering*, 5(3), 165-172.
- Göl, M.; Özgül Salor, Bora Alboyacı, Bilge Mutluer, Işık Çadırcı, & Muammer Ermiş. (2010). A New Field-Data-Based EAF Model for Power Quality Studies. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 46(3), 1230-1242.
- Kennedy, M. (octubre de 1993a). Three steps to Chaos-Part I: Evolution. *IEEE Transactions on Circuit and Systems-I: Fundamental, Theory and Applications*, 40(10), 640-665.
- Kennedy, M. (octubre de 1993b). Three steps to Chaos-Part II: A Chua's circuit primer. *IEEE Transactions on Circuit and Systems-I: Fundamental, Theory and Applications*, 40(10), 657-674.
- Montanari, G.; Loggini, M.; Cavallini, A.; Pitti, L. y Zaninelli, D. (octubre de 1994). Arc Furnace Model for the Study of Flicker Compensation in Electrical Networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 9(4), 2026-2036.
- Mousavi Agah, S.; Hosseinian, S.; Askarian Abyaneh, H. y Moaddabi, N. (2010). Parameter Identification of

Arc Furnace Based on Stochastic Nature of arc Length using two- step Optimization Technique. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25(4), 2859-2867.

O'Neill, E.; Heydt, G.; Kostelich, E.; Venkata, S. y Sundaram, A. (abril de 1999). Nonlinear Deterministic Modeling of Highly Varying Loads. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 14(2), 537-542.

Orille F., A. (1993). *Centrales eléctricas II. Introducción al sector eléctrico y al sistema de energía eléctrica*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.

Standard CEI/IEC 61000-4-15 (1997). Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4. Testing and measurements techniques. Section 15: Flickermeter-Functional and Testing Specifications.

Trageser, J. (marzo-abril de 1980). Power Usage and Electrical Circuit Analysis for Electric Arc Furnaces. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-16(2), 277-284.





## Estimación del factor $K$ en transformadores de distribución usando modelos de regresión lineal

### K factor estimation in distribution transformers using linear regression models

Juan Miguel Astorga Gómez<sup>1</sup>, Rodrigo Alfonso Aróstica Córdova<sup>2</sup>, Yuri Antonio Iriarte Salinas<sup>3</sup>

**Fecha de recepción:** 17 de febrero de 2015

**Fecha de aceptación:** 15 de febrero de 2016

**Cómo citar:** Astorga Gómez, J. M., Aróstica Córdova, R. A., & Iriarte Salinas, Y. A. (2016). Estimación del factor  $K$  en transformadores de distribución usando modelos de regresión lineal. *Revista Tecnura*, 20(48), 29–40. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.2.a02

#### Resumen

**Contexto:** Debido a la incorporación masiva de equipos electrónicos a los sistemas de distribución, los transformadores de distribución están sometidos a condiciones de operación distintas a las de diseño, por causa de la circulación de corrientes armónicas. Es necesario cuantificar el efecto que producen estas corrientes armónicas para determinar la capacidad del transformador de soportar estas nuevas condiciones de operación. El factor  $K$  es un indicador que permite estimar la capacidad que tiene un transformador de soportar los efectos térmicos producidos por las corrientes armónicas. En este artículo se propone un modelo de regresión lineal para estimar el valor del factor  $K$ , a partir del contenido armónico total de corriente que se obtiene con equipos de bajo costo.

**Método:** Se estudian dos transformadores de distribución que alimentan cargas distintas, se registran las variables distorsión armónica total en corriente y factor  $K$  y se determina el modelo de regresión que mejor ajusta a los datos de campo. Para seleccionar el modelo de regresión se usan el coeficiente

de determinación  $R^2$  y el criterio de información de Akaike (AIC). Con el modelo seleccionado, se estima el factor  $K$  para las condiciones de operación real.

**Resultados:** Una vez determinado el modelo se pudo comprobar que tanto para la carga agrícola como para la industrial minera, el contenido de armónicos (THDi) presente supera los valores que estos transformadores pueden manejar (valor medio de 12,54 % y mínimo de 8,90 % en el caso agrícola y valor medio de 18,53 % y mínimo de 6,80 %, para el caso industrial minero).

**Conclusiones:** Al estimar el factor  $K$  utilizando los modelos polinomiales se determinó que los transformadores estudiados no pueden soportar la distorsión armónica total en corriente de sus cargas actuales. El factor  $K$  adecuado para los transformadores estudiados debe ser 4, esto permite que los transformadores soporten la distorsión armónica total en corriente de sus respectivas cargas.

**Palabras clave:** Distorsión armónica total de corriente, factor  $K$ , modelos de regresión, transformadores de distribución.

- 1 Ingeniero Eléctrico, Magíster en Ciencias con Mención en Estadística Industrial, Docente de la Facultad Tecnológica, Universidad de Atacama. Copiapó, Chile. Contacto: [juan.astorga@uda.cl](mailto:juan.astorga@uda.cl)
- 2 Ingeniero Civil Industrial Electrónico, Docente de la Facultad Tecnológica, Universidad de Atacama. Copiapó, Chile. Contacto: [rodrigo.arostica@uda.cl](mailto:rodrigo.arostica@uda.cl)
- 3 Profesor de Matemática y Física, Magíster en Ciencias con Mención en Estadística Industrial, Docente de la Facultad de Ciencias Básicas, Departamento de Matemática, Universidad de Antofagasta. Antofagasta, Chile. Contacto: [yuri.iriarte@uantof.cl](mailto:yuri.iriarte@uantof.cl)

## ABSTRACT

**Background:** Due to massive incorporation of electronic equipment to distribution systems, distribution transformers are subject to operation conditions other than the design ones, because of the circulation of harmonic currents. It is necessary to quantify the effect produced by these harmonic currents to determine the capacity of the transformer to withstand these new operating conditions. The K-factor is an indicator that estimates the ability of a transformer to withstand the thermal effects caused by harmonic currents. This article presents a linear regression model to estimate the value of the K-factor, from total current harmonic content obtained with low-cost equipment.

**Method:** Two distribution transformers that feed different loads are studied variables, current total harmonic distortion factor K are recorded, and the regression model that best fits the data field is determined. To select the regression model the coefficient

of determination  $R^2$  and the Akaike Information Criterion (AIC) are used. With the selected model, the K-factor is estimated to actual operating conditions.

**Results:** Once determined the model it was found that for both agricultural cargo and industrial mining, present harmonic content (THDi) exceeds the values that these transformers can drive (average of 12.54% and minimum 8,90% in the case of agriculture and average value of 18.53% and a minimum of 6.80%, for industrial mining case).

**Conclusions:** When estimating the K factor using polynomial models it was determined that studied transformers can not withstand the current total harmonic distortion of their current loads. The appropriate K factor for studied transformer should be 4; this allows transformers support the current total harmonic distortion of their respective loads.

**Keywords:** Distribution transformers, K factor, regression models, total current harmonic distortion.

## INTRODUCCIÓN

Las cargas no lineales producen corrientes armónicas en los alimentadores de distribución y, como efecto de esto, los transformadores de distribución aumentan sus pérdidas (Daut *et al.*, 2006). Las pérdidas por corrientes de Foucault tienen mayor significancia en las pérdidas de los transformadores de distribución, ya que al existir componentes armónicas, las pérdidas aumentan aproximadamente al cuadrado de la frecuencia (Attia, El-Metwally y Fahmy, 2010). Por lo general, los transformadores instalados en los sistemas de distribución han sido proyectados para suministrar energía a cargas que operan con frecuencias nominales. Si estos transformadores alimentan cargas no lineales y su diseño constructivo no considera la circulación de corrientes armónicas, los transformadores podrían experimentar calor excesivo en sus bobinados, reduciendo su vida útil y propiciando el corte de suministro (Yagci y Ürkmez, 2011). Para abordar el

problema de las pérdidas en los transformadores de distribución se han estudiado algunas técnicas como: mitigar las componentes armónicas de las cargas que alimentan estos transformadores (Davudi, Torabzad y Ojaghi, 2011), calcular el factor K adecuado para los transformadores usando las componentes armónicas individuales de corriente (Verma, Kaushik, Prabhakar y Sengupta, 2014) y desarrollar modelos de pérdidas de transformadores por medio de elementos finitos (Faiz, Sharifian, Fakheri y Sabet-Marzooghi, 2004). Varias industrias mineras y agrícolas del norte de Chile son alimentadas por medio de transformadores de distribución cuyo factor K es igual a 1, factor que está diseñado para operar a frecuencia nominal. Dado que esta industria contiene gran cantidad de equipos de electrónica de potencia, los transformadores de distribución instalados operan en condiciones adversas de diseño. El objetivo de este trabajo es estudiar el valor adecuado del factor K que deben tener los transformadores

de distribución que alimentan estas cargas, utilizando dos muestras representativas, modelos de regresión lineal, como herramienta de estimación, y distorsión armónica total de corriente, como variable de entrada. No se ha decidido utilizar a las componentes armónicas individuales de corriente como variables de entrada, porque en la práctica es más común obtener registros de distorsión armónica total de corriente por parte de los equipos de mantenimiento.

Este artículo se estructura de la siguiente manera: en la primera parte se presentan las definiciones técnicas de factor  $K$  y distorsión armónica total en corriente; se muestran las principales características de los modelos de regresión que son tratados, y se describen los indicadores que se utilizan para validar y seleccionar los modelos propuestos. Luego, se describen los resultados del procesamiento de datos de los registros para las cargas agrícola y minera; se aplican los distintos modelos de regresión; se comparan los resultados de cada modelo; se evalúa su eficiencia, y se selecciona el mejor modelo. Posteriormente, se calculan algunas estimaciones para el factor  $K$  y la distorsión armónica total en corriente usando el modelo que haya tenido el mejor ajuste. Por último, se plantean las principales conclusiones de la investigación.

## METODOLOGÍA

En la actualidad, los transformadores de distribución que alimentan cargas industriales manejan corrientes con alto contenido armónico. Muchos de estos transformadores han sido construidos solo para soportar el aumento de temperatura debido a las corrientes parásitas a frecuencia nominal de 50 Hz, es decir, gran parte de los transformadores de distribución tienen factor  $K$  igual a 1. En este trabajo se estima el valor del factor  $K$  que debe tener un transformador de distribución para soportar la distorsión armónica total en corriente de su carga usando modelos de regresión lineal. El análisis se realiza sobre dos transformadores de distribución,

uno alimenta una carga industrial minera y el otro, una carga industrial agrícola.

## Factor K

El factor  $K$  se define como un factor opcional que puede ser utilizado en transformadores y que indica la capacidad que tiene un transformador para manejar corrientes no sinusoidales (IEEE, 1998). El factor  $K$  se puede determinar según la ecuación 1.

$$\text{factor } K = \sum_{h=1}^{\infty} I_h(\text{pu})^2 h^2 \quad (1)$$

En donde  $I_h(\text{pu})$  es la corriente R.M.S. para la armónica de orden  $h$  (en por unidad) y  $h$  corresponde al orden de la componente armónica.

Los principales efectos de las corrientes no sinusoidales y sus consiguientes componentes armónicas en los transformadores de distribución son los siguientes: pérdidas por corrientes armónicas por el efecto  $I^2R$ ; pérdidas por corrientes de Eddy, las cuales aumentan proporcionalmente con el cuadrado de las corriente de carga y al cuadrado de la frecuencia, y pérdidas parásitas por efecto de corrientes armónicas en el núcleo, abrazaderas y elementos estructurales de los transformadores que aumentan proporcionalmente con el cuadrado de la corriente de carga.

La tabla 1 muestra el factor  $K$  adecuado para transformadores de distribución según el tipo de carga que alimentan.

## Distorsión armónica total en corriente (THDi)

El incremento de la tecnología disponible para el control de potencia en máquinas rotativas y la proliferación de equipos electrónicos en las instalaciones eléctricas, cuyo comportamiento es no lineal, provoca la circulación de corrientes de frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental de la red (50 Hertz en Chile), llamadas frecuencias armónicas. El nivel de contenido

**Tabla 1.** Clasificación del factor K para transformadores de distribución

Tipo de carga	Factor K
Lámparas incandescentes (sin <i>dimmers</i> de estado sólido), calefactores eléctricos resistivos (sin controles de calor de estado sólido), motores (sin controladores de estado sólido), transformadores de control, dispositivos electromagnéticos de control, motor generador (sin controladores de estado sólido).	K-1
Lámparas de descarga, UPS con filtros de entrada opcional, equipos de calefacción inductivos, PLC y controladores de estado sólido	K-4
Equipos de telecomunicaciones, UPS sin filtros de entrada.	K-13
Servidores de computadores, controladores de estado sólido (variadores de frecuencia), conectores multiconductor para instalaciones de salud, escuelas, etc., conectores multiconductor para alimentadores en equipos de inspección o prueba o para líneas de producción.	K-20
Conectores multiconductor para circuitos industriales, médicos y laboratorios educacionales, conectores multiconductor para circuitos comerciales en oficinas, pequeños servidores.	K-30
Otras cargas identificadas como productores de grandes cantidades de armónicos.	K-40

**Fuente:** Tomada de Gouda, Amer y Salem (2011).

armónico se puede medir usando el indicador Distorsión Armónica Total (THD por sus siglas en inglés), que es una relación porcentual entre el valor eficaz total de las componentes armónicas con respecto al valor eficaz de la componente fundamental. Este factor puede variar desde unas pocas unidades hasta superar el 100%.

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \quad (2)$$

La ecuación (2) muestra el cálculo de la distorsión armónica total en corriente, donde  $I_h$  es la magnitud de la corriente a la frecuencia de orden  $h$  e  $I_1$  es la magnitud de la corriente a la frecuencia fundamental (Arrillaga y Watson, 2003).

## Modelos de regresión lineal

Los modelos de regresión lineal son ampliamente usados en la ingeniería para el análisis de variables de entrada (independiente) y salida (respuesta) de un proceso, pues permiten estimar valores para la variable de salida en función de la variable de entrada (Montgomery, Peck y Vining, 2006). En este trabajo se estudian los modelos de regresión lineal

simple y polinomial de orden 2 y 3. En ambos casos, la variable de salida es la distorsión armónica total en corriente y la variable de entrada es el factor K de transformadores de distribución.

## Modelo de regresión lineal simple

La ecuación (3) muestra la representación de un modelo de regresión lineal simple, donde  $Y$  es la respuesta,  $X$  es la variable independiente,  $\beta_0$  y  $\beta_1$  son los parámetros del modelo o coeficientes de regresión y  $\varepsilon$  es el error del modelo.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon \quad (3)$$

La ecuación (4) muestra el modelo ajustado de regresión lineal simple, donde  $\hat{Y}$  es el valor estimado de la respuesta para la variable independiente  $X$ . Los estimadores de los parámetros del modelo son calculados por el método de los mínimos cuadrados usando las ecuaciones (5) y (6).

$$\hat{Y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X \quad (4)$$

$$\hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

$$\hat{\beta}_0 = \bar{y} + \hat{\beta}_1 \bar{x} \quad (6)$$

### Modelo de regresión polinomial

Los modelos de regresión polinomial se usan cuando la variable de respuesta muestra un comportamiento no lineal (Montgomery, Peck y Vining, 2006). La ecuación 7 describe el modelo de regresión polinomial de orden  $k$  y la ecuación 8 muestra el modelo ajustado de regresión polinomial de orden  $k$  para una variable independiente. Los estimadores de los parámetros del modelo polinomial se obtienen por el método de los mínimos cuadrados usando la ecuación 9, donde  $y$ ,  $X$ ,  $X'$  son vectores.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2 + \dots + \beta_k X^k + \varepsilon \quad (7)$$

$$\hat{Y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X + \hat{\beta}_2 X^2 + \dots + \hat{\beta}_k X^k \quad (8)$$

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1} X'y \quad (9)$$

### Coefficiente de determinación $R^2$

El coeficiente de determinación  $R^2$  mide la proporción de la variación de la respuesta  $Y$  que es explicada por el modelo de regresión (Montgomery, Peck y Vining, 2006). El coeficiente  $R^2$  se calcula usando la ecuación 10, donde  $SS_R$  es la medida de variabilidad del modelo de regresión y  $SS_T$  corresponde a la medida de variabilidad de la respuesta  $Y$  sin considerar el efecto de la variable independiente  $X$ .

$$R^2 = \frac{SS_R}{SS_T} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad 0 \leq R^2 \leq 1 \quad (10)$$

Si el valor de  $R^2$  se acerca a 1, entonces se tiene un buen ajuste y el modelo de regresión es capaz de explicar adecuadamente la variación de la variable de respuesta  $Y$ .

### CRITERIO DE INFORMACIÓN DE AKAIKE (AIC)

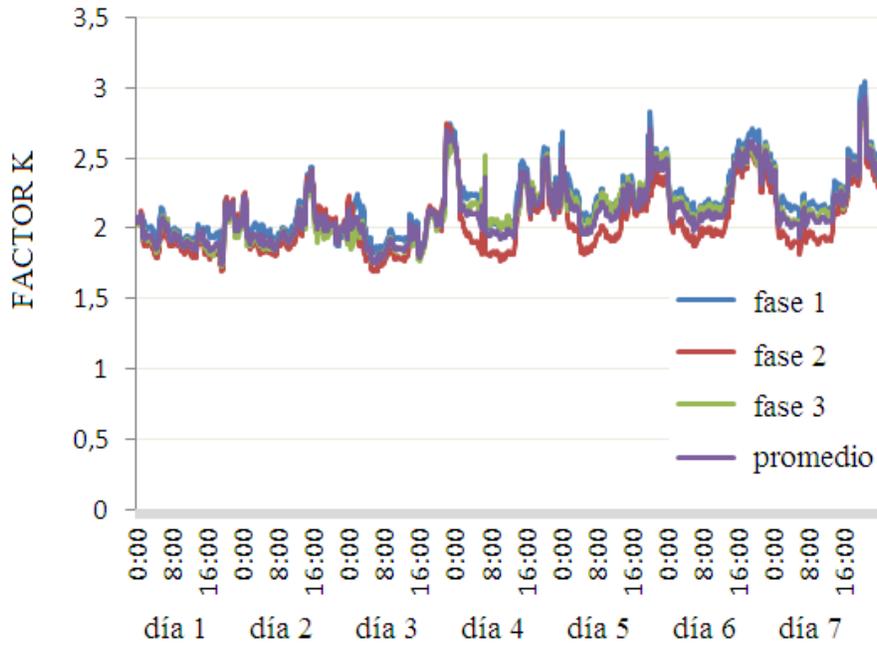
El criterio de información de Akaike (AIC) es un indicador que permite seleccionar un modelo estadístico basándose en la teoría de información y en las propiedades del método de máxima verosimilitud. Cuando se comparan dos o más modelos estadísticos, se selecciona aquel que presenta el menor valor de AIC (Akaike, 1974). Para calcular el AIC se utiliza la ecuación 11, donde  $k$  es el número de parámetros del vector de parámetros  $\theta$  del modelo y  $ML$  es la función de máxima verosimilitud.

$$AIC(\theta) = -2 \log (ML) + 2k \quad (11)$$

## RESULTADOS

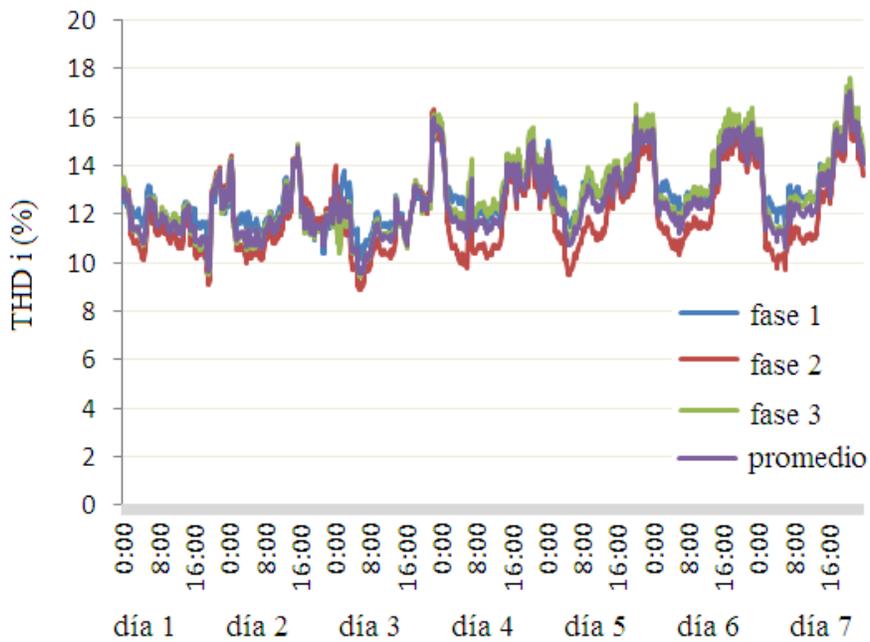
### Análisis carga industrial agrícola

Para estudiar el transformador de distribución que alimenta la carga agrícola se registraron cada diez minutos durante siete días consecutivos las variables factor  $K$  y distorsión armónica total en corriente, usando un equipo analizador de calidad de energía. Los resultados de estos registros se pueden apreciar en las figuras 1 y 2. En la tabla 2, se presenta un resumen de los principales indicadores estadísticos por fase y promedio para el factor  $K$  y la distorsión armónica total en corriente.



**Figura 1.** Factor  $K$  en transformador que alimenta carga industrial agrícola

Fuente: elaboración propia.



**Figura 2.**  $THDi$  en transformador que alimenta carga industrial agrícola

Fuente: elaboración propia.

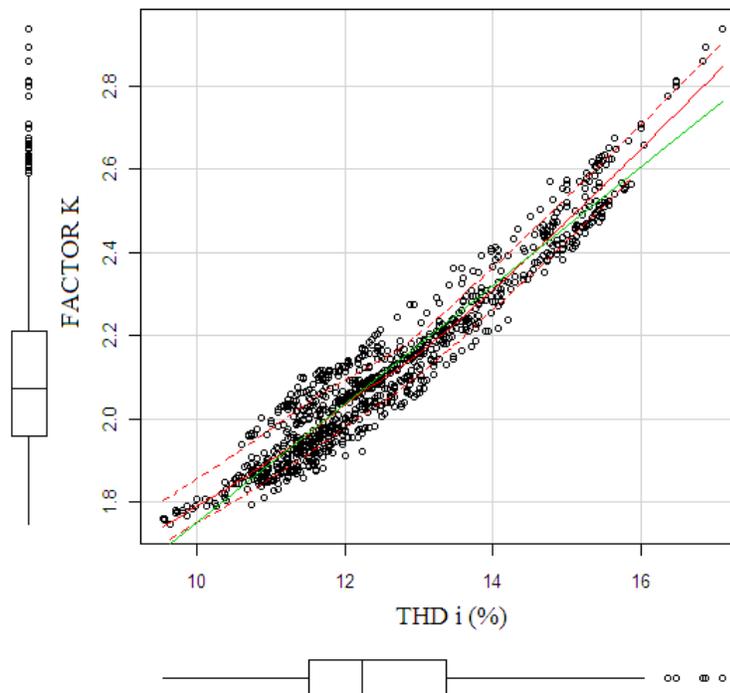
**Tabla 2.** Estadísticas descriptivas para la muestra de la carga agrícola

Variable	Media	Desviación estándar (DE)	Error estándar de la media (EEM)	Máximo	Mínimo
<i>THDi</i> fase 1 (%)	12,83	1,238	0,0390	17,10	10,10
<i>THDi</i> fase 2 (%)	12,02	1,597	0,0503	16,60	8,90
<i>THDi</i> fase 3 (%)	12,78	1,572	0,0495	17,60	9,40
Factor <i>K</i> fase 1	2,18	0,214	0,0068	3,04	1,81
Factor <i>K</i> fase 2	2,05	0,221	0,0070	2,87	1,69
Factor <i>K</i> fase 3	2,12	0,214	0,0067	2,90	1,73
<i>THDi</i> promedio (%)	12,54	1,469	0,0463	17,10	9,47
Factor <i>K</i> promedio	2,11	0,216	0,0068	2,94	1,74

**Fuente:** elaboración propia.

Para el ajuste de los modelos de regresión lineal se utilizan como variable independiente la distorsión armónica total en corriente promedio (*THDi* en la ecuación de los modelos) y como variable dependiente se usa el factor *K* promedio (*K* en la ecuación de los modelos). Usando el *software* de distribución

libre *R* (R Development Core Team, 2011), específicamente el paquete *Rcmdr*, se obtuvieron las gráficas de dispersión y los resultados analíticos de los modelos. Por otro lado, la figura 3 muestra la dispersión de las variables factor *K* vs. *THDi* y la tabla 3 describe el desempeño de cada modelo de regresión.



**Figura 3.** Gráfico de dispersión del factor *K* vs. *THDi* en la carga industrial agrícola

**Fuente:** elaboración propia.

**Tabla 3.** Ajuste de modelos de regresión para la carga agrícola

Modelo	R <sup>2</sup>	AIC
Regresión lineal simple $K = 0,3311 + 0,1422 \times THDi$	0,926	-2892,9
Regresión polinomial de orden 2 $K = 1,6009 - 0,0550 \times THDi + 0,0076 \times THDi^2$	0,933	-2991,9
Regresión polinomial de orden 3 $K = -1,1322 + 0,5878 \times THDi - 0,0424 \times THDi^2 + 0,0013 \times THDi^3$	0,934	-3001,4

**Fuente:** elaboración propia.

De la tabla 3, se puede apreciar que el mayor valor de  $R^2$  y el menor valor del  $AIC$  se obtienen con el modelo polinomial de orden 3. La ecuación 12 muestra el modelo polinomial de orden 3 que

resulta ser el más adecuado para estimar el valor del factor  $K$  a partir de la distorsión armónica total en corriente en la carga industrial agrícola.

$$K = -1,1322 + 0,5878 \times THDi - 0,0424 \times THDi^2 + 0,0013 \times THDi^3 \quad (12)$$

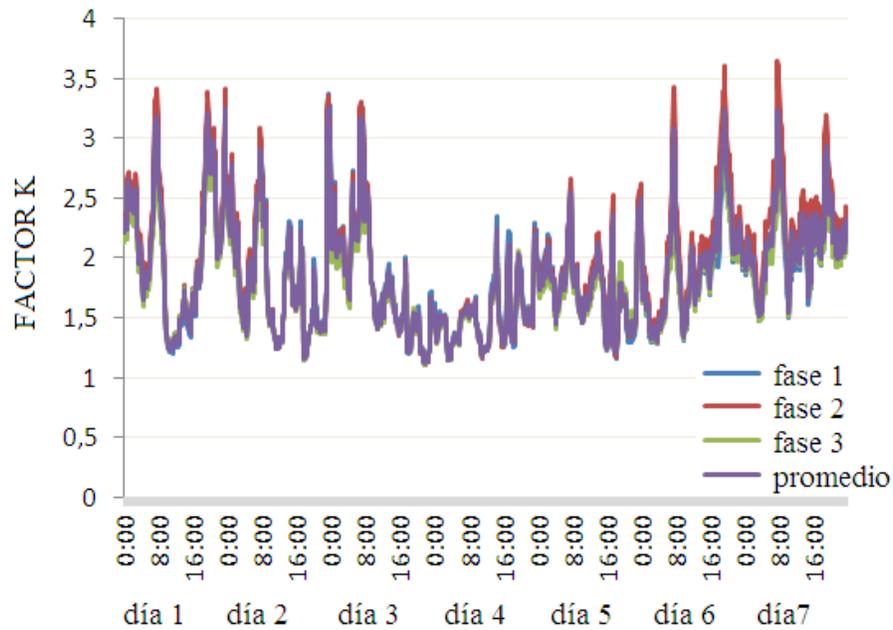
Utilizando la ecuación 12 se pueden obtener los siguientes resultados:

Cuando  $K=1$ ,  $THDi = 5,36\%$ , es decir, el transformador actual (y que tiene factor  $K$  igual a 1) es capaz de soportar un contenido de distorsión armónica total en corriente no superior a  $5,36\%$ . Sin embargo, de la tabla 2 se puede apreciar que los valores medio de  $THDi$  ( $12,54\%$ ) y mínimo de  $THDi$  ( $8,90\%$ ) son siempre mayores que el valor máximo que puede manejar este transformador de distribución. Ahora bien, si  $THDi=12,54\%$ , entonces  $K=2,14$ ; por tanto, y según lo indicado en la tabla 1, es recomendable reemplazar el transformador actual por otro de distribución con factor  $K$  igual a 4. Cuando  $K=4$ ,  $THDi=19,86\%$ , lo que significa que al alimentar la carga agrícola con un transformador de distribución de factor  $K$  igual a

4, es posible manejar un  $19,86\%$  de distorsión armónica total en corriente en la carga, valor superior a los valores medios y máximos de  $THDi$  de cada fase.

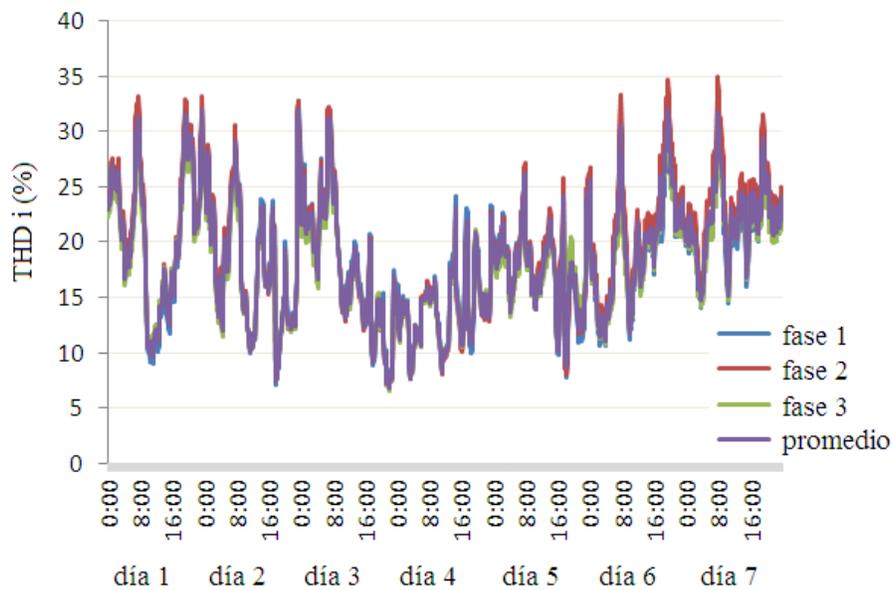
### Análisis de carga industrial minera

Para estudiar el transformador de distribución que alimenta la carga minera se registraron, cada diez minutos durante siete días consecutivos, las variables factor  $K$  y distorsión armónica total en corriente, usando un equipo analizador de calidad de energía. Los resultados de estos registros se pueden apreciar en las figuras 4 y 5. En la tabla 4 se presenta un resumen de los principales indicadores estadísticos por fase y promedio para el factor  $K$  y la distorsión armónica total en corriente.



**Figura 4.** Factor  $K$  en transformador que alimenta carga industrial minera

Fuente: elaboración propia.



**Figura 5.**  $THDi$  en transformador que alimenta carga industrial minera

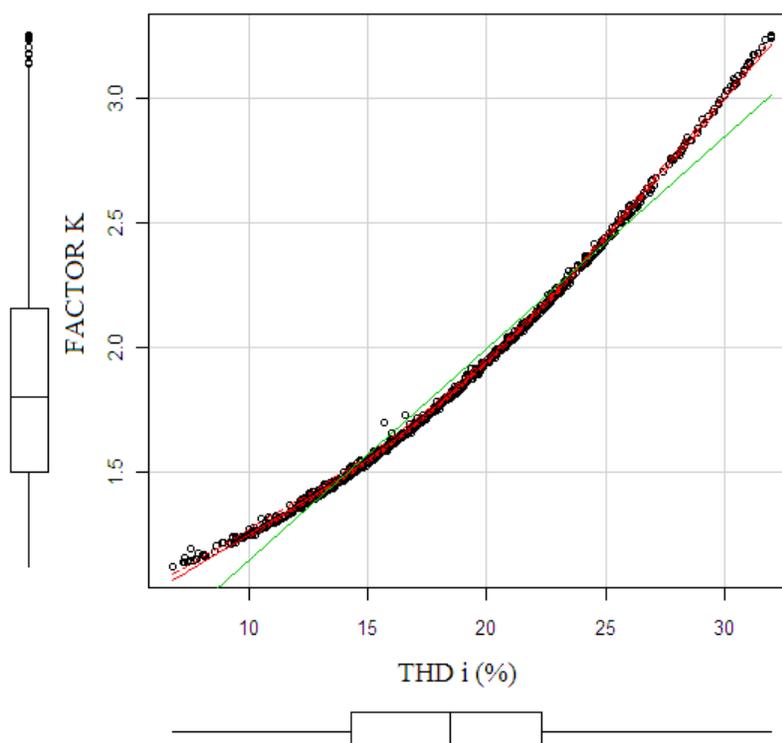
Fuente: elaboración propia.

**Tabla 4.** Estadísticas descriptivas para la muestra de la carga minera

Variable	Media	Desviación estándar (DE)	Error estándar de la media (EEM)	Máximo	Mínimo
<i>THDi</i> fase 1 (%)	18,47	5,470	0,1723	32,80	7,10
<i>THDi</i> fase 2 (%)	19,10	5,907	0,1861	34,90	6,70
<i>THDi</i> fase 3 (%)	18,01	4,960	0,1562	30,50	6,60
Factor <i>K</i> fase 1	1,87	0,470	0,0148	3,37	1,13
Factor <i>K</i> fase 2	1,93	0,523	0,0165	3,65	1,11
Factor <i>K</i> fase 3	1,81	0,411	0,0130	3,04	1,11
<i>THDi</i> promedio (%)	18,53	5,446	0,1715	32,73	6,80
Factor <i>K</i> promedio	1,87	0,468	0,0147	3,35	1,12

**Fuente:** elaboración propia.

La figura 6 muestra la dispersión de las variables factor *K* vs. *THDi* y la tabla 5 describe el desempeño de cada modelo de regresión.



**Figura 6.** Gráfico de dispersión del factor *K* vs. *THDi* en la carga industrial minera

**Fuente:** elaboración propia.

**Tabla 5.** Ajuste de modelos de regresión para la carga minera

Modelo	R <sup>2</sup>	AIC
Regresión lineal simple $K = 0,2948 + 0,0849 \times THDi$	0,978	-2542,3
Regresión polinomial de orden 2 $K = 0,9463 + 0,0107 \times THDi + 0,0019 \times THDi^2$	0,999	-6297,6
Regresión polinomial de orden 3 $K = 1,028 - 0,0037 \times THDi + 0,0027 \times THDi^2 - 0,000014 \times THDi^3$	0,999	-6385,6

**Fuente:** elaboración propia.

De la tabla 5, se puede apreciar que el mayor valor de  $R^2$  y el menor valor del AIC se obtienen con el modelo polinomial de orden 3. Sin embargo, estos indicadores son muy similares en el modelo polinomial de orden 2. Por consiguiente, por su rendimiento y simplicidad se elige este modelo como el más adecuado para estimar el valor del factor  $K$  a partir de la distorsión armónica total en corriente en la carga industrial minera. La ecuación 13 muestra el modelo polinomial de orden 2.

$$K = 0,9463 + 0,0107 \times THDi + 0,0019 \times THDi^2 \quad (13)$$

Utilizando la ecuación 13 se pueden obtener los siguientes resultados:

Cuando  $K=1$ ,  $THDi = 3,2 \%$ , es decir, el transformador actual (y que tiene factor  $K$  igual a 1) es capaz de soportar un contenido de distorsión armónica total en corriente no superior a  $3,2 \%$ . Sin embargo, de la tabla 4 se puede apreciar que los valores medio de  $THDi$  ( $18,53 \%$ ) y mínimo de  $THDi$  ( $6,80 \%$ ) son siempre mayores que el valor máximo que puede manejar este transformador de distribución. Ahora bien, si  $THDi=18,53\%$ , entonces  $K=1,80$ , por tanto, y según lo indicado en la tabla 1, es recomendable reemplazar el transformador actual por un transformador de distribución con factor  $K$  igual a 4. Cuando  $K=4$ ,  $THDi=37,4 \%$ , lo que significa que al alimentar la carga minera con un transformador de distribución de factor  $K$  igual a 4, es posible manejar un  $37,4 \%$  de

distorsión armónica total en corriente en la carga, valor superior a los valores medios y máximos de  $THDi$  de cada fase.

## CONCLUSIONES

En este artículo se mostró el uso de los modelos de regresión lineal como herramienta para estimar el valor de factor  $K$  en transformadores de distribución, a partir de la distorsión armónica total en corriente como variable independiente. Se probaron dos transformadores de distribución provenientes de la industria agrícola y minera. Ambos transformadores poseen factor  $K$  igual a 1. Se observó que los modelos polinomiales entregaron mejor rendimiento que el modelo de regresión lineal. Al estimar el factor  $K$  utilizando los modelos polinomiales se determinó que los transformadores estudiados no pueden soportar la distorsión armónica total en corriente de sus cargas actuales. El factor  $K$  adecuado para los transformadores estudiados debe ser 4. Este factor permite que los transformadores soporten la distorsión armónica total en corriente de sus respectivas cargas. Por último, se indica que el método mostrado en este estudio puede ser aplicado en empresas de distribución eléctrica que tengan instalados en sus alimentadores transformadores de distribución con factor  $K$  igual a 1, para evaluar el reemplazo de estos equipos y contribuir con la disminución de las pérdidas técnicas y la mejora en la calidad del suministro.

## FINANCIAMIENTO

Este trabajo fue financiado por el proyecto DIUDA 22275 de la Vicerrectoría de Investigación y Postgrado de la Universidad de Atacama Chile.

## REFERENCIAS

- Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19(6), 716-723.
- Arrillaga, J. y Watson N.R. (2003). *Power system harmonics*. Londres: John Wiley & Sons.
- Attia, H.A.; El-Metwally, M. y Fahmy O.M. (2010). Harmonic Distortion Effects and Mitigation in Distribution Systems. *Journal of American Science*, 6(10), 173-183.
- Daut, I.; Syafruddin, H.S.; Rosnazri, A.; Samila, M. y Haziah H. (2006). The Effects of Harmonic Components on Transformer Losses of Sinusoidal Source Supplying Non-Linear Loads. *American Journal of Applied Sciences*, 3(12), 2131-2133.
- Davudi, M.; Torabzad, S. y Ojaghi B. (2011). Analysis of Harmonics and Harmonic Mitigation Methods in Distribution Systems. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(11), 996-1005.
- Faiz, J.; Sharifian, M.B.B.; Fakheri, S.A. y Sabet-Marzooghi, E. (2004). Derating of distribution transformers for non-sinusoidal load currents using finite element method. *Iranian Journal of Science And Technology*, 28(3), 315-322.
- Gouda O., E.; Amer, G.M. y Salem, W.A.A. (2011). A Study of K-Factor Power Transformer Characteristics by Modeling Simulation. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 1(5), 114-120.
- IEEE. (1998). IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Non-sinusoidal Load Currents. IEEE Std C57.110-1998. <http://doi.org/10.1109/IEEESTD.1998.89206>
- Montgomery, D.; Peck E. y Vining, G. (2006). *Introducción al análisis de regresión lineal*. México: Limusa Wiley.
- R Development Core Team (2011). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Viena, Austria: The R Foundation for Statistical Computing. Recuperado de: <http://www.R-project.org/>
- Verma, M.K.; Kaushik, R.; Prabhakar, P. y Sengupta, M.K. (2014). Analysis of K-Rated Transformer to Make it Suitable to Handle The Harmonics Generated by Solid State Devices on The Load Side. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 4(9), 508-514.
- Yagci, M. y Ürkmez, A. (2011). The effects of linear and non-linear load on three-phase transformers supplied from different sources. *Scientific Research and Essays*, 6(26), 5513-5522.





## Una prueba fuera del laboratorio de una interfaz cerebro computador basada en potenciales de estado estable evocados visualmente

### Steady state visually evoked potentials based Brain computer interface test outside the lab

Eduardo Francisco Caicedo Bravo<sup>1</sup>, Jaiber Evelio Cardona Aristizábal<sup>2</sup>

**Fecha de recepción:** 17 de marzo de 2015

**Fecha de aceptación:** 15 de febrero de 2016

**Cómo citar:** Caicedo Bravo, E. F., & Cardona Aristizábal, J. E. (2016). Una prueba fuera del laboratorio de una interfaz cerebro computador basada en potenciales de estado estable evocados visualmente. *Revista Tecnura*, 20(48), 41-52. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.2.a03

#### Resumen

**Contexto:** Los potenciales de estado estable evocados visualmente (SSVEP) surgen como una de las señales medidas del cerebro más promisorias para la implementación de interfaces cerebro computador (BCI), sin embargo las aplicaciones realizadas generalmente son limitadas a ambientes restringidos de laboratorio presentando mínimas pruebas en ambientes donde las condiciones son exigentes.

**Método:** Se implementó un sistema BCI basado en SSVEP cuyas pruebas se realizaron en un ambiente no controlado con altos niveles de distracción y con la presencia de gran cantidad de público. Al usuario se le propone un laberinto donde un avatar debe ser llevado a un objetivo representado por una casa. Para mover el avatar el voluntario debe fijar su mirada en uno de los cuatro estímulos visuales, los estímulos visuales representan las cuatro direcciones: izquierda, arriba, derecha y abajo. El sistema fue usado sin ningún tipo de calibración.

**Resultados:** 32 voluntarios usaron el sistema y 20 lograron el objetivo con una precisión mayor al 60%,

incluyendo 9 con una precisión del 100%, 7 lograron el objetivo con una precisión menor al 60% y 5 se retiraron antes de conseguir el objetivo. Para los voluntarios que lograron una precisión mayor al 60% se alcanzó en promedio un tiempo de detección de 6,4s, una precisión de 79% y una razón de transferencia de información (ITR) de 8,78bits/s.

**Conclusiones:** Se pudo mostrar un sistema BCI basado en SSVEP de bajo costo, probado en un evento público, sin procedimientos de calibración, de fácil instalación y usado por personas en un amplio rango de edades. Los resultados muestran que es factible llevar este tipo de sistemas a ambientes fuera del laboratorio.

**Palabras clave:** BCI, Combinación de Mínima Energía, Interfaz cerebro computador, MEC, potenciales de estado estable evocados visualmente, SSVEP.

#### Abstract

**Context:** Steady State Visually Evoked Potentials (SSVEP) are brain signals which are one of the most promising signals for Brain Computer Interfaces (BCIs)

- 1 Ingeniero Electricista, Máster en Tecnologías de la Información en Fabricación, Doctor en Ingeniería: Informática Industrial. Profesor Titular de la Universidad del Valle, Director del Grupo de Investigación Percepción y Sistemas Inteligentes. Cali, Colombia. Contacto: [eduardo.caicedo@correounivalle.edu.co](mailto:eduardo.caicedo@correounivalle.edu.co)
- 2 Ingeniero Electrónico, Magister en Automática, Estudiante de Doctorado en Ingeniería. Profesor Asociado de la Universidad del Quindío. Armenia, Colombia. Contacto: [jaibercardona@uniquindio.edu.co](mailto:jaibercardona@uniquindio.edu.co)

implementation, however, SSVEP based BCI generally are proven in a controlled environment and there are a few tests in demanding conditions.

**Method:** We present a SSVEP based BCI system that was used outside the lab in a noisy environment with distractions, and with the presence of public. For the tests, we showed a maze in a laptop where the user could move an avatar looking for a target that is represented by a house. In order to move the avatar, the volunteer must stare at one of the four visual stimuli; the four visual stimuli represent the four directions: right, up, left, and down. The system is proven without any calibration procedure.

**Results:** 32 volunteers utilized the system and 20 achieved the target with an accuracy above 60%, including 9 with an accuracy of 100%, 7 achieved

the target with an accuracy below 60% and 5 left without achieving the goal. For the volunteers who reached accuracy above 60%, the results of the performance achieved an average of 6,4s for command detections, precision of 79% and information transfer rate (ITR) of 8,78 bits/s.

**Conclusions:** We showed a SSVEP based BCI system with low cost, it was proved in a public event, it did not have calibration procedures, it was easy to install, and it was used for people in a wide age range. The results show that it is possible to bring this kind of systems to environments outside the laboratory.

**Keywords:** BCI, Brain Computer Interface, MEC, Minimum Energy Combination, SSVEP, Steady State Visually Evoked Potentials,

---

## INTRODUCCIÓN

Un sistema BCI permite realizar comunicación desde el cerebro hacia un sistema digital sin el uso de los canales normales de salida como los nervios periféricos y los músculos (Wolpaw *et al.*, 2000). Esto tiene aplicaciones directas en la recuperación de autonomía de personas con pérdida severa de la movilidad al darles acceso a interactuar con el mundo en temas como comunicación y control, entretenimiento, sustitución motora y recuperación motora (Millán *et al.*, 2010). Además de las aplicaciones para personas con limitaciones en su movilidad, también aparecen aplicaciones para personas sanas sobre todo en juegos, multimedia y realidad virtual (Allison, Graimann y Gräser, 2007). Uno de los BCI más promisorios es el basado en señales SSVEP debido a la fácil configuración, tiempo de calibración bajo o nulo, y alta velocidad en comparación con los basados en otro tipo de señales (Rak, Kołodziej y Majkowski, 2012), además son menos susceptibles al ruido electromiográfico y a los artefactos producidos por los movimientos oculares y de los párpados (Francois, Monique, Dauwels y Cichocki, 2010)

debido a que dichos artefactos se producen en zonas del cerebro diferentes a las usadas para detectar SSVEP.

En un sistema BCI basado en SSVEP se muestra un estímulo visual que varía a una frecuencia fija y que genera un aumento de la actividad a dicha frecuencia en la parte occipital del cerebro cuando el usuario concentra su mirada en el estímulo, por tanto se puede detectar si el usuario presta o no atención al estímulo al medir la actividad en la frecuencia correspondiente. Con este esquema se pueden tener varios estímulos visuales que oscilan a diferentes frecuencias, cada uno correspondiendo a un comando distinto, y el usuario puede poner su atención el estímulo acorde al comando que quiere seleccionar, cuando en la parte occipital del cerebro se detecta un aumento en alguna de las frecuencias de los estímulos presentes entonces se puede inferir que el usuario quiere ejecutar el comando correspondiente. Las señales SSVEP también son estables en su fase por lo que se puede usar una sola frecuencia en los estímulos pero con diferente fase, al usuario mirar un estímulo se da un aumento en la frecuencia definida y el comando se determina al calcular la fase.

Los BCI basados en SSVEP se aplican en temas como movimiento de sillas de ruedas (Singla, Khosla y Jha, 2013; Singla y Haseena, 2013; Torres, Freire y Sarcinelli, 2013; Díez *et al.*, 2013), teclados numéricos (Cheng, Gao, Gao y Dingfeng, 2002), teclados alfanuméricos (Hwang *et al.*, 2012; Hwang, Lim, Lee e Im, 2013), posicionamiento de una cama de hospital (Shyu *et al.*, 2013), movimiento de prótesis (Müller y Pfurtscheller, 2008), movimiento en laberintos (Martinez, Bakardjian y Cichock, 2007; Díez *et al.*, 2011), control de una casa inteligente (Edlinger y Guger, 2012), control de robots (Hortal, Úbeda, Iáñez y Azorín, 2014; Zhang *et al.*, 2012; Iáñez *et al.*, 2010), detección de sueño en conductores (Resalat, Saba y Afdideh, 2012), juegos de defensa (Vliet *et al.*, 2012), e incluso propuestas para la comunicación de personas con limitación severa del movimiento incluyendo los ojos y parpados (Lim, Hwang e Im, 2013; Nishifuji y Kuroda, 2012). Sin embargo, la mayoría de los desarrollos se han probado en ambientes muy restringidos y controlados, y se han limitado a aplicaciones de laboratorio en donde las condiciones de iluminación, perturbaciones a las personas y ruido electrónico son controladas.

Algunos sistemas BCI basados en SSVEP se han probado en ambientes menos controlados; por ejemplo, se combina el uso de SSVEP con desincronización relacionada a eventos (ERD) para el comando de un carro (Castillo *et al.*, 2014), para escribir palabras (Allison *et al.*, 2010) y para comandar un robot miniatura en un laberinto (Volosyak *et al.*, 2011).

En este trabajo se prueba un sistema BCI basado en SSVEP con ensayos fuera del laboratorio. Dichas pruebas fueron realizadas en un espacio abierto con gran movimiento alrededor de la persona bajo estudio, en donde se expuso el sistema y se dio libre acceso a los voluntarios que quisieran probarlo; en total lo probaron 32 personas.

El sistema presenta un laberinto en el cual se debe llevar un avatar a un objetivo indicado con una casa, para ello se presentan cuatro estímulos visuales oscilando a diferentes frecuencias

correspondientes a los comandos izquierda, arriba, derecha y abajo que son los movimientos que puede realizar el avatar. Para detectar el estímulo visual al que presta atención, el usuario se calcula la actividad en cada una de las frecuencias a través del método denominado combinación de mínima energía (MEC, por su sigla en inglés) (Friman, Volosyak y Gräser, 2007), cuando se establece que la actividad ha aumentado se realiza el movimiento correspondiente.

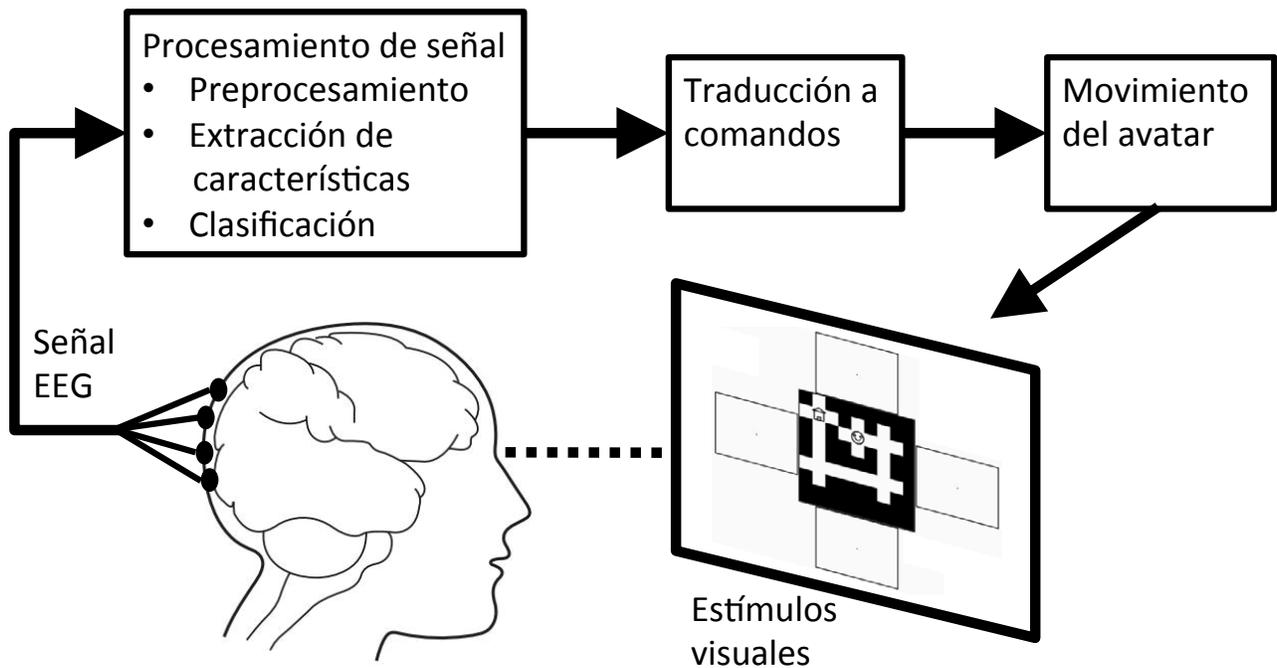
Este artículo se desarrolla de la siguiente manera: primero se hace una descripción del *software*, *hardware* y los métodos aplicados, luego se presentan los resultados encontrados y, por último, se plantean las conclusiones generadas.

## METODOLOGÍA

El sistema completo en sus partes genéricas se observa en la figura 1, en la pantalla del computador se muestra en el centro un laberinto y cuatro estímulos visuales distribuidos en cada extremo del laberinto. El usuario debe fijar su mirada en el estímulo visual que está en la dirección a la cual quiere desplazarse dentro del laberinto; con la intención de detectar si el usuario está prestando atención a algún estímulo visual se toman las señales de electroencefalograma (EEG) en la parte occipital del cerebro, dichas señales son enviadas al computador y procesadas, y una vez determinado un estímulo visual observado se realiza una traducción a comandos y el correspondiente movimiento del avatar. Este ciclo se repite hasta terminar el juego.

## Hardware

Para medir la actividad cerebral se usa un equipo Emotiv Epoc lector de ondas EEG el cual mide 14 puntos del cuero cabelludo de forma no invasiva, mediante electrodos que no requieren gel, aunque el uso de este tipo de electrodos genera un alto nivel de ruido eléctrico, permite una fácil puesta en marcha del experimento al requerir poco tiempo



**Figura 1.** Esquema general del sistema

**Fuente:** elaboración propia.

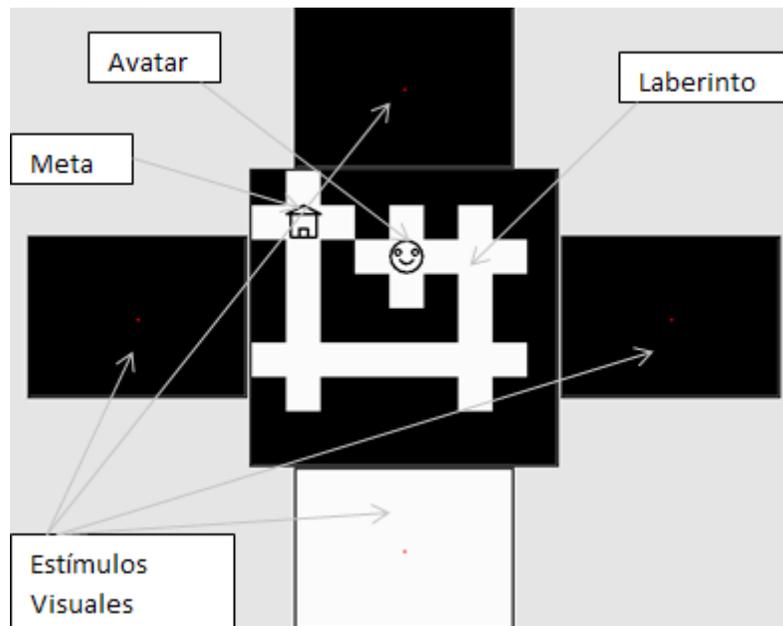
para ser colocado adecuadamente en la cabeza. De los 14 electrodos solo 4 están en la parte occipital del cerebro por lo que se opta por rotar 180 grados en sentido horizontal el Emotiv Epoc, con lo cual se incrementa a 8 el número de electrodos aptos para determinar el aumento de la actividad en la parte occipital del cerebro. Aunque el número de electrodos usados para el procesamiento crece, se encuentra como desventaja que no se puede conocer la posición exacta de estos.

Los datos de los electrodos son enviados de forma inalámbrica a un computador con monitor de 14 pulgadas con 1280×800 pixeles, 2 Gbytes de RAM, procesador de 1,83 Ghz Intel Core 2 y Windows Vista como sistema operativo, el cual procesa los datos de las señales medidas de los electrodos y realiza una estimación, por medio del cálculo del MEC, sobre el estímulo visual que el usuario está observando. Asimismo, el computador muestra el laberinto y los estímulos visuales.

## Software

El juego implementado consta de dos laberintos, un laberinto inicial que es igual en su configuración para todos los participantes, contando con un solo camino correcto para llegar al objetivo, y un laberinto libre en el que la posición del avatar y el objetivo se colocan de manera aleatoria y se tienen varias posibilidades para llegar al objetivo; el desplazamiento del avatar siempre se hace desde la posición presente hasta el siguiente cruce.

Para este trabajo se usaron solamente los datos relacionados al laberinto inicial debido a que se tiene claro cuál es el movimiento pretendido por el jugador lo que a su vez permite calcular la precisión. En el laberinto inicial (figura 2), se puede notar que se requieren los movimientos en el orden: derecha, abajo, izquierda y arriba para llegar al objetivo, de igual manera se muestran los cuatro estímulos visuales usados para cada uno de los movimientos.



**Figura 2.** Laberinto inicial

**Fuente:** elaboración propia.

El laberinto está establecido de forma que en cada uno de los cruces del camino correcto existe la posibilidad de entrar en un callejón sin salida al detectar el movimiento incorrecto, en ese caso el usuario debe ejecutar el comando contrario para volver al camino principal. Aunque solo habría un movimiento posible se siguen mostrando los cuatro estímulos visuales e igualmente se realiza la detección sobre ellos; si se detecta un comando en una dirección hacia la que no hay camino no se realiza movimiento.

Cada estímulo visual consiste en rectángulos de  $200 \times 100$  píxeles que cambian entre blanco y negro, cada color se mantiene un número exacto de ciclos de refresco del monitor, por lo que las frecuencias obtenidas son divisores exactos de 60 Hz, que es la frecuencia del monitor, se utilizan entonces 4, 5, 6 y 7 ciclos, generando las frecuencias 15 Hz, 12 Hz, 10 Hz y 8,57 Hz respectivamente; en cada estímulo visual está presente un punto rojo en el centro para enfocar la mirada. Al tomar los datos EEG de la parte occipital del cerebro, se puede inferir el estímulo visual al cual el usuario

está mirando al realizar el cálculo del MEC que se muestra en el siguiente apartado.

### Combinación de mínima energía (MEC)

Cada  $t_d$  segundos se toman los datos medidos en los electrodos correspondientes a los últimos  $t_{MEC}$  segundos; para cada electrodo se resta el promedio de los datos y se divide por la desviación estándar, para tener una media 0 y una varianza igual a 1 en cada canal. Para determinar si se está fijando la mirada a un estímulo  $y$ , en caso tal, a que estímulo corresponde, los datos en los electrodos de interés son transformados de acuerdo con el procedimiento denominado *combinación de mínima energía* (Friman, Volosyuk y Gräser, 2007), el cual se describe a continuación.

Si un estímulo visual de frecuencia  $f$  al cual el voluntario le está prestando atención, afecta la señal en un electrodo  $i$ , entonces la actividad en dicho electrodo puede escribirse como en la ecuación (1).

$$y_i(t) = \sum_{k=1}^{N_h} a_{i,k} \sin(2\pi ft + \phi_{i,k}) + \sum_j b_{i,j} z_j(t) + e_i(t) \quad (1)$$

Donde  $y_i(t)$  es la señal en el electrodo  $i$ , siendo igual a una expresión dividida en tres partes; la primera parte corresponde a las señales evocadas por el estímulo, donde:  $N_h$  es el número de múltiplos de la frecuencia de interés presentes,  $a_{i,k}$  es la magnitud del múltiplo  $k$  del electrodo  $i$ , y  $\phi_{i,k}$  es la fase del múltiplo  $k$  del electrodo  $i$ . La segunda componente,  $Z_j(t)$ , hace referencia a estados mentales diferentes que afectan varios electrodos, donde  $b_{i,j}$  es la magnitud de la señal  $Z_j(t)$  en el electrodo  $i$ . Y la tercera componente corresponde al ruido propio del electrodo  $i$ , marcado como  $e_i(t)$ .

Si se tiene una frecuencia de muestreo  $F_s$  y se cuenta con  $N_t$  muestras sucesivas, se puede relacionar la salida del electrodo  $i$  como muestra la ecuación (2).

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{X}\mathbf{a}_i + \mathbf{Z}\mathbf{b}_i + \mathbf{e}_i \quad (2)$$

Donde la salida del electrodo  $i$  corresponde a un vector de  $N_t$  muestras sucesivas y tamaño  $N_t \times 1$ , que cumple  $\mathbf{y}_i = [y_i(1), \dots, y_i(N_t)]^T$ . La matriz  $\mathbf{X} = [\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_{N_h}]$  es de dimensión  $N_t \times 2N_h$  y contiene las componentes seno y coseno de la frecuencia de interés y sus múltiplos, donde cada submatriz  $\mathbf{X}_k$  es una matriz con dos columnas y  $N_t$  filas, conteniendo en cada columna las componentes  $\cos(2\pi kft)$  y  $\sin(2\pi kft)$ .  $\mathbf{a}_i$  es un vector de tamaño  $2N_h$ , con las amplitudes de cada componente de la frecuencia y sus múltiplos.  $\mathbf{Z}$  es una matriz que contiene estados mentales comunes a todos los electrodos y  $\mathbf{b}_i$  sus correspondientes amplitudes, y  $\mathbf{e}_i$  es un vector que posee el ruido propio del electrodo  $i$ .

Al reunir  $N_y$  electrodos, la señal obtenida en estos se puede ver de forma compacta como muestra la ecuación (3).

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}\mathbf{A} + \mathbf{Z}\mathbf{B} + \mathbf{E} \quad (3)$$

Cada columna de la señal  $\mathbf{Y} = [y_1, \dots, y_{N_y}]^T$  contiene las muestras de un electrodo, la matriz  $\mathbf{A}$

contiene las amplitudes de las componentes sinusoidales de la frecuencia de interés y sus múltiplos,  $\mathbf{B}$  contiene las amplitudes de estados mentales comunes a los electrodos y  $\mathbf{E}$  en cada columna contiene ruido propio del correspondiente electrodo.

La combinación de mínima energía pretende encontrar una transformación que disminuya la energía de las señales adicionales a las SSVEP; si la transformación conserva las señales SSVEP quiere decir que estas están presentes, de lo contrario no lo están. Para encontrar la transformación primero se remueven las componentes SSVEP de la señal, para lo cual se obtiene la proyección ortogonal de las señales sinusoidales de la frecuencia de interés y sus múltiplos en los datos originales y se les resta a estos últimos, de acuerdo con la ecuación (4).

$$\tilde{\mathbf{Y}} = \mathbf{Y} - \mathbf{X}(\mathbf{X}^T\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}^T\mathbf{Y} \quad (4)$$

Al quitar las componentes SSVEP, la señal modificada aproximadamente contendrá solamente los valores debidos a otros estados mentales y al ruido propio de cada canal, como muestra la ecuación (5).

$$\tilde{\mathbf{Y}} \approx \mathbf{Z}\mathbf{B} + \mathbf{E} \quad (5)$$

Una vez las componentes SSVEP son removidas, se debe encontrar un vector de transformación  $w$ , de magnitud unitaria, que disminuya la energía de la señal resultante  $\tilde{\mathbf{Y}}w$ , es decir se debe resolver el problema de optimización dado por la ecuación (6).

$$\min_w \|\tilde{\mathbf{Y}}w\|^2 = \min_w w^T \tilde{\mathbf{Y}}^T \tilde{\mathbf{Y}} w \quad (6)$$

Para encontrar el valor de  $w$  se usa la matriz simétrica  $\tilde{\mathbf{Y}}^T \tilde{\mathbf{Y}}$ , a la cual se le calculan los valores propios en cuyos valores se encuentran los límites máximo y mínimo del lado derecho de la ecuación (6). Dado que la matriz  $\tilde{\mathbf{Y}}^T \tilde{\mathbf{Y}}$  es simétrica, entonces los vectores propios generaran canales no correlacionados al ser vectores ortogonales.

Los valores propios contienen el valor de energía que se conserva con la transformación de su vector propio equivalente, entonces el vector propio correspondiente al menor valor propio es la solución a la ecuación 6; sin embargo, se toman los valores propios que en total conserven un poco más del 10 % de la energía total (Friman, Volosyak y Gräser, 2007). Si los valores propios son ordenados de menor a mayor de la forma  $\lambda_i \leq \lambda_{i+1}$ , entonces se debe encontrar el mínimo  $N_s$  que cumpla la ecuación (7).

$$\frac{\sum_{i=1}^{N_s} \lambda_i}{\sum_{j=1}^{N_y} \lambda_j} > 0,1 \quad (7)$$

Con los menores valores propios escogidos y sus respectivos vectores propios, se encuentra la transformación  $\mathbf{W} = [w_1, \dots, w_{N_s}]$ , la cual genera los canales  $\mathbf{S} = [s_1, \dots, s_{N_s}]$ , sin embargo la transformación es aplicada a la señal original, como muestra la ecuación (8).

$$\mathbf{S} = \mathbf{W}\mathbf{Y} \quad (8)$$

Para establecer la presencia de las señales SSVEP se usa un promedio de la relación entre la potencia de la señal SSVEP con respecto a la potencia de las demás señales, este promedio es calculado para cada múltiplo de la frecuencia y para cada canal después de aplicar la transformación, como lo muestra la ecuación (9).

$$T = \frac{1}{N_s N_h} \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{k=1}^{N_h} \frac{P_{k,i}}{\sigma_{k,i}^2} \quad (9)$$

En la frecuencia de interés, para el múltiplo  $k$ , la potencia puede ser calculada como se muestra en la ecuación (10).

$$P_{k,i} = \left\| X_k^T s_i \right\| \quad (10)$$

El cálculo de la potencia sobre las frecuencias restantes se hace mediante un modelo  $AR(p)$ , el cual se determina sobre los canales resultado de la transformación, pero restando las componentes

SSVEP, es decir sobre los canales modificados según la ecuación (11).

$$\tilde{\mathbf{S}} = \mathbf{S} - \mathbf{X}(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{S} = \tilde{\mathbf{Y}}\mathbf{W} \quad (11)$$

Para ajustar el modelo  $AR(p)$  se calcula la autocovarianza de cada canal mediante el teorema de Wiener-Khinchin y se procede a resolver la ecuación de Yule-Walker. De esta forma se encuentran la varianza del ruido blanco  $\sigma^2$  y los parámetros  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p$  del modelo  $AR(p)$ .

La potencia de las otras frecuencias para el armónico  $k$  se establece entonces con el modelo  $AR(p)$  ajustado al canal  $\mathbf{S}_i$  teniendo en cuenta los parámetros según la ecuación (12).

$$\sigma_{k,i}^2 = \frac{\pi N_t}{4} \frac{\sigma^2}{\left| 1 + \sum_{j=1}^p \alpha_j \exp\left(-\frac{2\pi i j k f}{F_s}\right) \right|^2} \quad (12)$$

Donde  $i$  es igual al valor complejo  $\sqrt{-1}$ .

El valor de  $T$  dado por la ecuación 9 es calculado para todas las frecuencias; cuando alguno de los valores de  $T$  supera un umbral preestablecido es porque la frecuencia relacionada tiene una alta potencia en comparación con las otras, por consiguiente, el usuario estaría mirando el estímulo respectivo.

## Método

En un espacio abierto se expuso el sistema y se invitó a algunos voluntarios para que lo probaran, en total fueron 32 personas, 5 mujeres y 27 hombres, cuyo rango de edad está entre 18 y 53 años, con edad promedio 28,1 y desviación estándar 10,64, que firmaron el consentimiento para participar en la investigación. A cada uno de los voluntarios se les puso el Emotiv EPOC en la cabeza, rotado 180 grados de su posición normal para contar con 8 electrodos en la parte occipital del cerebro y se revisó que los electrodos presentaran una buena señal. Se les explicó a los voluntarios la forma de mover el avatar en el laberinto. Luego, se daba

inicio al *software* y se grababan los datos. Todos empezaron con el laberinto inicial y, una vez realizado, se pasaba al laberinto libre. Se permitió que los voluntarios manejaran el sistema hasta que decidieran retirarse.

Para todos los voluntarios se usó un  $t_{MEC}$  de 3 segundos, un  $t_d$  de 0,25 segundos y un umbral de 4; asimismo se usaron las frecuencias 15 Hz, 12 Hz, 10 Hz y 8,57 Hz para los estímulos correspondientes a los comandos izquierda, arriba, derecha y abajo respectivamente. El valor MEC era calculado tomando los 8 electrodos ubicados en la parte occipital de la cabeza; cuando dicho valor superaba el umbral al menos dos veces en los últimos 4 cálculos, se establecía como seleccionada la frecuencia correspondiente. Una vez detectado el estímulo se esperaban 3 segundos para la recolección de datos antes de realizar un nuevo cálculo.

Todos los parámetros se mantuvieron fijos usando valores establecidos a partir de pruebas previas al evento y no se cambiaron para ninguno de los voluntarios, es decir no se tuvo proceso de calibración sino que se pasó directamente al juego.

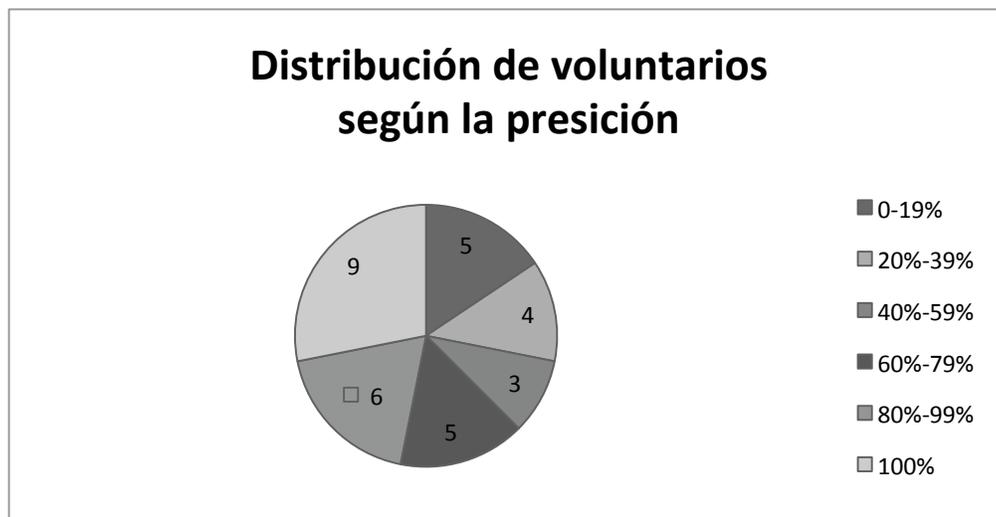
## RESULTADOS

De los 32 voluntarios, 5 se retiraron antes de terminar el laberinto inicial, en contraposición a 9 que lograron una exactitud del 100 %, en la figura 3 se muestra la distribución de los 32 voluntarios según el rango de precisión.

En la figura 3 se puede observar también que 62,5 % de los voluntarios lograron una precisión mayor al 60 %, sin realizar ningún proceso de calibración, para estos 20 participantes la precisión promedio fue de 79 %.

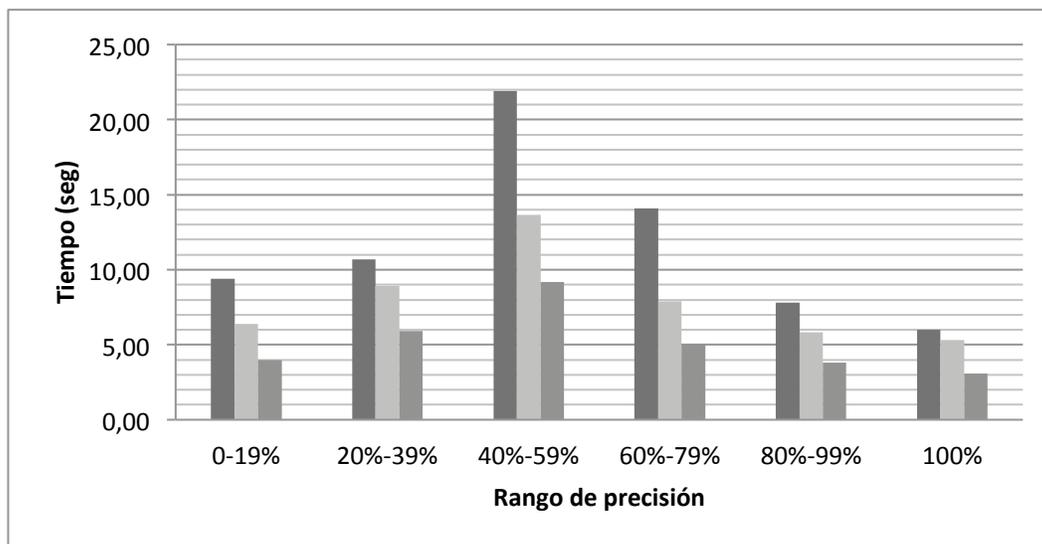
En la figura 4 se muestra el tiempo máximo, promedio y mínimo alcanzado para la detección de un comando de los voluntarios agrupados según los rangos de precisión.

Se puede notar que para el rango entre 40 % y 100 % el tiempo necesario para detectar un comando aumenta a medida que baja la precisión, posiblemente por la dificultad para producir las señales SSVEP; para una precisión menor a 40 %, el tiempo de detección disminuye nuevamente, sin embargo se debe tener en cuenta que se detectan en un menor tiempo pero con un mayor número de errores.



**Figura 3.** Distribución de voluntarios según el rango de precisión

**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 4** Tiempo máximo, promedio y mínimo de detección de comando según rangos de precisión

**Fuente:** elaboración propia.

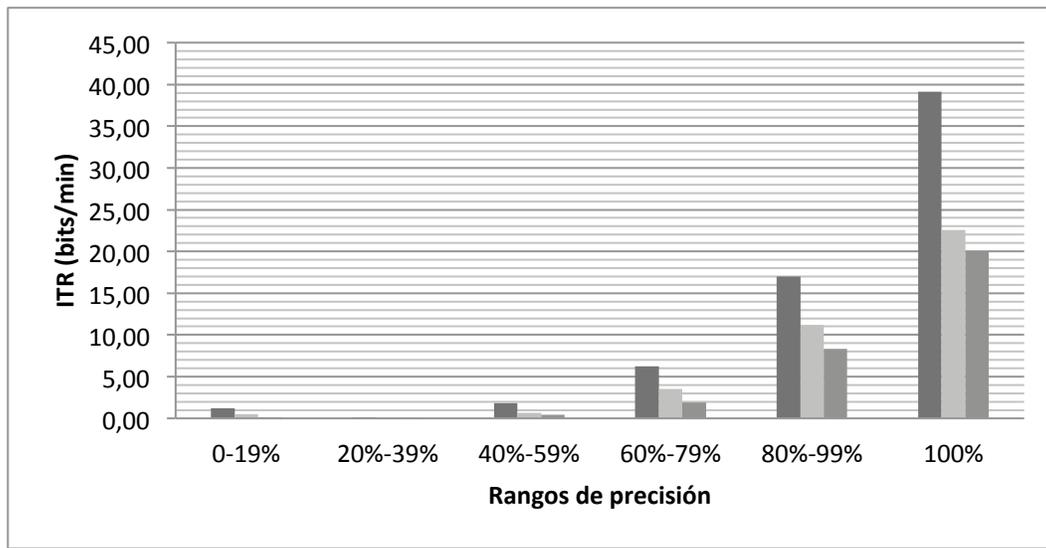
La razón de transferencia de información alcanzada (ITR, por su sigla en inglés) en sus valores máximo, promedio y mínimo, para los voluntarios agrupados según el rango de precisión se muestra en la figura 5. Se puede notar una reducción drástica en el ITR a medida que baja la precisión; esto era de esperarse considerando el aumento en el tiempo necesario para detectar un comando y la disminución en la precisión, se nota también una caída notable menor a 2 bits/min para precisiones menores a 60 %. Agrupando los voluntarios con precisión entre 60 % y 100 % se logró un ITR de 8,78 bits/min.

El voluntario de mejor desempeño, con una precisión de 100 %, logró un tiempo de detección de 3,068 segundos y un ITR de 39,1 bits/min.

Para los 20 participantes de mejor desempeño, que tuvieron una precisión entre 60 % y 100 %, se alcanzaron los valores promedio de precisión de 79 %, un tiempo de detección de comando de 6,4 segundos y una ITR de 8,78 bits/segundo. Para estos 20 voluntarios se muestra la matriz de confusión en la tabla 1 para las 4 frecuencias; esta tabla relaciona el número de veces que se tiene un valor esperado y el respectivo valor detectado.

Al ser un ambiente no controlado, los usuarios realizaban movimientos principalmente de cabeza, pies y manos, a pesar del requerimiento de tratar de no hacerlos; esto puede estar relacionado con que la mayor parte de las detecciones falsas se encuentra en 10 Hz seguida de 12 Hz. Estas dos frecuencias están asociadas a los movimientos y cambian su potencia ante la presencia de estos. Asimismo se nota que el valor esperado contra el obtenido de 12 Hz y 10 Hz tienen la mayor precisión con un 86,6 % y 84,3 %, respectivamente, seguidos de lejos por 8,57 Hz y 15 Hz con 75 % y 71,8 %, respectivamente. Esto podría mostrar la conveniencia de escoger frecuencias cercanas a los 12 Hz y 10 Hz para implementar BCI basados en SSVEP, sin embargo se requiere de más estudios para poder corroborarlo.

Se puede notar en la matriz de confusión que para los valores esperados de 12 Hz y 10 Hz solo se presenta error en los valores vecinos, 15 Hz y 10 Hz para 12 Hz, y 12 Hz y 8.57 Hz para 10 Hz; se necesitan más estudios para determinar si dicha tendencia es generalizada o fue un caso particular de esta prueba.



**Figura 5.** ITR máximo, promedio y mínimo según rangos de precisión

**Fuente:** elaboración propia.

**Tabla 1.** Matriz de confusión para las frecuencias de los estímulos visuales

		Detectado			
		15hz	12hz	10hz	8,57hz
Esperado	15hz	23	2	7	0
	12hz	2	26	2	0
	10hz	0	2	27	3
	8,57hz	4	3	1	24

**Fuente:** elaboración propia.

## CONCLUSIONES

Una vez realizada la prueba fuera del laboratorio se pudo comprobar que el sistema BCI basado en SSVEP implementado puede ser usado por personas saludables en un rango amplio de edades, entre 18 y 53 años, donde el 84 % lograron el objetivo del juego sin realizar ningún tipo de calibración. Los resultados podrían mejorar al incluir procedimientos para escoger las frecuencias y umbrales que mejor se ajusten a cada uno de los usuarios.

Se pudo comprobar la viabilidad de interactuar con el computador al enviar comandos

interpretados directamente desde la actividad cerebral sin requerir ningún otro método de entrada durante la ejecución del juego, logrando el objetivo sin la intervención de controles convencionales.

El sistema implementado plantea la posibilidad de realizar aplicaciones BCI con lectores de ondas EEG de bajo costo y de fácil instalación al contar con electrodos sin gel. Se pudo comprobar que se pueden obtener buenos resultados a pesar del ruido que aumenta en este tipo de dispositivos.

Las pruebas realizadas en este trabajo fueron llevadas a cabo fuera del laboratorio durante un evento público; las condiciones eran desafiantes por el corto tiempo disponible para las pruebas,

las variaciones de iluminación, el ruido circundante y las distracciones. A pesar de las condiciones adversas se logró un buen desempeño para la mayoría de los participantes.

El sistema planteado usa el total de 8 electrodos, una de las mejoras que se puede aplicar al sistema es reducir el número de electrodos usados para el procesamiento al buscar las combinaciones de mejor desempeño. Otras mejoras posibles incluyen rápidos procedimientos de calibración basados en comparar la señal con estímulo ausente y con estímulo presente, buscar las mejores frecuencias y umbrales de forma previa o de forma automática, y probar con diferentes metodologías que permitan aumentar la precisión y el tiempo de detección. Dado que el procedimiento básico aquí planteado funciona parcialmente, es prometedor el desempeño que se puede obtener al implementar diferentes mejoras.

## FINANCIAMIENTO

El artículo fue un resultado derivado del proyecto de investigación "Plataforma robótica para la movilidad asistida de personas con discapacidad", que fue avalado y financiado por la Universidad del Valle.

## REFERENCIAS

- Allison, B.; Graimann, B. y Gräser, A. (13-15 de junio de 2007). *Why Use A BCI If You Are Healthy? BRAINPLAY 07*. Brain-Computer Interfaces and Games Workshop at ACE (Advances in Computer Entertainment), 1-5. Salzburgo, Austria.
- Cheng, M.; Gao, X.; Gao, S. y Dingfeng, X. (octubre de 2002). Design and Implementation of a Brain-Computer Interface with High Transfer Rates. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 49(10), 1181-1186.
- Diez, P.F.; Mut, V.A.; Avila P., E. y Laciari L., E. (14 de julio de 2011). Asynchronous BCI control using high-frequency SSVEP. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 8(39), 1-8.
- Edlinger, G. y Guger, C. (1-4 de julio de 2012). *A Hybrid Brain-Computer Interface for Improving the Usability of a Smart Home Control*. Proceedings of 2012 ICME International Conference on Complex Medical Engineering. Kobe, Japón.
- Francois, V.; Monique, M.; Dauwels, J. y Cichocki, A. (2010). Steady-State Visually Evoked Potentials: Focus on Essential Paradigms and Future Perspectives. *Progress in Neurobiology*, 90, 418-438.
- Friman, O.; Volosyak, I. y Gräser, A. (abril de 2007). Multiple Channel Detection of Steady-State Visual Evoked Potentials for Brain-Computer Interfaces. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 54(4).
- Hortal, E.; Úbeda, A.; Iáñez, E. y Azorín, J.M. (2014). Control of a 2 DoF robot using a Brain-Machine Interface. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 116, 169-176.
- Hwang, H.J.; Lim, J.H.; Jung, Y.J.; Choi, H. y Woo Lee, S. (30 de junio de 2012). Development of an SSVEP-Based BCI Spelling System Adopting a QWERTY-Style LED Keyboard. *Journal of Neuroscience Methods*, 59-65.
- Hwang, H.J.; Lim, J.H.; Lee, J.H. e Im, C.H. (18-20 de febrero de 2013). *Implementation of a Mental Spelling System Based on Steady-State Visual Evoked Potential (SSVEP)*. International Winter Workshop on Brain-Computer Interface (BCI). Gangwon, Corea del Sur.
- Iáñez, E.; Azorín, J.M.; Úbeda, A.; Fernández, J.M. y Fernández, E. (13 de diciembre de 2010). Mental Tasks-Based Brain-Robot Interface. *Robotics and Autonomous Systems*, 58(12), 1238-1245.
- Lim, J.H.; Hwang, H. J. e Im, C.H. (18-20 de febrero de 2013). "Eyes-Closed" SSVEP-Based BCI for Binary Communication of Individuals with Impaired Oculomotor Function. International Winter Workshop on Brain-Computer Interface. Gangwon, Corea del Sur.
- Martinez, P.; Bakardjian, H. y Cichocki, A. (22 de mayo de 2007). Fully Online Multicommand Brain-Computer Interface with Visual Neurofeedback Using SSVEP Paradigm. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 1-9.

- Millán, J.D.; Rupp, R.; Müller Putz, G.R.; Murray Smith, R.; Giugliemma, C.; Tangermann, M. *et al.* (2010). Combining Brain-Computer Interfaces and Assistive Technologies: State-of-the-Art and Challenges. *Frontiers in Neuroscience*, 4, 1-15.
- Nishifuji, S. y Kuroda, T. (28 de agosto a 1 de septiembre de 2012). *Impact of Mental Focus on Steady-State Visually Evoked Potential under Eyes Closed Condition for Binary Brain Computer Interface*. 34th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). San Diego, EE. UU.
- Rak, R.J.; Kołodziej, M. y Majkowski, A. (2012). Brain-computer interface as measurement and control system. *Metrology and Measurement Systems*, XIX(3), 427-444.
- Resalat, S.N.; Saba, V. y Afdideh, F. (2-3 de mayo de 2012). *A Novel System for Driver's Sleepiness Detection Using SSVEP*. 16th CSI International Symposium on Artificial Intelligence and Signal Processing (AISP). Fars, Irán.
- Shyu, K.K.; Chiu, Y.J.; Lee, P.L.; Lee, M.H.; Sie, J.J.; Wu, C.H. *et al.* (julio de 2013). Total Design of an FPGA-Based Brain-Computer Interface Control Hospital Bed Nursing System. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(7), 2731-2739.
- Singla, R. y Haseena, B.A. (julio de 2013). BCI Based Wheelchair Control Using Steady State Visual Evoked Potentials and Support Vector Machines. *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*, 3(3), 46-52.
- Singla, R.; Khosla, A. y Jha, R. (2013). Influence of Stimuli Color on Steady-State Visual Evoked Potentials Based BCI Wheelchair Control. *Journal of Biomedical Science and Engineering*, 6(11), 1050-1055.
- Vliet, M.V.; Robben, A.; Chumerin, N.; Manyakov, N.V.; Combaz, A. y Van Hulle, M.M. (enero 9-11 de 2012). *Designing a brain-computer interface controlled video-game using consumer grade EEG hardware*. Biosignals and Biorobotics Conference (BRC), 2012 ISSNIP. Manaus, Brasil.
- Wolpaw, J.R.; Birbaumer, N.; Heetderks, W.J.; McFarland, D.J.; Peckham, P.H.; Schalk, G. *et al.* (2000). Brain-Computer Interface Technology: A Review of the First International Meeting. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, 8(2), 164-173.
- Zhang, Y.; Xu, P.; Tiejun, L.; Hu, J.; Zhang, R. y Yao, D. (6 de marzo de 2012). Multiple Frequencies Sequential Coding for SSVEP-Based Brain-Computer Interface. *PLoS One*, 7(3), 1-9.





## Diseño e implementación de una red de emuladores para recrear escenarios clínicos del sistema respiratorio de pacientes neonatales

### Design and implementation of a network of emulators to recreate clinical scenarios of the respiratory system in neonatal patients

Edward Julián Ramos Ballesteros<sup>1</sup>, Gloria Margarita Varón Durán<sup>2</sup>,  
Luis Carlos Méndez Córdoba<sup>3</sup>

**Fecha de recepción:** 1 de abril de 2015

**Fecha de aceptación:** 15 de febrero de 2016

**Cómo citar:** Ramos Ballesteros, E. J., Varón Durán, G. M., & Méndez Córdoba, L. C. (2016). Diseño e implementación de una red de emuladores para recrear escenarios clínicos del sistema respiratorio de pacientes neonatales. *Revista Tecnura*, 20(48), 53-67. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.2.a04

#### RESUMEN

**Contexto/Objetivo:** El objetivo es diseñar e implementar una red de emuladores para realizar a futuro un taller práctico con los estudiantes del área de la salud, para que ellos coloquen a prueba sus conocimientos y aprendan de lo vivenciado antes de su vida profesional.

**Método:** La red está compuesta por un Módulo de Control Central (MC), que permite al docente crear escenarios clínicos, y tres Emuladores para los estudiantes. Una vez creados los escenarios, son transmitidos hasta un Emulador que es escogido mediante una interfaz gráfica, con el fin de que el estudiante en práctica observe los valores y señales de los signos vitales tanto en la parte física (ME: Maniquí del Emulador) como en la parte gráfica (IE: Interfaz del Emulador), y realice acciones dependiendo de los

conocimientos adquiridos en sus estudios. Luego se genera un proceso de respuesta que le muestra al docente los resultados de las acciones. Finalmente el docente evalúa a los estudiantes comparando el escenario clínico con la respuesta y así también estimula el aprendizaje de los mismos.

**Resultados:** Las características de implementación después de realizar un conjunto de pruebas son las siguientes: la distancia máxima de los componentes con respecto al MC, sin perder el óptimo funcionamiento de la red, es de 8 metros para el IE y 12 metros para el ME. Además con las técnicas implementadas se reduce en 13.28% el tiempo de ejecución cuando se programa el escenario clínico y en 21.78% el tiempo de ejecución del proceso de respuesta, estableciéndolos en 8,42 y 4,99 segundos respectivamente.

- 1 Ingeniero Electrónico, Estudiante de Maestría en Ingeniería Electrónica. Miembro del grupo CMUN de la Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. Contacto: [ejramosb@unal.edu.co](mailto:ejramosb@unal.edu.co)
- 2 Ingeniera Electrónica, Master en Comunicaciones Ópticas y Tecnologías Fotónicas, Doctora en Optoelectrónica, Directora del grupo CMUN, Profesora asociada de la Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. Contacto: [gmvarond@unal.edu.co](mailto:gmvarond@unal.edu.co)
- 3 Médico General y Cirujano, Especialista en Pediatría, Especialista en Pediatría Perinatal, Perinatología y Neonatología. Miembro del grupo CMUN, Profesor asociado de la Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. Contacto: [lcmenendezc@unal.edu.co](mailto:lcmenendezc@unal.edu.co)

**Conclusiones:** Teniendo en cuenta la distancia máxima y los tiempos de ejecución, se construye una red de emuladores con las características necesarias para implementar a futuro el taller práctico teniendo en cuenta las especificaciones técnicas, condiciones de tráfico, dimensiones de los salones, los usuarios en paralelo y la periodicidad con que se va a utilizar.

**Palabras claves:** Emulador Neonatal, Escenarios Clínicos, Neonato, Radio Frecuencia (RF), Red de Comunicación, Sistema Respiratorio.

## ABSTRACT

**Context/Objectives:** The objective is to design and implement a network of emulators in order to develop make a practical workshop in the future with students in the area of health, testing their knowledge and learn from the experienced before exercising their professional life.

**Method:** The network is composed of a Central Control Module (CM), which allows teachers to create clinical scenarios, and three Emulators for students. Once created the scenarios, they are transmitted to a emulator that was chosen through a graphical interface, allowing the student to observe the values and signals of vital signs in both the physical part (ME: Dummy Emulator) and the graphic part (IE:

Interface Emulator), and take action depending on the knowledge acquired in their studies. Then a response process is generated showing the results of actions to the teachers. Finally, the teacher makes a comparison of the clinical scenarios with the response, to evaluate the students and thus he also stimulates learning in them.

**Results:** Implementation features after performing a series of tests are as follows: the maximum distances of the components with respect to MC, without losing optimum performance of network, is 8 meters for IE and 12 meters for the ME. In addition with techniques implemented, it is reduced by 13.28% runtime when programming the clinical scenario, and it is reduced by 21.78% runtime of response process, settling in 8.42 and 4.99 seconds respectively.

**Conclusions:** Given the maximum distance and runtimes, the network of emulators is built with features necessary to implement a practical workshop in the future taking into account the technical specifications, traffic conditions, size of the classrooms, users in parallel and the frequency of used

**Keywords:** Neonatal Emulator, Clinical Scenario, Neonate, Radio Frequency (RF), Communication Network, Respiratory System.

## INTRODUCCIÓN

El Objetivo de Desarrollo del Milenio número 4 (ODM 4) establece la meta de reducir en dos terceras partes la mortalidad de niños menores de cinco años para el año 2015 con respecto a las que ocurrieron en 1990 (Naciones Unidas, 2014). Se han presentado resultados en el informe de seguimiento a los Objetivos de Desarrollo del Milenio de 2013, los cuales indican que cerca de 6,6 millones de niños menores de cinco años murieron en 2012. Esto se traduce en que 18.000 niños mueren cada día en todo el mundo; además cerca del 40 % de las muertes de esta población específica ocurren en el periodo neonatal. Entre

una cuarta parte y la mitad de estos fallecimientos tiene lugar en las primeras 24 horas de vida y un 75 % durante la primera semana. Las primeras 48 horas posteriores al nacimiento es el periodo más importante para la supervivencia del recién nacido (OMS, 2014a). Se considera que la mayoría de estas muertes se pueden evitar si se tienen en cuenta algunas consideraciones prácticas (OMS, 2014b), entre ellas, la atención especializada después del parto. Como su nombre lo indica, generar atención especializada requiere que los profesionales del área de la salud que intervienen directamente durante y después del nacimiento tengan la experiencia necesaria; es decir, deben tener el conocimiento, la experiencia y las

capacidades necesarias para realizar los procedimientos normales de manera óptima y responder de la mejor manera en caso de que el neonato presente algún tipo de problema o complicación.

En ese sentido se ha generado un número de avances importantes para construir una serie de emuladores neonatales que puedan representar diferentes signos e incorporarlos en el aprendizaje de estudiantes del área de la salud (Cooper y Taqueti, 2004; Good, 2003; Cobbe *et al.*, 2000; Masuzawa, Takashina y Fukui, 1990). En este momento, el más importante que se tiene para la simulación de condiciones y signos vitales de un neonato ha sido presentado por la compañía Laerdal® y sus productos *SimBaby (lactante menor)* y *SimNewBaby™ (neonato)* (Laerdal medical, s.f.). Estos productos permiten a los estudiantes del área de la salud, realizar diversas prácticas y procedimientos clínicos que brindan la posibilidad de perfeccionar las habilidades en un entorno libre de riesgos. Este prototipo cuenta con un *software* sencillo que permite recrear diversos escenarios y que a su vez le entrega la información necesaria para que los estudiantes del área de la salud puedan reaccionar dependiendo de la situación que se presente.

Sin embargo, los emuladores comerciales que se ofrecen en la actualidad están diseñados para la interacción uno a uno; es decir, que el docente está dedicado de manera exclusiva a un escenario clínico y un solo estudiante en práctica, lo cual no es acorde a la realidad de la academia en el país. Además, los maniqués existentes en el mercado global son costosos (Laerdal Medical Corp, 2014) y han sido diseñados para otras metodologías; por esta razón, poseen otros métodos de enseñanza. Esto implica dificultades en el aprendizaje para los estudiantes en Colombia, con las alteraciones de correspondencia entre lo estudiado, lo experimentado y lo aprendido.

En consecuencia, es importante ampliar los mecanismos para que cada vez más estudiantes puedan practicar de forma individual y

simultánea en sus respectivos emuladores de entrenamiento, con el fin de poner a prueba sus conocimientos y así aprender de lo vivenciado y de la experiencia del docente, independientemente de que solo un docente enseñe a un grupo numeroso de estudiantes (la realidad de la academia). Así mismo, es importante tener una red de comunicación que conecte un *módulo de control central* dirigido por el docente, con varios *emuladores neonatales* a los cuales tendrán accesos cada uno de los estudiantes en práctica. Por tanto, la red le brindará la posibilidad de diseñar múltiples escenarios clínicos, manipulando el *módulo de control central* para un conjunto de estudiantes en práctica. Así, cada uno de ellos puede adquirir la experiencia requerida, aprendiendo del escenario programado y realizando acciones en los emuladores que él considere pertinentes dependiendo de sus conocimientos.

La red se apoya en seis trabajos realizados localmente (Estepa *et al.*, 2013). El primer proyecto permitió la simulación de varios escenarios clínicos que se relacionaban con la variación de la frecuencia cardíaca a causa de patologías, o por el suministro de medicamentos, además puede representar algunas manifestaciones cutáneas secundarias (Arrighi *et al.*, 2011). El segundo proyecto emula algunas patologías y sintomatologías del sistema respiratorio, determina la buena ejecución del masaje torácico, brinda la posibilidad de imitar la respiración del paciente por medio de una bomba manual e introduce una interfaz para que el practicante pueda ver los diferentes signos vitales del neonato (Estepa *et al.*, 2012a, 2012b). El siguiente proyecto recrea sintomatologías y patologías que presentan los neonatos en presiones arteriales o venosas, con la diferencia de que las medicinas se suministran por medio de catéteres. Posteriormente se integran los dos primeros trabajos en un solo emulador, cambiando la tecnología usada y brindando la posibilidad de tener escenarios clínicos de dos sistemas diferentes (cardiovascular y respiratorio). También se

desarrolló una herramienta (fonendo) para simular sonidos cardiacos y respiratorios en uno de los emuladores anteriormente expuestos (Ruiz, Estepa, Méndez y Bacca, 2014). Además, como resultado del quinto trabajo se desarrolló un ambiente virtual de un simulador neonatal que permite a los docentes del área de la salud generar diferentes escenarios en un monitor simulado, lo que facilita la práctica del diagnóstico clínico y toma de decisiones por parte de los estudiantes (Arrighi *et al.*, 2011).

Cabe resaltar que los emuladores locales responden a técnicas, filosofías y metodologías propias de la Escuela de Medicina de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, y el Instituto Materno Infantil, lo cual genera un valor agregado ya que están diseñados para las condiciones propias del país (Currea, 2005; Estepa, Méndez y Bacca, 2014).

A partir de lo anterior, la investigación se enfoca en el diseño e implementación de una red

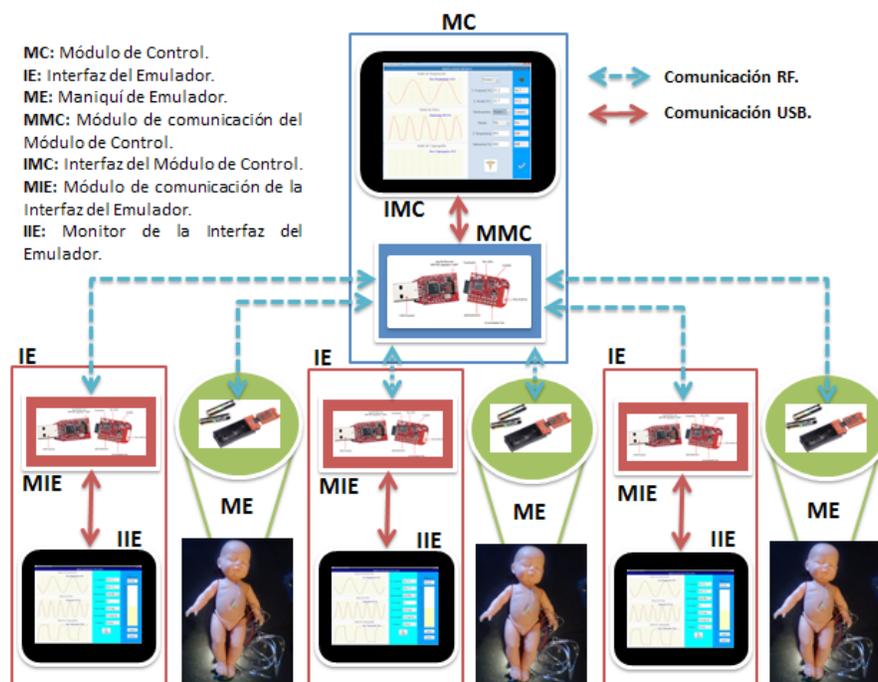
para emuladores de entrenamiento que permita recrear escenarios clínicos del sistema respiratorio de pacientes neonatales, teniendo en cuenta todos los aspectos necesarios para representar de forma óptima dichos escenarios.

## METODOLOGÍA: RED DE EMULADORES

A continuación se presentan cada uno de los componentes necesarios que en conjunto y con las interacciones debidas forman la red de comunicaciones, además se exponen las consideraciones y pasos necesarios para realizar el diseño e implementación de la red.

### Componentes de la red

Con la categorización de la figura 1, la interfaz del emulador (IE) y el maniquí del emulador (ME) se conectan al módulo de control (MC), el cual



**Figura 1.** Topología y elementos que conforman la red de comunicaciones

**Fuente:** elaboración propia.

tiene la función de árbitro y se compone por una interfaz gráfica (IMC) y un módulo de comunicación (MMC). Además la IE estará compuesta por un módulo de comunicación (MIE) y una interfaz propiamente dicha (IIE). Se implementa una red con topología tipo árbol con el fin de que el MC pueda acceder a cada uno de los componentes del emulador (IE+ME), adquiriendo algunos beneficios como: mejor detección de errores y mejor manejo de la información. Además cabe notar que cada uno de los componentes de la red tiene asociado un módulo de comunicación MSP430-CC2500 (MSPCC).

Debido a que los emuladores deben ser inalámbricos para aportar el realismo necesario a los estudiantes en práctica, toda la alimentación es proporcionada por baterías. El microcontrolador de bajo consumo que tiene el módulo de comunicación MSP430-CC2500 influye en el incremento de la duración de las baterías, por tanto aumenta el tiempo de uso de cada emulador antes de tenerlos que recargar. También el módulo de comunicación MSP430-CC2500 cuenta con una interfaz USB que puede comunicar el módulo con la respectiva interfaz gráfica y un transceptor RF que permite tener en el mismo dispositivo la transmisión y recepción de datos de los diferentes componentes de la red. Además las tarjetas del módulo de comunicación tienen un tamaño reducido facilitando su ubicación en el maniquí, ya que el espacio en el interior es limitado y con geometrías complicadas. Adicionalmente, en los módulos se puede utilizar el protocolo SimpliTI (Friedman, 2007) donde están desarrolladas algunas funciones de transmisión y recepción de datos por medio de USB y RF, lo cual proporciona ventajas en pro de alcanzar los objetivos de la implementación.

Las características anteriormente expuestas permitirán configurar los módulos de comunicación MSP430-CC2500 como de árbitro de la red y llevar a cabo la comunicación entre interfaz gráficas/módulo y módulo/módulo. Por tal

motivo se eligió el módulo de comunicación MSP430-CC2500 para desarrollar el proyecto.

## Tramas

### *Bytes de información y de control*

Los signos vitales escogidos para representar los escenarios clínicos del sistema respiratorio son: frecuencia respiratoria, señal de pulso, saturación de la hemoglobina por el oxígeno (pulso saturometría), temperatura corporal y temperatura rectal. Por tanto, los bytes de información son los encargados de representar los escenarios clínicos.

Los escenarios clínicos también contemplan la posibilidad de seleccionar algunas medicinas para simular que fueron aplicadas a la madre antes o durante el parto, para facilitar algún procedimiento o para estabilizarla, pero por sus propiedades, las medicinas serán las encargadas de generar dificultades a los neonatos. Además se puede programar cierta cantidad de masajes torácicos que deberá realizar el estudiante en práctica. A veces por las condiciones del parto, por lo general cuando es por cesárea, el neonato no realiza la primera respiración, entonces por medio de los masajes torácicos se estimula el tórax del neonato para que la realice y así conseguir que él siga respirando por sí mismo (Medline Plus, s.f.).

Los bytes de control, como su nombre lo indica, son los encargados de controlar y validar las tramas. La tabla 1 muestra las características de los bytes utilizados para representar los escenarios clínicos.

Cabe notar que la codificación utilizada permite ampliar la cantidad de procedimientos y medicinas a ser usadas en futuros proyectos.

### *Trama total y sub-tramas*

Como se observa en tabla 1, la trama está compuesta de 20 bytes, repartidos en 6 bytes de control (en negrita de las figura 2 y figura 3) y 14

**Tabla 1.** Características y tipos de bytes utilizados

No. de bytes	Tipo de byte	Descripción
3	Información	Frecuencia respiratoria.
3	Información	Saturación de la hemoglobina por el oxígeno.
3	Información	Temperatura corporal.
3	Información	Temperatura rectal.
1	Información	Medicinas aplicadas.
1	Información	Masaje torácico.
1	Control	Inicio: la trama será válida si el byte contiene una jota mayúscula (J).
4	Control	Dirección: establecido por protocolo SimpliCI.
1	Control	Operación: determina el proceso que se llevará a cabo con la trama.

**Fuente:** elaboración propia.

<b>Ini</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>D4</b>	<b>T</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>F1</b>	<b>F2</b>	<b>F3</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>Tc1</b>	<b>Tc2</b>	<b>Tc3</b>	<b>Tr1</b>	<b>Tr2</b>	<b>Tr3</b>
------------	-----------	-----------	-----------	-----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	------------	------------	------------	------------	------------	------------

**Figura 2.** Trama total

**Fuente:** elaboración propia.

sub-trama 1	<b>Ini</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>D4</b>	<b>T</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>F1</b>	<b>F2</b>
sub-trama 2	<b>A1</b>	<b>F3</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>Tc1</b>	<b>Tc2</b>	<b>Tc3</b>	<b>Tr1</b>	<b>Tr2</b>
sub-trama 3	<b>A2</b>	<b>Tr3</b>	-	-	-	-	-	-	-	-

**Figura 3.** Las 3 subtramas necesarias para enviar toda la trama total

**Fuente:** elaboración propia.

bytes de información. Esta trama se utiliza para comunicar de forma bidireccional al MC con cada uno de los componentes del emulador (IE y ME), tal como se puede ilustrar en la figura 1, donde las flechas punteadas representan la comunicación por radiofrecuencia.

Las siglas de la figura 2 significan lo siguiente: *Ini*: byte de inicio; *D*: dirección; *T*: tipo de operación; *C*: escenario clínico; *F*: frecuencia respiratoria; *Tc*: temperatura corporal, y *Tr*: temperatura rectal.

Por características del protocolo SimpliCI (Friedman, 2007), solo se pueden enviar 10 bytes

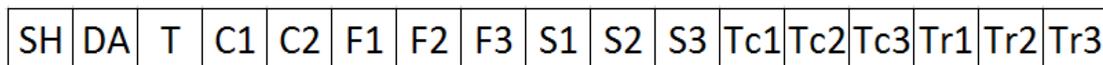
en cada proceso de transmisión. Por esta razón, la trama total se divide en 3 subtramas y se agrega un nuevo byte de armado, este ocupa la primera posición de cada subtrama y su función es guardar un consecutivo para armar la trama total en el receptor.

La letra *A* representa los bytes de armado. El byte de inicio se utiliza como el primer byte de armado (*A0*). En la figura 3 se observa que en la última subtrama quedan 8 bytes libres, estos pueden ser utilizados para enviar información de otros signos vitales.

*Tramas hardware/software y software/hardware*

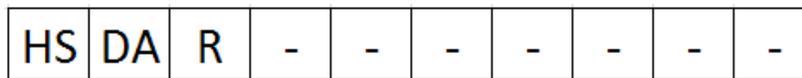
Estas tramas son las encargadas de comunicar la interfaz gráfica (IMC o IIE) con los MSPCC (MMC o MIE) de forma bidireccional, tal como se muestra en la figura 1, donde las flechas continuas representan la comunicación por medio de USB. El byte SH (Figura 4) y el byte HS (figura 5) se utilizan para validar y controlar las tramas. Las IIE

e IMC requieren un byte de dirección absoluta (DA) para acceder a los MSPCC. La DA depende del orden en que los MSPCC se conecten a la red. Se determina, entonces, que los IE tienen una dirección DA par, mientras que los ME tendrán las direcciones DA impares. Para conformar el emulador se asocian los componentes IE y ME con direcciones DA consecutivas.



**Figura 4.** Trama de comunicación software/hardware

**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 5.** Trama de comunicación hardware/software

**Fuente:** elaboración propia.

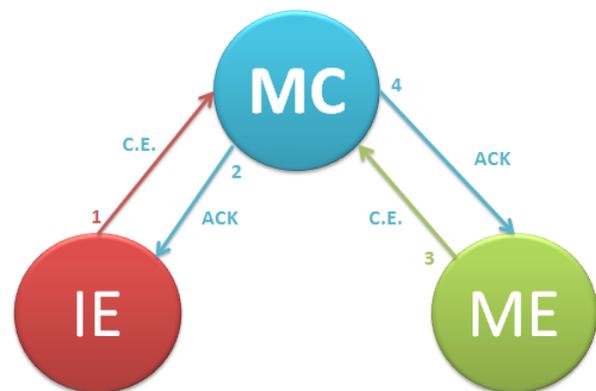
Dentro del módulo del MSPCC asociado al MC (MMC), se realiza la conversión de la DA a las direcciones de 4 bytes, dependiendo del proceso de comunicación que se realice.

El tercer byte de la trama *hardware/software* indica si la respuesta del estudiante en práctica fue acertada o no.

**Procesos de comunicación**

Los procesos de comunicación son el conjunto de transmisiones ordenadas que se deben realizar para conectar de manera correcta un emulador a la red (CE), validar la programación del escenario clínico (CC) y generar la respuesta (Rta.) dependiendo del caso. Los diagramas de los procesos presentados a continuación solo incluyen la transmisión y recepción entre los MSPCC.

*Proceso de conexión de los emuladores (CE)*



**Figura 6.** Comunicaciones que se deben efectuar para lograr la conexión exitosa de un emulador (C.E).

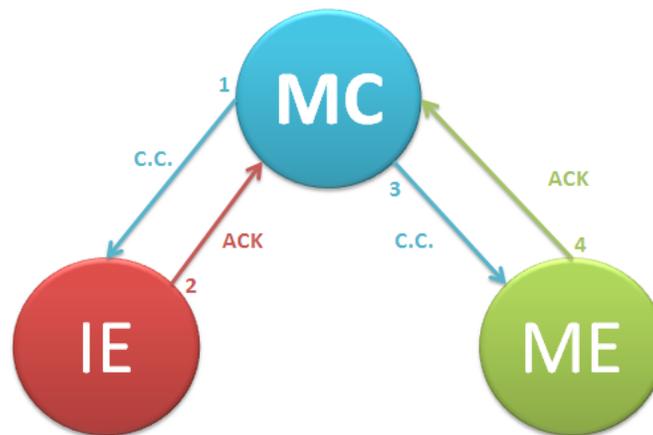
**Fuente:** elaboración propia.

En primera instancia se debe conectar el MMC al PC, cuando este reconozca el MMC se podrá ejecutar la interfaz gráfica del MC (IMC), en ese momento se hace una conexión entre los dos componentes del MC (IMC+MMC) y se consigue tener el módulo de control funcional.

La conexión de un emulador comienza conectando el MIE a un PC, cuando esto sucede el MIE envía una trama de conexión hacia el MC con la dirección que tiene el MIE. El MC recibe la trama de conexión guardando la dirección del MIE en una matriz y le asigna a la DA un valor de cero por ser el primer MSPCC que se conecta

a la red. Después de esto se ejecuta la IIE desde el pc donde se conectó el MIE, en ese momento se completa la conexión del IE (MIE+IIE). El segundo paso de la fase de conexión es conectar el ME del primer emulador a la red. Al igual que el MIE, al momento de conectar las baterías el ME envía una trama de conexión con la dirección que tiene, el MC guarda la dirección y le asigna a la DA el valor de 1. Cuando se conecta la IE y el ME en ese orden, se considera que el primer emulador se conectó a la red. Para conectar los otros dos emuladores se debe realizar el mismo el proceso.

### Proceso del escenario clínico



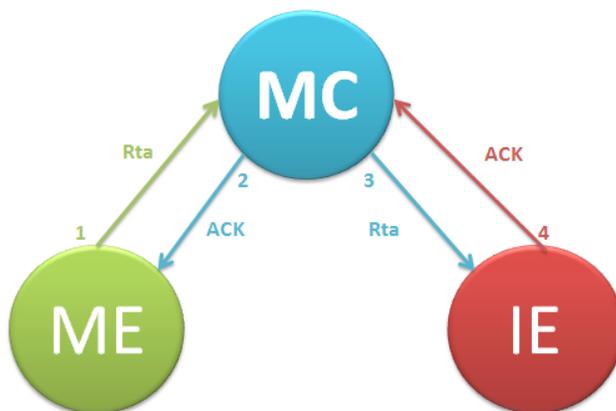
**Figura 7.** Comunicaciones que se deben efectuar para programar un escenario clínico (CC) exitosamente

**Fuente:** elaboración propia.

El proceso del escenario está constituido de los siguientes 4 pasos (figura 7):

1. Transmisión de la trama completa por parte del MC teniendo toda la información del escenario clínico y los bytes de control para ser recibido en primera instancia por el IE.
2. Transmisión de una confirmación (ACK) por parte del IE hacia el MC, esta confirmación certifica que los datos del escenario clínico llegaron al MSPCC de destino.
3. Una vez MC recibe la confirmación del IE, este procede a enviar la información necesaria para representar el escenario clínico en el ME.
4. Por último el MC recibe la confirmación por parte del ME y así el MC puede garantizar que todo el proceso de escenario clínico se realizó satisfactoriamente.

### Proceso de respuesta



**Figura 8.** Comunicaciones que se deben efectuar para tener un proceso de respuesta (Rta.) exitoso

**Fuente:** elaboración propia.

El proceso de respuesta está constituido de los siguientes cuatro pasos (figura 8):

1. Se transmite una trama desde el ME hasta el MC notificando que existe la Respuesta del estudiante en práctica.
2. Se envía una confirmación (ACK) al ME.
3. El MC envía la respuesta que se obtuvo hacia el IE. El MC genera todos los valores de los signos vitales dentro del rango normal para un neonato si las acciones del estudiante en práctica fueron las adecuadas. De lo contrario, el escenario se seguirá desarrollando.
4. Por último el MC recibe la confirmación por parte del IE y así el MC puede garantizar que todo el proceso de respuesta se realizó satisfactoriamente.

## PRUEBAS Y RESULTADOS

### Pruebas de la duración de los procesos de comunicación

Las pruebas consisten en cambiar el tiempo de *refresh* que tiene el microcontrolador. Para cada prueba se realizaron diez repeticiones de cada proceso de comunicación y se calculó el promedio de los tiempos de ejecución. Los tiempos fueron obtenidos programando un algoritmo en la IMC y garantizando la confiabilidad de la red.

Tras observar la tabla 2 se obtiene la configuración que genera un mínimo (cuarta columna). El mínimo disminuye el tiempo de ejecución de la programación del Escenario Clínico en 1,3s y

**Tabla 2.** Principales resultados de las pruebas de duración de los procesos de comunicación.

Parámetro	Tiempos (s)									
Tiempo de <i>refresh</i> del MC	1	0,7	0,8	0,6	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
Tiempo de <i>refresh</i> del IE	1	1	1	1	1	1	0,75	0,6	0,6	0,6
Tiempo de <i>refresh</i> del ME	1	1	1	1	1	0,75	1	1	1	0,6
Tiempo de ejecución del escenario	9,71	9,15	9,31	8,43	8,42	8,77	8,32	8,34	8,55	8,55
Tiempo de ejecución de respuesta	6,38	5,63	6,08	5,25	4,99	5,45	5,16	5,42	5,17	5,17

**Fuente:** elaboración propia.

el tiempo de ejecución de Respuesta en 1,4 s en comparación a la prueba base (primera columna). Los tiempos finales de los procesos se ajustan a las necesidades del proyecto garantizando la confiabilidad, además los tiempos propios de la red no intervienen de manera significativa en el proceso de evaluación.

### Pruebas de distancia

Otro parámetro importante es la distancia máxima en que se pueden situar los elementos de la red sin perder su óptimo funcionamiento. Para obtener dicha distancia se realizan una serie de pruebas cambiando la ubicación de los MSPCC de cada componente del emulador hasta llegar al punto donde no se puede finalizar con éxito los procesos de comunicación.

Con la información consignada en la tabla 3 se puede determinar que la distancia máxima de operación es de 8 m para el IE y 12 m para ME con respecto al MC. Estas distancias se pueden considerar apropiadas, teniendo en cuenta que las dimensiones del salón de simulación donde estará situada la red no superan las distancias máximas de operación, además no existen obstáculos en el salón que impida la transmisión de las señales. Por último se puede determinar que el tiempo que tardan los procesos de comunicación aumenta a medida que la distancia entre los componentes del emulador y el MC son mayores.

Como resultado de la investigación se obtienen los siguientes elementos que con la

interacción adecuada conforman la red de comunicaciones. A continuación se presenta cada una de las partes que componen las interfaces gráficas y se mencionará las consideraciones que se tuvieron en cuenta para construirlas.

### Interfaz gráfica del módulo central (IMC)

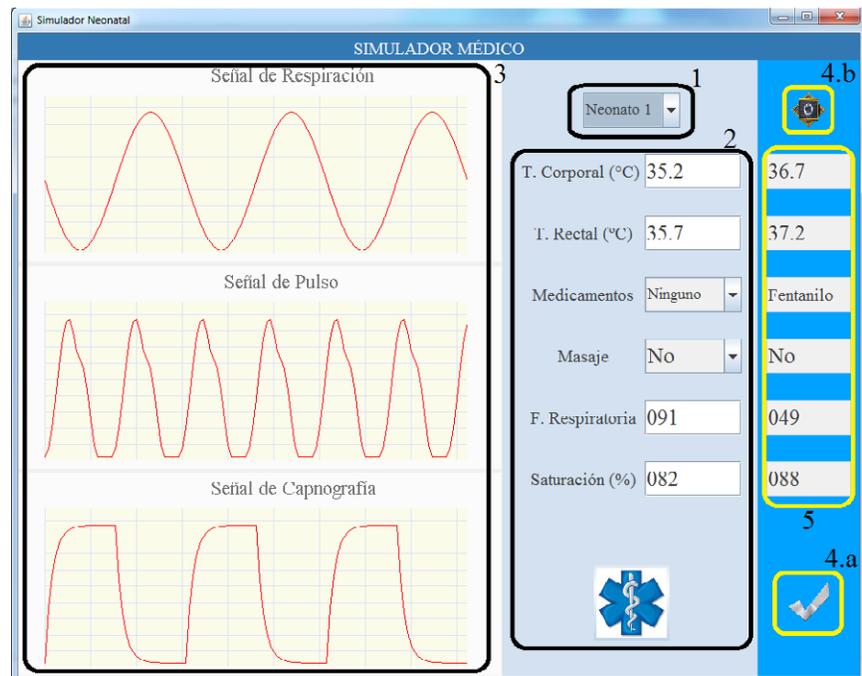
Las interfaces gráficas se programan por medio del lenguaje Java utilizando Netbeans. A continuación se explican las partes de la IMC y como están ubicadas (figura 9).

1. *Selector de emuladores*: Brinda la posibilidad de escoger el emulador para programarle el escenario clínico u observar los resultados obtenidos. Debido a que el médico tendrá que observar o programar diferentes escenarios clínicos simultáneamente, este componente ayuda a que se enfoque en un solo escenario pero con la alternativa de cambiar el emulador las veces que lo considere necesario y así evaluar cómo transcurre cada uno de los escenarios sin perder el detalle.
2. *Programación del escenario clínico*: Cuenta con un botón y varias casillas que, con el respectivo diligenciamiento, recoge la información del paciente. Las casillas serán: Cuatro cuadros en los que es posible escribir los valores de frecuencia respiratoria, saturación de la hemoglobina por el oxígeno, y las temperaturas rectal y corporal.

**Tabla 3.** Aspectos más importantes de la prueba de distancia

Prueba	Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3		Prueba 4	
	IE	ME	IE	ME	IE	ME	IE	ME
Parte emulador								
Distancia (m)	6	6	6	9	6	12	8	12
Clínico (s)	10,04		10,97		11,06		11,64	
Respuesta (s)	4,66		4,78		4,85		6,15	

**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 9.** Interfaz gráfica del módulo central y las partes de las cuales se compone

**Fuente:** elaboración propia

Dos selectores: en el primero se podrá escoger una medicina y el segundo brinda la posibilidad de programar una cantidad aleatoria de masajes torácicos.

Estos cuadros y selectores almacenan los datos que componen todo el escenario clínico; la cantidad y funcionalidad de las casillas están acorde a los signos vitales, medicinas y masajes que se plantearon inicialmente.

3. *Seguimiento del escenario clínico:* El seguimiento se realiza por medio de tres gráficas (señal de respiración, señal de pulso y señal de capnografía). Estas muestran cómo aumenta o disminuye la frecuencia y la amplitud de la respiración según el caso y están, en cierto grado, sincronizadas con las gráficas de la IIE. El seguimiento es importante para el médico debido a que visualiza las acciones realizadas por el estudiante en práctica casi en tiempo real y puede determinar si se demora o apresura en

realizar dichas acciones, ya que en el quehacer profesional el factor tiempo es crítico.

4. *Indicadores de procesos:* Los indicadores llaman la atención de la persona encargada de manejar IMC cuando se recibe información relevante. Estos indicadores están programados para facilitarle al médico el manejo del módulo de control, ya que al realizar el seguimiento a varios escenarios clínicos simultáneamente es importante que el médico pueda observar eventos, como la respuesta generada por el estudiante en práctica, de cada escenario en el momento que suceden, independientemente que esté haciendo el seguimiento a un emulador en particular. Los indicadores son:
  - a. *Indicador de escenarios clínicos y resultados:* Refleja el estado del escenario clínico. El indicador tiene tres estados: el primero será *en proceso* y se mantendrá el tiempo que tarda la programación del escenario clínico; el

segundo se activa cuando el escenario clínico ya se programó satisfactoriamente, y el tercero cuando se recibió la respuesta por parte del estudiante en práctica.

- b. *Cantidad de solicitudes:* Muestra el número de respuestas recibidas y en el selector de emuladores señala al emulador que originó cada una de las respuestas.
5. *Resultados de los escenarios clínicos:* Se puede evidenciar la forma de proceder de los estudiantes en práctica mediante seis cuadros que muestran los valores de los signos vitales planteados inicialmente, la medicina que el practicante aplicó, y cuántos masajes torácicos realizó; estos dos últimos si fueran necesarios. Además, las gráficas que siguen el escenario clínico también brindan información del estado final del neonato. Estos resultados son importantes porque reflejan las reacciones que el neonato manifestó partiendo de las acciones realizadas por el estudiante en práctica, además se sitúa al frente de los datos del escenario clínico para que se pueda realizar la comparación directamente.

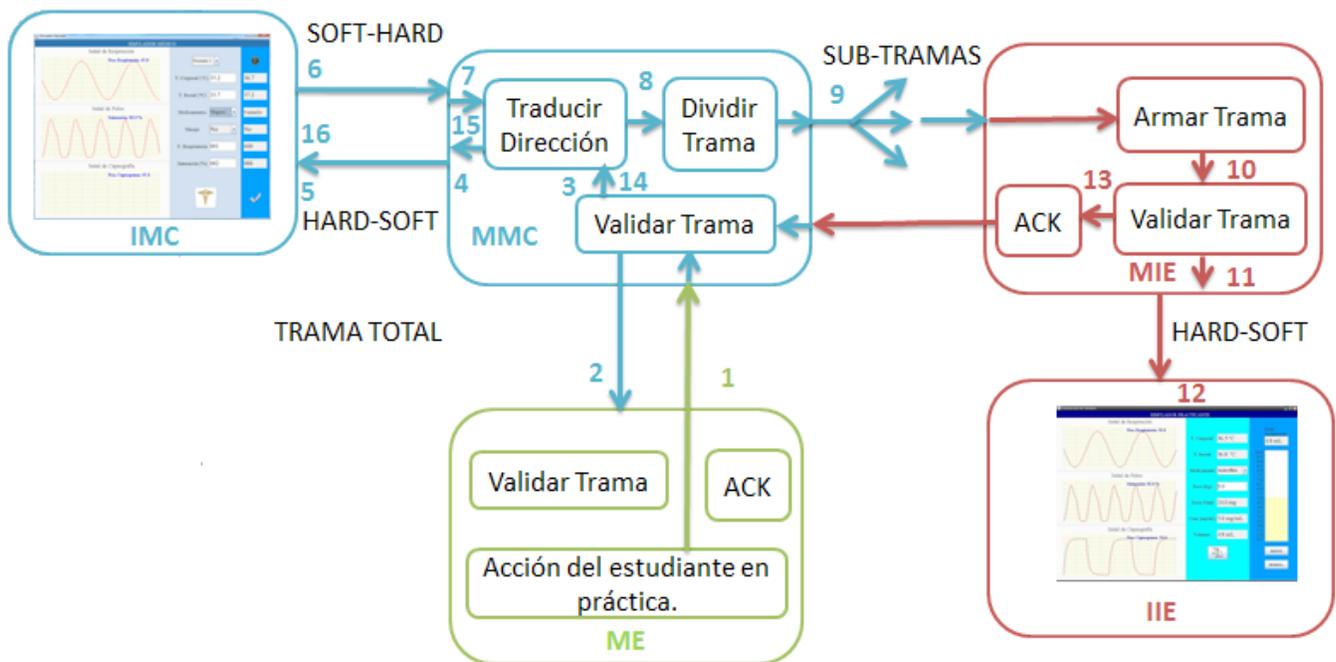
## Interfaz gráfica propia del emulador (IEE)

A continuación se explican las partes de la IIE y cómo están ubicadas (figura 10).

1. *Representación del escenario clínico programado:* La forma como el estudiante en práctica visualiza los signos que presenta el neonato es muy importante y se debe acercar a la presentación que tiene los monitores utilizados en el quehacer profesional, por este motivo se programan gráficas y cuadros donde se pueden observar de manera continua el valor de los signos vitales considerados para este proyecto; estos son el punto de partida para que los estudiantes en práctica realicen las acciones que crean convenientes dependiendo de sus conocimientos. El estudiante en práctica podrá observar información del escenario clínico por medio de las siguientes herramientas:

- a. Tres gráficas (señal de respiración, señal de pulso y señal de capnografía) que muestran la forma y el valor que tienen las señales cuando disminuye o aumenta la amplitud y la frecuencia respiratoria según el caso. Además se visualizan los valores de saturación de la hemoglobina por el oxígeno. Las gráficas estarán en cierto grado sincronizadas con las gráficas que se muestran en la IMC.
- b. Dos cuadros donde se visualizan las temperaturas rectal y corporal.
2. *Herramientas de decisión de acuerdo con el escenario clínico:* Es fundamental para llevar a cabo las acciones que el estudiante en práctica considere con el fin de revertir los efectos negativos del escenario clínico. Debido a que dichos escenarios son propios del sistema respiratorio, la herramienta se centra en la aplicación de medicinas que traten este tipo de escenarios y la buena ejecución del masaje torácico. Además, la herramienta calcula la dosis a suministrar, generando un valor agregado en el sentido que también se está adquiriendo experiencia en el cálculo de la dosis adecuada y su respectiva aplicación. En la herramienta se podrá elegir una de las medicinas consideradas previamente para simular su aplicación al neonato. Además se puede ingresar el peso del neonato para calcular el volumen final de la medicina a aplicar, a partir de los valores comerciales de concentración del medicamento.
3. *Cargar dosis:* Es importante que los estudiantes en práctica apliquen las dosis recomendadas, ya que una sobre dosis puede tener graves consecuencias, incluso la muerte del recién nacido; por este motivo, la interfaz gráfica calcula el volumen del medicamento dependiendo de su concentración y del peso del neonato. Además, se tendrá un mímico para que el volumen que sea cargado en la jeringa coincida con el calculado y así tener la certeza de que se aplicará la dosis apropiada.





**Figura 12.** Proceso de respuesta detallado

**Fuente:** elaboración propia.

Tras una recopilación, en las figuras 11 y 12 se muestran los procesos de comunicación de manera detallada incluyendo todos los aspectos anteriormente mencionados. En las figuras se enumeran los pasos que se deben realizar para completar satisfactoriamente cada proceso.

## CONCLUSIONES

A partir de los campos que componen las tramas y los procesos de comunicación implementados, se establece un lineamiento para que se puedan implementar más sistemas y escenarios clínicos, sin sufrir cambios radicales.

Mediante las pruebas realizadas, donde se modifican los tiempo de *refresh* de los dispositivos que interviene en la red, se obtuvo una reducción de 1,3 s en el tiempo de ejecución cuando se programa el escenario clínico, lo que

equivale a una disminución del 13,28 %. Asimismo se reduce el tiempo de ejecución del proceso de respuesta en 1,4 s, lo que equivale a una disminución del 21,78 %. Adicionalmente las pruebas de distancia máxima arrojan como resultado que se puede ubicar el IE a 8 m y el ME a 12 m, ambos con respecto al MC, sin perder el óptimo funcionamiento de la red. Estos resultados son suficientes para cumplir el objetivo del proyecto, sin embargo se puede seguir implementando tecnologías o métodos para mejorar estos parámetros.

Debido al bajo consumo de potencia por parte de los módulos eZ430-RF2500, hay una frecuencia menor en los cambios de baterías. Esta característica, sumada al hecho de que son dispositivos inalámbricos, genera el realismo que se pretende.

## TRABAJOS FUTUROS

El actual trabajo genera las primeras herramientas para lograr la meta de implementar una red de comunicaciones que sea el eje tecnológico para crear un taller práctico con los estudiantes del área de la salud, los trabajos futuros que apuntan a la meta son:

- Diseñar o agregar técnicas y tecnologías que puedan aumentar la distancia máxima de operación y disminuir los tiempos que tardan los procesos de comunicación, con lo cual se garantiza el óptimo funcionamiento de la red.
- Realizar las pruebas del funcionamiento de la red integrando la parte física del emulador (carcasa, alimentación, RFID y sensores). Con la integración se podrá probar la simulación de la aplicación de la medicina y la ejecución del masaje torácico.
- Realizar talleres prácticos con los estudiantes y así realizar los ajustes necesarios. Adicionalmente se debe validar la red por parte de expertos en el área de la salud.

## FINANCIAMIENTO

Para el desarrollo de esta investigación se contó con el apoyo económico de Colciencias y la Universidad Nacional de Colombia por medio de la “Convocatoria 566: Jóvenes Investigadores e Innovadores–2012”.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a Colciencias y la Universidad Nacional de Colombia por medio de la “Convocatoria 566: Jóvenes Investigadores e Innovadores–2012”.

## REFERENCIAS

- Arrighi L., F.D.; Cifuentes, J.; Prieto, F.; Mendez, L. y Ramírez, J. (2011). Development of a neonatal interactive simulator by using an RFID module for healthcare professionals training Deploying RFID. *Challenges, Solutions, And Open Issues*, 28-51.
- Cobbe, S.; Reeve, W.; Swann, I.; Clark, L.; Watson, J. y MacFarlane, P. (2000). Cpr 98: a practical multimedia computer-based guide to cardiopulmonary resuscitation for medical students. *Resuscitation*.
- Cooper, J. y Taqueti, V. (2004). A brief history of the development of mannequin simulators for clinical education and training. *Qual Saf Health Care*, 13(1), 11-18.
- Currea G., S. (2005). *La adaptación neonatal inmediata, le reanimación neonatal*. Bogotá: Unibiblos.
- Estepa, Y.; Ramos, E.; Méndez, L.; Bacca, J. y Varón, M. (2012a). *Diseño e implementación de un sistema electromecánico para emular escenarios médicos del sistema respiratorio de pacientes neonatales*. Lima: Intercon.
- Estepa, Y.; Ramos, E.; Méndez, L.; Bacca, J. y Varón, M. (2012b). *Patients, Design and Implementation of an Electro-Mechanical System for the Simulation of Medical Scenarios of the Respiratory System of Neonatal*. Galápagos: CITIC 2012.
- Estepa, Y., R.F.; Ramos, E.; Cuervo, N.; Méndez, L.; Bacca, J. y Varón, M. (2013). *RFID Technologies applied to the Design and Implementation of Electro-Mechanical Systems for the Simulation of Medical Scenarios in Neonatal Patients*. Orlando, Florida: IEEE RFID.
- Estepa, Y., D.P., P.; Méndez, L. y Bacca, J. (2014). *Neonatal patients Simulators as a learning tools for Health Sciences students*. I Congreso Internacional de Ingeniería Clínica y Bioingeniería. Mayo. Bogotá, Colombia.

- Good, M. (2003). Patient simulation for training of basic and advanced clinical skills. *Med Educ*.
- Friedman, L. (2007). *SimpliciTI: Simple Modular RF Network Developer Notes*, Versión 1.10. Texas: Texas Instruments.
- Laerdal Medical Corp (s.f.): Lista de precios julio 2014: [http://www.ogs.state.ny.us/purchase/spg/pdfdocs/3823219745PL\\_Laerdal.pdf](http://www.ogs.state.ny.us/purchase/spg/pdfdocs/3823219745PL_Laerdal.pdf)
- Laerdal Medical (s.f.). *Especificaciones del simulador neonatal SIMNewBaby*. Recuperado de: <http://www.laerdal.com/la/doc/88/SimNewB#/specs>
- Masuzawa, T.; Takashina, T. y Fukui, Y. (1990). A new cardiac auscultation simulator. *Clin Cardiol*.
- Medline Plus (s.f.). *Taquipnea transitoria en recién nacidos*. Recuperado de: <http://www.nlm.nih.gov/medlineplus/spanish/ency/article/007233.htm>
- Naciones Unidas (2014). *Objetivos de Desarrollo del Milenio: Informe 2013*. Recuperado de: <http://www.undp.org/content/dam/undp/library/MDG/spanish/mdg-report-2013-spanish.pdf>
- Organización Mundial de la Salud (OMS) (2014a). *ODM 4: reducir la mortalidad infantil*. Recuperado de: [http://www.who.int/topics/millennium\\_development\\_goals/child\\_mortality/es/](http://www.who.int/topics/millennium_development_goals/child_mortality/es/)
- Organización Mundial de la Salud (OMS) (2014b). *Las muertes infantiles en el mundo se han reducido casi a la mitad desde 1990, dice la ONU*. Recuperado de: [http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2013/child\\_mortality\\_causes\\_20130913/es/](http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2013/child_mortality_causes_20130913/es/)
- Ruiz, C.; Estepa, Y.; D.P., P.; Méndez, L. y Bacca, J. (2014). *Evaluación de un sistema de emulación de sonidos cardíacos y respiratorios en un maniquí de entrenamiento desarrollado en la Universidad Nacional de Colombia*. México: Congreso de la Sociedad Iberoamericana de Neonatología (SIBEN).





## Algoritmos para asignación de espectro en redes de radio cognitiva

### Algorithms for spectrum allocation in cognitive radio networks

Cesar Hernández<sup>1</sup>, Luis Fernando Pedraza Martínez<sup>2</sup>,  
Fredy Hernán Martínez Sarmiento<sup>3</sup>

**Fecha de recepción:** 7 de octubre de 2015

**Fecha de aceptación:** 15 de febrero de 2016

**Cómo citar:** Hernández, C., Pedraza Martínez, L. F., & Martínez Sarmiento, F. H. (2016). Algoritmos para asignación de espectro en redes de radio cognitiva. *Revista Tecnura*, 20(48), 69-88. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.2.a05

#### Resumen

**Contexto:** La asignación de espectro en las redes de radio cognitiva es un aspecto clave para reducir la latencia, incrementar la tasa de datos, aumentar el ancho de banda, mejorar la capacidad y cobertura, y optimizar el uso del espectro, garantizando la calidad de servicio necesaria para aplicaciones de tiempo-real y mejor-esfuerzo.

**Objetivo:** Este artículo presenta una revisión sobre los algoritmos de asignación de espectro en redes de radio cognitiva, describiendo los algoritmos de asignación de espectro más relevantes y su clasificación de acuerdo con la literatura actual.

**Método:** El desarrollo de esta revisión se realizó a partir del análisis de publicaciones recientes de corriente principal con sus respectivas citas, tratando de proveer un marco referencial de la literatura actual sobre los algoritmos de asignación de espectro en redes de radio cognitiva.

**Resultados:** Los principales resultados determinan la importancia de una asignación de espectro inteligente,

teniendo en cuenta la carga de tráfico, el comportamiento del usuario, los niveles de interferencia, la caracterización del espectro, el tipo de aplicación y la necesidad de múltiples canales de frecuencia.

**Conclusión:** Como conclusión es importante diseñar algoritmos adaptativos que permitan hacer un uso eficiente de las porciones disponibles del espectro licenciado.

**Palabras clave:** algoritmo, asignación de espectro, radio cognitiva, redes inalámbricas, toma de decisiones.

#### Abstract

**Context:** Spectrum allocation in cognitive radio networks is a key aspect to reduce latency, increase data rate, increase bandwidth, improve capacity and coverage, and optimize the use of the spectrum, guaranteeing the quality of service required applications and best-effort and real-time.

**Objective:** This paper aims to present a review of the algorithms for spectrum allocation in cognitive radio networks, describing the relevant algorithms for

1 Ingeniero electrónico, magíster en ciencias de la información y las comunicaciones, candidato a doctor en Ingeniería de Sistemas y Computación de la Universidad Nacional de Colombia. Docente e investigador de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Contacto: [cahernandezs@udistrital.edu.co](mailto:cahernandezs@udistrital.edu.co)

2 Ingeniero Electrónico, Magíster en Ciencias de la Información y las Comunicaciones, Candidato a doctor en Ingeniería de Sistemas y Computación en la Universidad Nacional de Colombia. Docente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: [lfpedrazam@udistrital.edu.co](mailto:lfpedrazam@udistrital.edu.co)

3 Ingeniero Eléctrico, especialista en Gestión de Proyectos de Ingeniería, candidato a doctor en Ingeniería de Sistemas y Computación de la Universidad Nacional de Colombia. Docente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Contacto: [fmartinezs@udistrital.edu.co](mailto:fmartinezs@udistrital.edu.co)

spectrum allocation and its classification according to the current literature.

**Method:** The development of this review was conducted based on the analysis of recent publications of mainstream with their respective appointments, trying to provide a complete reference framework of the current literature on the algorithms for spectrum allocation in cognitive radio networks.

**Results:** The main results determine the importance of smart spectrum allocation, taking into account the

traffic load, user behavior, interference levels, spectral characterization, the type of application and the need for multiple frequency channels.

**Conclusion:** In conclusion it is important to design adaptive algorithms to make efficient use of the available portions of the licensed spectrum.

**Keywords:** algorithm, spectrum allocation, cognitive radio, wireless networks, decision-making

## INTRODUCCIÓN

La gran diversidad de redes inalámbricas y la alta demanda de aplicaciones para estas, especialmente en el campo de las comunicaciones móviles, junto a las políticas de asignación fija del espectro radioeléctrico han reducido significativamente la cantidad de bandas de frecuencia disponibles para su licenciamiento (Hernández, Pedraza, Páez, & Rodríguez-Colina, 2015). Sin embargo, algunos estudios (Cabric, Mishra, & Brodersen, 2004; Valenta et al., 2010; Working, 2015) han demostrado que la mayoría de las bandas licenciadas del espectro radioeléctrico son subutilizadas en el dominio del tiempo y del espacio, lo que resulta en *oportunidades espectrales* (SO), las cuales son canales de frecuencia disponibles ya que no están siendo utilizados por los usuarios licenciados en el dominio tiempo-frecuencia. El uso del espectro se hace principalmente alrededor de ciertas bandas, mientras que una cantidad considerable del espectro está subutilizado. La Comisión Federal de Comunicaciones (FCC), de Estados Unidos, ha informado variaciones temporales y geográficas en el uso del espectro en un rango de 15 a 85 % (Working, 2015).

Con el objetivo de lograr un uso más eficiente del espectro, la tecnología de radio cognitiva (CR) propone realizar una asignación dinámica del espectro (DSA). Esto consiste en que usuarios no licenciados, también denominados usuarios

secundarios (SU) o usuarios de radio cognitiva, recurran a las SO en bandas de frecuencia licenciadas, las cuales son asignadas a usuarios licenciados, también denominados usuarios primarios (PU), sin interrumpir ningún proceso de estos últimos en dichas bandas. Para lograr lo anterior, la CR interactúa de forma dinámica con el entorno y realiza la modificación de los parámetros de funcionamiento necesarios, con el objetivo de aprovechar oportunamente el espectro no utilizado sin interferir con los PU (Haykin, 2005; Mitola y Maguire, 1999).

La SO (también denominados *espacios en blanco* o *huecos espectrales*) que el SU seleccionará para realizar su transmisión de información, es importante para garantizar la calidad de servicio en las redes de radio cognitiva (CRN). Cuando no se selecciona adecuadamente dicha SO, es posible que la transmisión de datos del SU deba pausarse, debido a que se hace necesario realizar un cambio de frecuencia por diversas razones; por ejemplo, que el canal está próximo a ser ocupado por un PU o que el canal tiene una baja calidad, entre otras. Esto provoca un aumento significativo del retardo que al final incide de forma directa en el nivel de desempeño y calidad de servicio de la comunicación del SU (Ian F. Akyildiz, Lee, & Chowdhury, 2009). De acuerdo con lo anterior, seleccionar un canal con las características requeridas sobre el cual un SU pueda continuar su sesión de transmisión de datos es un asunto apremiante en las CRN (Christian, Moh, Chung, & Lee, 2012). Una pobre

selección de canal puede causar múltiples *handoff* espectrales, degradando el desempeño de todo el conjunto (Christian et al., 2012; Hernandez, Salgado, López, & Rodriguez-Colina, 2015; Hernandez-Guillen, Rodriguez-Colina, Marcelín-Jiménez, & Chalke, 2012).

Este trabajo presenta una revisión sobre los algoritmos de asignación de espectro (SA) en CRN, y describe los algoritmos de SA (selección de frecuencia disponible u oportunidad espectral) más relevantes y su clasificación de acuerdo con la literatura actual. Los principales resultados de esta revisión determinan la importancia de una SA inteligente, teniendo en cuenta la carga de tráfico, el comportamiento del usuario, los niveles de interferencia, la caracterización del espectro, el tipo de aplicación y la necesidad de múltiples canales de frecuencia.

El resto del artículo está estructurado como sigue. En la sección “Radio cognitiva” se realiza una descripción del concepto de CR. En la “Algoritmos de asignación de espectro” se describen los algoritmos de SA para CRN más relevantes y su clasificación. En “Análisis comparativo” se realiza una comparación de los algoritmos de SA descritos en la sección anterior. En la sección “Desafíos de investigación” se mencionan algunos de los retos de

investigación en el área de la SA. Por último, se presentan las conclusiones.

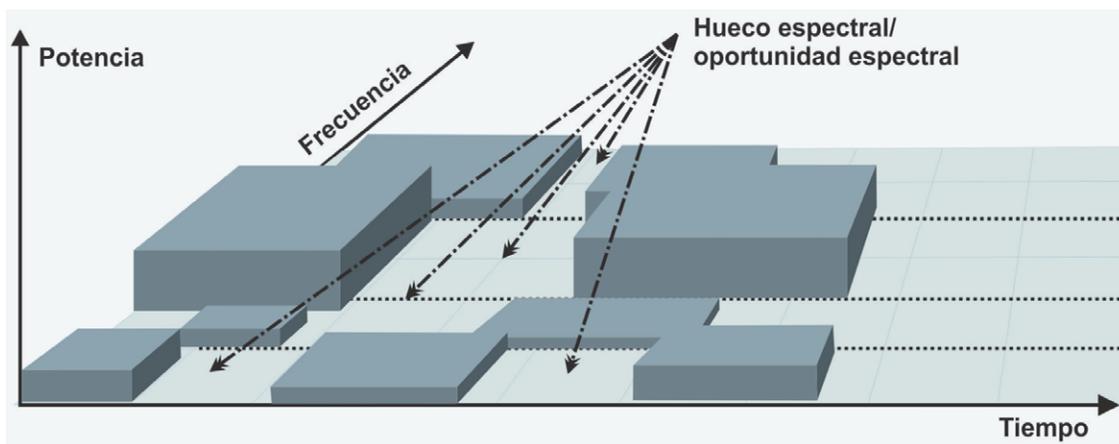
## RADIO COGNITIVA

De acuerdo con la Administración Nacional de la Información y las Comunicaciones (NTIA), de Estados Unidos, la RC es un radio o sistema que detecta su entorno electromagnético de operación y puede ajustar de forma dinámica y autónoma sus parámetros de operación de radio para modificar la operación del sistema, maximizar el rendimiento, reducir la interferencia y facilitar la interoperabilidad (Commission, 2003).

La RC tiene la capacidad de proveer ancho de banda a usuarios móviles, a través de arquitecturas inalámbricas heterogéneas, aumentando significativamente la eficiencia espectral, debido a que permite que el SU comparta el espectro de manera oportunista con el PU (Cabric et al., 2004), a partir de las SO, como se muestra en la figura 1.

### Ciclo cognitivo

La tecnología de RC en el contexto de DSA permitirá a los usuarios, 1) determinar qué porción del espectro está disponible y detectar la presencia de



**Figura 1.** Concepto de hueco espectral

**Fuente:** adaptada de (I F Akyildiz, Lee, Vuran, & Mohanty, 2008)

PU cuando un usuario opera en una banda con licencia (detección del espectro); 2) seleccionar el mejor canal disponible (decisión de espectro); 3) coordinar el acceso a este canal con otros usuarios (compartir el espectro), y 4) desocupar el canal cuando se detecta un PU (movilidad de espectro). Estas cuatro funciones conforman el ciclo cognitivo (figura 2) se describen a continuación (Ian F. Akyildiz, Lee, Vuran, & Mohanty, 2006; Ian F. Akyildiz et al., 2009; Dejonghe, Van Wesemael, Pavloski, & Chomu, 2011; Gavrilovska, Atanasovski, Macaluso, & Dasilva, 2013).

### Detección de espectro

En las bandas licenciadas los SU, solo pueden ser asignados a SO, donde no interfieran con los PU. Por tanto, es necesario que los SU estén monitoreando las bandas de espectro disponibles, capturando su información y después detectando dichas SO (Akyildiz, Lee y Chowdhury, 2009). Actualmente existen varias técnicas para la detección de espectro, las cuales se clasifican como se muestra en la figura 3, siendo la detección de energía la más básica de ellas.

### Decisión de espectro

Después de que las SO han sido identificadas, los SU deben seleccionar la más adecuada y lo más rápido posible para un esquema reactivo, mientras que para un esquema proactivo se puede tener en cuenta los requerimientos de calidad de servicio (QoS), políticas internas y posiblemente externas, debido a que puede esperar un tiempo mayor. Para tomar la anterior decisión se han desarrollado algoritmos que tienen en cuenta las características del canal de radio y el comportamiento estadístico de los PU, entre otros factores (Akyildiz, Lee y Chowdhury, 2009).

### Compartición de espectro

Debido a que múltiples SU pueden intentar acceder al espectro, la función de compartición de espectro proporciona la capacidad de compartir este recurso e información con múltiples SU, coordinando sus transmisiones para evitar colisiones e interferencias (Akyildiz, Lee, Vuran y Mohanty, 2006, 2008; Akyildiz, Lee y Chowdhury, 2009; Börjers y Dustmann, 2003; Christian, Moh, Chung y Lee, 2012; Federal Communications Commission,

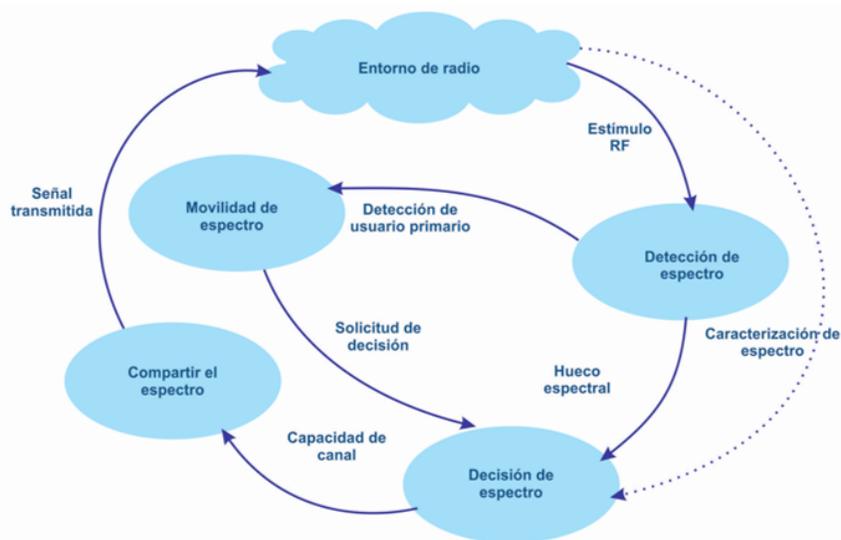
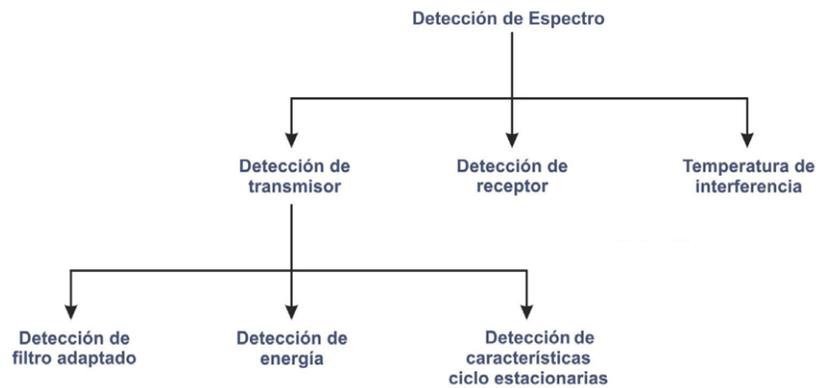


Figura 2. Ciclo cognitivo básico

Fuente: adaptado de (Börjers y Dustmann 2003).



**Figura 3.** Clasificación de las técnicas de monitorización de espectro

Fuente: adaptado de (Akyildiz, Lee y Chowdhury, 2009).

2003; Dejonghe, Van Wesemael, Pavloski y Chomu, 2011; Etkin, Parekh y Tse, 2007; Hernández, Giral y Santa, 2015; Hernández-Guillén, Rodríguez-Colina, marcelín-Jiménez y Chalke, 2012).

### Movilidad de espectro

Los SU son considerados *visitantes* en el espectro. Si los PU necesitan una parte específica del espectro o las condiciones del canal se deterioran, los SU deben dejar el canal de frecuencia que están utilizando y continuar su comunicación en otra SO (Akyildiz, Lee y Chowdhury, 2009). Esta función debe garantizar que se genere la movilidad lo más rápido posible.

### ALGORITMOS DE ASIGNACIÓN DE ESPECTRO

Una vez que todas las bandas de espectro disponibles se caracterizan, se debe seleccionar la banda del espectro que más se acerca a los requerimientos para la transmisión, teniendo en cuenta los requisitos de QoS y las características del espectro. Por tanto, la función de gestión del espectro debe conocer los requisitos de QoS del usuario. A partir de las necesidades de los usuarios se puede determinar la velocidad de datos, la tasa de error aceptable, el retardo permitido, el modo de transmisión y

el AB para la transmisión. Entonces, puede ser elegido el conjunto de bandas del espectro apropiado, de acuerdo con las reglas de decisión y los algoritmos que evalúan las posibles soluciones. En Zheng y Cao (2005), se presentan cinco reglas de decisión del espectro que se centran en la equidad y el costo de la comunicación. Sin embargo, este método asume que todos los canales tienen una capacidad de rendimiento similar (Akyildiz, Lee, Vuran y Mohanty, 2006). Lo ideal es ajustarse a los requerimientos que imponen las distintas aplicaciones. En Kanodia, Sabharwal y Knightly (2004) se propone un protocolo de saltos de canal de frecuencia oportunista para la búsqueda de un canal de mejor calidad, esta decisión del canal se basa en la SNR. Con el fin de tener en cuenta la actividad del PU, se toma en cuenta para la decisión del espectro el número de transferencias del espectro y lo que ocurre en una determinada banda del espectro (Krishnamurthy, Thoppian, Venkatesan y Prakash, 2005). La decisión de espectro constituye un tema importante que sigue abierto a la investigación.

Los tópicos más relevantes dentro de la SA para CRN son: 1) los criterios de decisión que se deben tener en cuenta para seleccionar una SO; 2) los enfoques que se deben tener en cuenta de acuerdo con las características de la red; 3) los algoritmos que seleccionan la SO con base en los criterios de decisión designados y el tipo de enfoque; 4)

las métricas de evaluación que estiman el nivel de desempeño de los algoritmos desarrollados; y 5) los desafíos de investigación que actualmente presenta el tema de la SA en CRN (figura 4).

En este trabajo se propone una clasificación de los algoritmos para la selección de las SO, la cual

agrupa los algoritmos de SA en seis clases: 1) toma de decisiones multicriterio (MCDM), 2) algoritmos inteligentes, 3) técnicas de aprendizaje, 4) funciones de decisión, 5) contexto y 6) estadísticos (figura 5).



**Figura 4.** Aspectos claves en la SA

**Fuente:** adaptado de (Tragos, Zeadally, Fragkiadakis y Siris 2013).



**Figura 5.** Clasificación de los algoritmos para la SA

**Fuente:** elaboración propia.

## Algoritmos para toma de decisiones multicriterio (MCDM)

El problema de SA tiene múltiples variables a analizar para seleccionar una sola SO, por tanto, los algoritmos basados en toma de decisiones multicriterio (MCDM) son ampliamente usados en este tipo de problemas, donde la relación entre los criterios de decisión son medidos a través de pesos que son ajustados según los requerimientos del diseñador. Al cabo de cierto número de iteraciones, el algoritmo determinará la mejor solución (Hernández, Giral y Páez, 2015a).

### Simple additive weighting (SAW)

Este algoritmo desarrolla una matriz de decisión conformada por atributos y alternativas, para cada intersección de la matriz el algoritmo asigna un peso de acuerdo con los criterios del diseñador. Esto permite establecer una calificación para las SO evaluadas, y obtener así un ranking de todas las alternativas. La SO con mayor puntaje será la seleccionada (Hernández, Giral y Páez, 2015a; Ramírez y Ramos, 2010).

La alternativa  $A_i$  está definida por la ecuación 1 (Ramírez y Ramos, 2013).

$$u_i = \sum_{j=1}^M \omega_j r_{i,j} \quad \forall i \in 1, \dots, N \quad (1)$$

Donde  $r_{i,j}$  pertenece a la matriz y la suma de los pesos es 1.

Los pasos para desarrollar este algoritmo son: 1) identificar los objetivos y alternativas; 2) evaluar las alternativas; 3) determinar los pesos de cada combinación; 4) adicionar los valores agregados según las preferencias, y 5) analizar la sensibilidad (Hernández, Giral y Páez, 2015a; Hübner, 2007; Ramírez y Ramos, 2010, 2013).

Hernández, Giral y Santa (2015) utilizan SAW para seleccionar la mejor SO en una banda de frecuencia GSM, de esta manera evalúan la cantidad de *handoff* realizados y comparando los resultados con otros dos algoritmos de SA.

### Multiplicative exponent weighting (MEW)

MEW es otro algoritmo MCDM, muy similar a SAW. La principal diferencia es que en MEW en lugar de suma hay multiplicación. Fue propuesto para SA por Stevens y Wong (2006). En MEW la calificación de las SO es determinada por el producto de los pesos de los criterios de decisión. El puntaje  $S_i$  de la SO  $i$  es determinada por la ecuación 2 (Hernández, Giral y Páez, 2015a; Hernández, Giral y Santa, 2015; Hübner, 2007; Ramírez y Ramos, 2010, 2013; Stevens, Martínez y Pineda, 2012; Stevens y Wong, 2006).

$$S_i = \prod_{j \in N} x_{ij}^{w_j} \quad (2)$$

Donde  $x_{ij}$  denota el criterio  $j$  de la SO  $i$ ,  $w_j$  denota el peso del criterio  $j$ , y  $\sum_{j=1}^N w_j = 1$ .

Es necesario tener en cuenta que en (2)  $w_j$  es una potencia positiva para una métrica de beneficio y negativa para una métrica de costo.

Hernández, Giral y Páez (2015b) utilizan MEW para seleccionar la mejor SO en una banda de frecuencia de comunicaciones móviles; evalúan el nivel de *throughput* y ancho de banda, y comparan los resultados con otros dos algoritmos de SA.

### Elimination and choice expressing the reality (ELECTRE)

Electre es un MCDM que realiza comparaciones entre parejas de alternativas, para lo cual utiliza cada uno de los atributos por separado para establecer relaciones entre las alternativas (Valenta *et al.*, 2010). Se propuso inicialmente para la SA en (Christian, Moh, Chung y Lee, 2012). En general, Electre utiliza un vector de criterios de referencia para ajustar los valores iniciales de los atributos de las alternativas (oportunidades espectrales) antes de compararlas. El valor de cada uno de los criterios en la matriz de decisión se compara con el correspondiente valor de criterio de referencia  $x_j^{ref}$ . La diferencia entre los dos valores se calcula de acuerdo con la ecuación 3 (Stevens, Martínez y Pineda, 2012).

$$r_{ij} = |x_{ij} - x_j^{ref}| \quad (3)$$

Con el objetivo de comparar las alternativas espectrales, se introducen los conceptos de *concordancia* y *discordancia*, que son medidas de satisfacción e insatisfacción del algoritmo cuando una alternativa es comparada con otra. La alternativa con el valor más alto de concordancia neta y el valor más bajo de discordancia neta será la preferida (Stevens, Martínez y Pineda, 2012).

### Grey relational analysis (GRA)

El objetivo de este algoritmo es establecer las redes candidatas y seleccionar las que tengan más alta puntuación de acuerdo con unos parámetros definidos. Para lograr esto se establecen relaciones de Grey entre elementos de dos series: la primera contiene las mejores cualidades, mientras que la otra contiene entidades comparativas. Acá es parte importante el coeficiente de Grey, que se usa para describir las relaciones entre las series, calculado a partir del nivel de similitud y variabilidad (Hernández, Giral y Páez, 2015b; Hernández, Giral y Santa, 2015; Hernández, Páez y Giral, 2015; Hübner, 2007; Ramírez y Ramos, 2010, 2013; Stevens, Martínez y Pineda, 2012; Stevens y Wong, 2006).

En GRA primero se genera el vector de referencia  $X_0$ , de la matriz  $X$ , a través de la escogencia de los valores mínimos para los costos y los valores máximos para los criterios de beneficios. Después, la secuencia de datos debe ser normalizada para  $X$  de acuerdo con tres situaciones: más grande el mejor, más pequeño el mejor o nominal el mejor. Luego, se calcula el coeficiente relacional de Grey como lo describe la ecuación 4 (Hernández et al., 2015).

$$\gamma(x_0(i), x_j(i)) = \frac{\Delta_{min} + \zeta \Delta_{max}}{\Delta_{0,j}(i) + \zeta \Delta_{max}} \quad (4)$$

Donde,

$$\Delta_{0,j} = |x_0(i) - x_j(i)|$$

$$\Delta_{min} = \min_{j \in N} \left\{ \min_{i \in M} \{|x_0(i) - x_j(i)|\} \right\}$$

$$\Delta_{max} = \max_{j \in N} \left\{ \max_{i \in M} \{|x_0(i) - x_j(i)|\} \right\}$$

Hernández et al. (2015) utilizan GRA para seleccionar la mejor SO en el enlace ascendente de la banda de frecuencia GSM, evalúan el nivel de bloqueos de *handoff* y comparan los resultados con otros dos algoritmos de SA.

### Technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS)

El desarrollo de este algoritmo se basa en la determinación de dos componentes: la solución ideal del sistema, y la solución que no puede ser aceptada en ninguna situación. Para lograrlo, es necesario comparar los resultados para determinar qué solución es la más cercana posible a la ideal, y cual la más lejana (la cual no será aceptada). Dicha métrica se obtiene a partir de la distancia euclidiana (Hernández, Giral y Páez, 2015a; Ramírez y Ramos, 2010).

El procedimiento del algoritmo Topsis se describe en Hernández, Giral y Páez (2015a); Ramírez y Ramos (2010, 2013). Inicialmente se construye la matriz de decisión  $X$  y se normaliza usando el método de raíz cuadrada, luego se determina la solución ideal y la peor solución. Después, para cada alternativa se calcula la distancia euclidiana  $D$ , y por último, las alternativas son organizadas en orden descendente de acuerdo con el índice de preferencia dado por la ecuación 5.

$$C_i^+ = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}, \quad i = 1, \dots, N. \quad (5)$$

Hernández, Vasquez y Páez (2015) utilizan Topsis para seleccionar la mejor SO, evalúan el nivel de interferencia por canal adyacente y el número promedio de *handoff* realizados; los resultados son comparados con otro algoritmo y sus respectivas versiones, al combinarlos con tres algoritmos de predicción basados en series de tiempo.

### Multi-criteria optimization and compromise solution (VIKOR)

“El método Vikor asume que cada alternativa es evaluada de acuerdo con cada función de criterio, y la clasificación puede ser desarrollada a

través de la comparación de las medidas que estén más cercanas a la alternativa ideal” (Hernández et al., 2015; Cesar Hernández, Vasquez, et al., 2015; Tanino, Tanaka y Inuiguchi, 2003). Vikor fue desarrollado para lograr la optimización de sistemas complejos con múltiples criterios, por tanto, es hábil para determinar el compromiso en una lista de *ranking*, aun en presencia de criterios en conflicto, lo que lo hace un algoritmo adecuado para la toma de decisiones en la SA (Gallardo, Pineda y Stevens, 2009).

El algoritmo Vikor sigue los pasos descritos por Hernández, Giral y Páez (2015b); Hernández et al. (2015); Ramírez y Ramos (2010), y Stevens, Martínez y Pineda (2012). Para cada criterio de decisión se determina el mejor y peor valor teniendo en cuenta si son beneficios o costos. Luego se calculan los valores de  $Q_i$  para  $i= 1, 2, 3, \dots, M$ , dado por la ecuación 6.

$$Q_i = \gamma \left( \frac{S_i - S^+}{S^- - S^+} \right) + (1 - \gamma) \left( \frac{R_i - R^+}{R^- - R^+} \right) \quad (6)$$

Dados los valores de  $Q$  para todos los  $i$  pertenecientes a  $M$ , se clasifican de mayor a menor las SO candidatas. Finalmente, la SO seleccionada está dada por el  $Q$  óptimo.

Hernández et al. (2015) utilizan Vikor para seleccionar la mejor SO en el enlace ascendente de la banda de frecuencia GSM, evalúan el nivel de bloqueos de *handoff* y comparan los resultados con otros dos algoritmos de SA.

#### Analytical hierarchical process (AHP)

AHP se basa en comparaciones sobre la importancia entre los criterios de decisión escogidos para la selección de una alternativa, siendo esta más una medida relativa que un valor absoluto (Saaty, 1990).

En la metodología de diseño del algoritmo AHP, el primer paso es definir el problema, descomponiéndolo a su vez en objetivo, criterios y alternativas. El segundo paso es la construcción de la jerarquía de acuerdo con la definición del problema.

Una vez construida la jerarquía se procedió a realizar las matrices de juicios, las cuales corresponden a evaluaciones comparativas que definen el nivel de importancia relativa entre cada combinación posible de parejas de criterios. Con las matrices de juicios definidas se procede, por último, a calcular los pesos normalizados para cada criterio, como lo describe la ecuación 7 (Hernández, Giral y Páez, 2015a).

$$r = [r_1, r_2, \dots, r_n] \text{ con } r_i = \frac{v_i}{\sum_{j=1}^n v_j} \quad (7)$$

Donde,

$r$  es el vector de valores propios,

$r_1, r_2, \dots, r_n$  es el valor de los pesos de cada subcriterio,

$V_i$  es la media geométrica de la fila  $i$ , y

$V_j$  es la media geométrica de la columna  $j$ .

Hernández, Giral y Páez (2015a) utilizan AHP para seleccionar la mejor SO en la banda de frecuencia GSM, calculan el desempeño del algoritmo con base en cinco métricas de evaluación y comparan los resultados con otros cinco algoritmos de SA.

#### Fuzzy analytical hierarchical process (FAHP)

La lógica difusa es una herramienta particularmente apropiada para tomar decisiones en situaciones donde las entradas disponibles son en general inciertas e imprecisas o cualitativamente interpretadas. La lógica difusa también puede transformar información cualitativa y heterogénea en valores de membrecía homogéneos, los cuales pueden ser procesados a través de un conjunto de reglas de inferencia difusa apropiadas (Akyildiz, Lee, Vuran y Mohanty, 2006, 2008; Akyildiz, Lee y Chowdhury, 2009; Federal Communications Commission, 2003; Dejonghe, Van Wesemael, Pavloski y Chomu, 2011; Etkin, Parekh y Tse, 2007; Gallardo, Pineda y Stevens, 2009; Giupponi y Pérez, 2008; Hernández et al., 2015; Hernández, Giral y Páez, 2015a, 2015b; Hernández, Giral y Santa, 2015; Hernández, Vasquez y Páez, 2015; Hübner, 2007; Kano-dia, Sabharwal y Knightly, 2004; Krishnamurthy,

Thoppian, Venkatesan y Prakash, 2005; Ramírez y Ramos, 2010, 2013; Saaty, 1990; Stevens, Martínez y Pineda, 2012; Stevens y Wong, 2006; Tanino, Tanaka y Inuiguchi, 2003; Tragos, Zeadally, Fragkiadakis y Siris, 2013; Zheng y Cao, 2005). Estas ventajas de la lógica difusa se combinan con el algoritmo AHP, obteniendo el método FAHP (Cortés, Serna y Jaimes, 2012; Patil y Kant, 2014).

Aunque el método FAHP tenga en esencia la misma metodología del algoritmo AHP, la lógica difusa ayuda a tratar la subjetividad y la incertidumbre en las evaluaciones de criterios, ya que con la lógica difusa, mediante un proceso matemático, permite utilizar un rango en la respuesta en lugar de un número puntual (Akyildiz, Lee, Vuran y Mohanty, 2006, 2008; Akyildiz, Lee y Chowdhury, 2009; Federal Communications Commission, 2003; Dejonghe, Van Wesemael, Pavloski y Chomu, 2011; Etkin, Parekh y Tse, 2007; Gallardo, Pineda y Stevens, 2009; Giupponi y Pérez, 2008; Hernández *et al.*, 2015; Hernández, Giral y Páez, 2015a, 2015b; Hernández, Giral y Santa, 2015; Hernández, Vasquez y Páez, 2015; Hübner, 2007; Kanodia, Sabharwal y Knightly, 2004; Krishnamurthy, Thoppian, Venkatesan y Prakash, 2005; Ramírez y Ramos, 2010, 2013; Saaty, 1990; Stevens, Martínez y Pineda, 2012; Stevens y Wong, 2006; Tanino, Tanaka y Inuiguchi, 2003; Tragos, Zeadally, Fragkiadakis y Siris, 2013; Zheng y Cao, 2005). En el algoritmo FAHP, después de la normalización, el vector de pesos está dado por la ecuación (8).

$$W = (d_1, d_2, \dots, d_n)^T = \left( \frac{d'_1}{\sum_{i=1}^n d'_i}, \frac{d'_2}{\sum_{i=1}^n d'_i}, \dots, \frac{d'_n}{\sum_{i=1}^n d'_i} \right) \quad (8)$$

Recientemente el algoritmo FAHP ha sido utilizado ampliamente para resolver problemas de decisión multicriterio en varias aéreas. Hernandez, Pedraza, Páez y Rodríguez (2015) utilizan FAHP para realizar SA en CRN.

## Algoritmos inteligentes

La inteligencia artificial tiene como objetivo hacer que las maquinas realicen tareas de una manera

similar a un experto. La máquina inteligente percibirá la toma de decisiones y de esta manera maximizará su propia utilidad (Woods, 1986). De tal manera, esta tendrá que prever los principales desafíos como la deducción, el razonamiento, la representación de las problemáticas para finalmente dar solución a los problemas como fuente de entradas principales de estudio (Abbas, Nasser y Ahmad, 2015).

En relación a la CR, los principales retos para las subáreas de la inteligencia artificial son: la detección de la frecuencia disponible de radio, la calidad del canal de comunicación, el reconocimiento, la predicción y anticipación en la toma de decisiones y, por último, pero no menos importante, la decisión sobre la asignación de recursos para el ajuste de errores de transmisión y recepción de datos (Abbas, Nasser y Ahmad, 2015).

### Lógica difusa

La lógica difusa resulta ser una posición relativa desde el observador principal, sin embargo, las conclusiones de la técnica están respaldadas por métricas iniciales que describen el conjunto de valores admisibles de una muestra. De tal manera, la lógica difusa aunque con una tasa de estudio aleatoria permite obtener valores diferentes a los supuestos de verdadero o falso (Gavrilovska, Atanasovski, Macaluso y Dasilva, 2013).

La lógica difusa proporciona al sistema, razonamiento aproximado mediante conjuntos de reglas, teniendo la capacidad de obtener condiciones de incertidumbre mediante la predicción de consecuencias, además de la capacidad de adaptarse a nuevas situaciones (Abbas, Nasser y Ahmad, 2015; Dadios, 2012; Gavrilovska, Atanasovski, Macaluso y Dasilva, 2013).

Diferentes investigaciones (Abbas, Nasser y Ahmad, 2015; Hernandez, Pedraza, Páez y Rodríguez, 2015; Matinmikko, Del Ser, Rauma y Mustonen, 2013) han aplicado la teoría de lógica difusa en la CR para resolver los problemas en función de la asignación del ancho de banda, estudiando de antemano la interferencia y la administración de

la energía, los anteriores como métodos de evaluación en la correcta SA. No obstante, diferentes resultados de estudios han detallado tópicos como la inferencia difusa centralizada, que asigna los anchos de banda correspondientes a la intensidad de tráfico y la prioridad del servicio. Así pues, esta última detalla cómo los SU tienen que presentar solicitudes de ancho de banda al administrador primario de la red (Abbas, Nasser y Ahmad, 2015). Del mismo modo el administrador analiza el tráfico desde la cola y verifica los retardos producidos por la demora en la transmisión de paquetes. En otras palabras se determina la latencia para el acceso a SU (Abbas, Nasser y Ahmad, 2015).

### *Algoritmos genéticos*

Su principal campo de acción se encuentra inmerso en la optimización y búsqueda de soluciones, inspirado en la evolución genética y la selección natural de las especies por naturaleza (Goldberg y Holland, 1988). Los algoritmos evolutivos forman parte de las ciencias de la computación y su principal enfoque está determinado en la inteligencia artificial; siguiendo la terminología de la teoría de la evolución. Así pues, es común encontrar definiciones de los cromosomas y funciones de aptitud como descriptores de un algoritmo genético, en donde los cromosomas, son representaciones abstractas de las soluciones candidatas y la función de aptitud está estrechamente relacionada con el objetivo del algoritmo para los procesos de optimización (He *et al.*, 2010).

La ventaja de utilizar algoritmos genéticos para solucionar el problema de optimización de la SA en CR es que pueden manejar restricciones y objetivos de forma arbitraria, por ejemplo, las soluciones ineficientes son simplemente descartadas por el algoritmo. Del Ser, Matinmikko, Gil y Mustonen, 2010) se utiliza la técnica *búsqueda de armonía* para encontrar la asignación de canal óptima. El algoritmo genético construye un vector de asignación de canales (llamados *armonías*); inicialmente se realizan combinaciones y mutaciones de forma inteligente y, luego, en la evaluación se almacenan

las mejores armonías (Tragos, Zeadally, Fragkiadakis y Siris, 2013).

### *Sistemas multiagentes*

Los sistemas multiagente (MAS) se consideran una entidad inteligente y consciente del entorno que es capaz de actuar hábilmente y genera comunicación de forma independiente. MAS está relacionado con el ambiente, los objetivos, otros agentes y las diferentes relaciones entre esas entidades, por lo que los MAS son rápidos, confiables y flexibles (Abbas, Nasser y Ahmad, 2015; Ferber, 1999; Wooldridge, 2009).

Trigui, Esseghir y Merghem (2012) se introdujo un concepto novedoso para direccionar el “espectro de transición” en CR, permitiendo a los terminales cambiar a un *banda espectral* que ofrezca mejores condiciones mediante una negociación usando MAS. Mir, Esseghir y Gaiti (2011) usaron MAS para compartir dinámicamente el espectro en CR. De acuerdo con las necesidades de SU, los agentes SU cooperan y comunican con los agentes PU para compartir el espectro.

### *Colonia artificial de abejas*

La colonia artificial de abejas (ABC) está compuesta por tres grupos: *abejas empleadas*, *abejas exploradoras* y *abejas observadoras*. El objetivo es determinar las ubicaciones de las mejores fuentes de alimento, para ello las *abejas empleadas* buscarán las fuentes de alimento y si la cantidad de néctar de la nueva fuente es mayor que una anterior, esta memorizará las nuevas posiciones, olvidándose de la anterior. Las abejas empleadas son iguales al número de fuentes de alimento, las abejas observadoras comparten la información de las fuentes de alimento y las abejas exploradoras buscan nuevas fuentes de alimentos, abandonando la propia (Tragos, Zeadally, Fragkiadakis y Siris, 2013).

Cheng y Jiang (2011) el problema de SA se resuelve utilizando el algoritmo ABC, la ubicación de una abeja o espectador representa una posible asignación de canal y la cantidad de néctar es la utilidad que se maximiza.

## Técnicas de aprendizaje autónomo

El aprendizaje autónomo tiene como objetivo principal el autoaprendizaje computacional, en el que las técnicas de análisis pueden ser programadas de forma autónoma a través de la inducción del conocimiento, y donde la información objeto de estudio está disponible a partir de grandes conjuntos de datos, dispuestos a ser analizados para la consecución objetiva de resultados (Abbas, Nasser y Ahmad, 2015).

### *No supervisado*

El aprendizaje no supervisado puede ser adecuado para las CR que operen en entornos desconocidos de radiofrecuencia (Jayaweera y Christodoulou, 2011). Para este caso, los algoritmos de aprendizaje sin supervisión autónoma permiten la exploración de las características del entorno y toman acciones por sí mismos sin tener ningún conocimiento previo (Jayaweera y Christodoulou, 2011). Sin embargo, si la CR tiene información previa sobre el medio ambiente, puede aprovechar este conocimiento mediante el uso de técnicas de aprendizaje supervisado (Bkassiny, Li y Jayaweera, 2013).

Aprendizaje por refuerzo: Es una técnica que permite a un agente modificar su comportamiento mediante la interacción con su entorno (Sutton y Barto, 1998). Esta herramienta puede ser utilizada por los agentes para aprender de forma autónoma y sin supervisión. En este caso, la única fuente de conocimiento es la retroalimentación que un agente recibe de su entorno después de ejecutar una acción. Dos características principales caracterizan el aprendizaje por refuerzo: 1) ensayo y error y 2) recompensa retardada. Por ensayo y error se supone que un agente no tiene ningún conocimiento previo sobre el medio ambiente, y ejecuta acciones ciegamente con el fin de explorar el entorno. La recompensa retardada es la señal de realimentación que un agente recibe del entorno después de la ejecución de cada acción (Bkassiny, Li y Jayaweera, 2013).

El aprendizaje por refuerzo ha sido incorporado en la CR específicamente en las telecomunicaciones móviles. Abbas, Nasser y Ahmad (2015) muestran la capacidad de implementar un sistema de errores y recompensas en función de cada decisión, optimizando el desempeño en la toma de decisiones para la administración del espectro electromagnético.

Teoría de juegos: Es una herramienta matemática que pretende modelar el comportamiento de entidades racionales en un entorno conflictivo (Fudenberg y Tirole, 1991). En las comunicaciones inalámbricas, la teoría de juegos se ha aplicado a las redes de comunicación de datos, para modelar y analizar encaminamiento y la asignación de recursos en entornos competitivos (Bkassiny, Li y Jayaweera, 2013).

La teoría de juegos es utilizada como una herramienta en la que varios jugadores se enfrentan a una serie de situaciones en donde deben tomar medidas que, en la mayoría de los casos, pueden afectar los intereses de los otros (Abbas, Nasser y Ahmad, 2015). Una ventaja clave de la aplicación de soluciones de teoría de juegos a los protocolos CR es en la reducción de la complejidad de los algoritmos de adaptación en grandes CRN (Bkassiny, Li y Jayaweera, 2013). En la literatura actual existen varios trabajos sobre la aplicación de la teoría de juegos en la CR (Ji y Liu, 2007; Nisan, Roughgarden, Tardos y Vazirani, 2007; Zhao, Mao, Neel y Reed, 2009).

### *Supervisado*

El aprendizaje supervisado se usa cuando los datos de entrenamiento están etiquetados, es decir, se conoce información *a priori* acerca del ambiente. Algoritmos de entrenamiento, como árboles de decisión, redes neuronales, máquinas de soporte vectorial y razonamiento basado en casos funcionan bien para este tema. Difieren ellos mismos en sus fortalezas y limitaciones, desafíos y aplicaciones referentes a la CR (Abbas, Nasser y Ahmad, 2015).

Redes neuronales: Las redes neuronales se asemejan al cerebro en dos aspectos (Haykin, 1998):

1) el conocimiento es adquirido por la red de su entorno a través de un proceso de aprendizaje, y 2) las fuerzas de conexión interneuronas, conocidas como *pesos sinápticos*, se utilizan para almacenar el conocimiento adquirido. Algunas de las capacidades y ventajas de las redes neuronales incluyen el modelado de comportamientos no lineales y la capacidad de adaptación ante cambios pequeños, y su principal desventaja es la necesidad de realizar un entrenamiento bajo diferentes condiciones del entorno (Bkassiny, Li y Jayaweera, 2013).

Taj y Akil (2011) presentan una metodología para predecir el comportamiento del espectro. La actividad del PU es modelada a través de una serie de tiempo caótica multivariable, la cual se convierte en una entrada a la red neuronal, y esta última predice la evolución de la serie de tiempo para decidir si el SU puede ocupar una SO determinada (Bkassiny, Li y Jayaweera, 2013).

*Máquina de soporte vectorial (MSV)*: Las máquinas de soporte vectorial son el conjunto de algoritmos que tienen la capacidad de aprender bajo la supervisión de un agente de *software*. Su principal modo de operación está en función de la regresión y la clasificación en el aprendizaje. Esta técnica es utilizada para llegar a márgenes de clasificación en un conjunto de datos, por tanto, el principal objetivo de las MSV consiste en establecer un modelo de predicción en donde una entrada incierta puede ser identificada en una categoría u otra (Abbas, Nasser y Ahmad, 2015; Bkassiny, Li y Jayaweera, 2013; Dadios, 2012; Del Ser, Matinmikko, Gil y Mustonen, 2010; Ferber, 1999; Fudenberg y Tirole, 1991; Goldberg y Holland, 1988; Han, Kamber y Pei, 2011; He *et al.*, 2010; Ji y Liu, 2007; Matinmikko, Del Ser, Rauma y Mustonen, 2013; Mir, Esseghir y Gaiti, 2011; Nisan, Roughgarden, Tardos y Vazirani, 2007; Sutton y Barto, 1998; Taj y Akil, 2011; Trigui, Esseghir y Merghem, 2012; Wooldridge, 2009; Zhao, Mao, Neel y Reed, 2009).

En la literatura actual existen varios trabajos (Petrova, Mahonen y Osuna, 2010; Xu y Lu, 2006) sobre la aplicación de las máquinas de soporte vectorial en la CR.

## Funciones de decisión

En las redes heterogéneas con facilidades de acceso ubicuo, los procesos de decisión y selección se hacen más complejos debido a que las diferentes tecnologías de acceso, por lo general, ofrecen diferentes características. De acuerdo con lo anterior, la SA llega a ser un problema con múltiples criterios y parámetros que incluyen complejos *trade-offs* entre criterios contradictorios. En estos casos resulta útil la aplicación de funciones de beneficio o costo (Ahmed, Boulahia y Gaiti, 2014).

### Función de utilidad

La función de utilidad tiene por objetivo maximizar la satisfacción del usuario de acuerdo con ciertos parámetros y restricciones. En la SA y de gestión de decisiones, la utilidad mide el nivel de satisfacción del usuario correspondiente a un conjunto de características de una red inalámbrica, incluyendo los parámetros de recursos asignados (Ahmed, Boulahia y Gaiti, 2014). Ormond, Murphy y Muntean (2006) examinan el nivel de satisfacción del usuario mediante el empleo de una función de utilidad para aplicaciones de mejor esfuerzo.

### Función de costo

La función de costo a diferencia de la función de utilidad busca minimizar el costo de ciertos parámetros teniendo en cuenta las restricciones del caso. En una SO el costo total se calcula mediante la suma del costo de los parámetros de interés como, calidad de servicio, ancho de banda, retardo y probabilidad de disponibilidad, entre otras (Ahmed, Boulahia y Gaiti, 2014). Wei, Li, Song y Song (2008) presentan una aplicación de la función de costo.

## Estadísticos

Existe otro tipo de técnicas que también se han utilizado para la SA en CRN, las cuales están basadas en conceptos de estadística y probabilidad, como las redes bayesianas, las cadenas de Markov y los árboles de decisión.

### Redes bayesianas

Las redes bayesianas son *modelos probabilísticos gráficos* que dependen de la interacción de diferentes nodos para así generar aprendizaje en cada nodo involucrado en el proceso; mediante el enfoque bayesiano, que es una técnica de aprendizaje probabilístico, se proveen inferencias exactas y se estiman modelos de probabilidad completa donde el conocimiento a priori o los resultados sean usados para construir un modelo actualizado (Bolsstad, 2007; Yonghui, 2010).

Jiang, Chen y Liu (2014) usan un *enfoque cooperativo* para estimar el *estado del canal* usando aprendizaje bayesiano para resolver problema de detección *multicanal*.

### Cadenas de Markov

Los modelos de Markov (*Markov chain analysis*, MCA) son usados para modelar procesos aleatorios que cambian de un estado a otro en el tiempo. Son procesos aleatorios donde el estado futuro depende del estado presente y dichos estados son visibles al observador, en contraste con los modelos ocultos de Markov (*hidden Markov models*, HMM), dichos estados no son visibles (Fraser, 2008). Estas cadenas generan *secuencias de observaciones* entre transiciones de estado, ya sea en el tiempo o en el espacio, con probabilidades fijas. El estado actual depende de los eventos previos, y sus estructuras determinan el éxito del proceso. Puede asignársele un solo paso o ser extendida a las probabilidades asociadas con cada una de las transiciones dependientes en múltiples eventos que lo preceden (Abbas, Nasser y Ahmad, 2015).

Yifei *et al.* (2013) usaron toma de decisiones de Markov para el DSA en CRN. Usaron HMM (cadenas ocultas de Markov) en un canal inalámbrico y predijeron el estado del canal. Las decisiones estuvieron basadas en *sensibilidad espectral, selección de canal, modulación y esquemas de codificación, potencia transmitida*. Pham *et al.* (2014) utilizaron el *handoff* de espectro, el cual ocurre cuando un SU requiere cambiarse a un nuevo canal disponible debido a las transmisiones continuas de los

datos cuando el PU necesita de ese canal, por lo que el SU requiere estudiar el comportamiento del PU y predecir sus futuros comportamientos para asegurar la transmisión.

### Arboles de decisión

Los árboles de decisión son un modelo que predice el valor de una *clase objetivo*, basada en diversidad de variables de entrada. En un árbol de decisión cada nodo tiene un *atributo*, cada rama representa el *resultado de una prueba* y cada *hoja* representa la etiqueta de una clase. Cada hoja contiene información de *la etiqueta de clase* (Abbas, Nasser y Ahmad, 2015; Ahmed, Boulahia y Gaiti, 2014; Bkassiny, Li y Jayaweera, 2013; Bolsstad, 2007; Cheng y Jiang, 2011; Del Ser *et al.*, 2010; Ferber, 1999; Fraser, 2008; Fudenberg & Tirole, 1991; Gavrilovska *et al.*, 2013; Goldberg y Holland, 1988; Han, Kamber y Pei, 2011; Haykin, 1998; He *et al.*, 2010; Ji y Liu, 2007; Jiang, Chen y Liu, 2014; Matinmikko, Del Ser, Rauma y Mustonen, 2013; Mir, Esseghir y Gaiti, 2011; Nisan, Roughgarden, Tardos y Vazirani, 2007; Ormond. Murphy y Muntean, 2006; Petrova, Mahonen y Osuna, 2010; Pham *et al.*, 2014; Safavian y Langdgrebe, 1991; Sutton y Barto, 1998; Taj y Akil, 2011; Trigui, Esseghir y Merghem, 2012; Wooldridge, 2009; Xu y Lu, 2006; Yifei *et al.*, 2013; Yonghui, 2010; Zhao, Mao, Neel y Reed, 2009).

## ANÁLISIS COMPARATIVO

La tabla 1 resume el análisis comparativo de las diferentes técnicas para la SA en CRN, en términos de fortalezas y limitaciones.

## DESAFÍOS DE INVESTIGACIÓN

Existen varias cuestiones de investigación abiertas que necesitan ser estudiadas para el desarrollo de la función de decisión del espectro, algunas de ellas se mencionan a continuación (Akyildiz, Lee, Vuran y Mohanty, 2006).

**Tabla 1.** Análisis comparativo de las técnicas de SA

ALGORITMO	FORTALEZAS	LIMITACIONES
MCDM	Simplicidad. Fácil implementación. Respuesta rápida.	No hay una metodología analítica para estudiar su convergencia.
Lógica difusa	Decisiones rápidas basadas en reglas predefinidas. Técnicas de aprendizaje pueden mejorar la calidad de las decisiones.	Funcionalidad limitada ya que las reglas son predefinidas. Necesita un gran número de reglas para considerar todos los parámetros.
Algoritmos genéticos	Tiene optimización multiobjetivo. Se configura dinámicamente dado los cambios del entorno.	Requiere conocimiento previo del sistema. Proceso lento para encontrar una solución óptima.
Sistemas multiagentes	Adecuados para problemas con múltiples jugadores. Aprendizaje y cooperación.	La complejidad y el costo computacional pueden llegar a ser altos.
Colonia artificial de abejas	Búsqueda de soluciones en paralelo.	Requiere de conocimiento a priori del sistema. Requiere una función de aptitud.
Aprendizaje por refuerzo	Aprendizaje autónomo usando retroalimentación y autoadaptación progresiva en tiempo real.	Necesita reglas de derivación por lo que la exactitud está basada en dichas reglas.
Teoría de juegos	Reduce la complejidad de la adaptación. Soluciones por medio de múltiples agentes. Enfoque cooperativo y no cooperativo.	Requiere conocimiento previo de diferentes parámetros del sistema y que los datos de entrenamiento estén etiquetados.
Redes neuronales	Habilidad para adaptarse a los cambios menores. Excelente para clasificación. Puede identificar nuevos patrones.	El entrenamiento puede ser lento dependiendo del tamaño de la red. Poca capacidad para generalizar. Puede sufrir de sobreentrenamiento. Datos previos.
Máquinas de soporte vectorial	Capacidad de generalizar. Robustez contra el ruido de entrada y casos diferentes. Mejor desempeño con poco entrenamiento en comparación con las redes neuronales.	Requiere que los datos de entrenamiento estén etiquetados. Hay que tener previo conocimiento del funcionamiento del sistema. Se vuelve complejo a medida que el problema es más grande.
Funciones de utilidad y costo	Permite encontrar óptimos con múltiples parámetros y restricciones.	Requiere que todos los parámetros estén modelados con una función analítica.
Redes bayesianas	Se basa en modelos probabilísticos.	Requiere de conocimiento a priori del sistema. Presenta complejidad computacional.
Modelos de Markov	Se basa en modelos estadísticos y es fácilmente escalable. Puede predecir basado en la experiencia.	Requiere de conocimiento previo del sistema. Presenta complejidad computacional.
Árboles de decisión	Simplicidad. Toma de decisiones mediante las configuraciones de sus ramas.	Requiere de conocimiento previo del sistema. Puede sufrir sobreentrenamiento y requiere que los datos de entrenamiento estén etiquetados.

**Fuente:** tomada de (Bkassiny, Li y Jayaweera, 2013; He et al., 2010; Tragos, Zeadally, Fragkiadakis y Siris, 2013; Yifei et al., 2013).

## Modelo de decisión multivariado

La relación señal a ruido (SNR) no es suficiente para caracterizar las bandas espectrales en las CRN. Además de la SNR, muchos parámetros de caracterización del espectro afectan la calidad. Por tanto, la manera de combinar estos parámetros de caracterización del espectro para el modelo de decisión del espectro sigue siendo un cuestionamiento abierto.

## Algoritmos adaptativos

Para plantear soluciones eficientes en la SA, es necesario desarrollar algoritmos que logren adaptarse a diversas condiciones y escenarios, con el objetivo de satisfacer los requisitos de un entorno altamente dinámico. Todos los algoritmos hasta ahora se centran en un escenario y red estáticos, y tratan de encontrar una solución óptima de acuerdo con algunos criterios (Tragos, Zeadally, Fragkiadakis y Siris, 2013).

## Selección multicanal

En las CRN se pueden utilizar simultáneamente múltiples bandas del espectro para la transmisión. Por otra parte, las CRN no requieren que las múltiples bandas seleccionadas sean contiguas. De este modo, un SU puede enviar paquetes a través de bandas del espectro no contiguas. Esta transmisión sobre múltiples bandas muestra menos degradación de calidad durante el *handoff* espectral en comparación con la transmisión convencional sobre una sola banda del espectro (Akyildiz y Li, 2006). Por ejemplo, si un PU aparece en una banda del espectro en particular, el SU tiene que desalojar solo esa banda, y en el resto de las bandas de espectro mantendrá la comunicación, por lo cual la degradación de la QoS puede ser mitigada. Adicionalmente, la transmisión en múltiples bandas del espectro permite menor consumo de energía en cada banda del espectro. Como resultado, se consigue menos interferencias con los PU, en comparación con la transmisión en una única banda del espectro (Akyildiz y Li, 2006). Por estas razones, el esquema de gestión del espectro debe tener la capacidad de toma de decisión para múltiples bandas. Por ejemplo, la forma de determinar el número de bandas del espectro y cómo seleccionar el conjunto de bandas apropiadas siguen siendo temas de investigación abiertos en CRN.

## Selección de espectro cooperativa

El enfoque cooperativo tiene más ventajas que el enfoque no cooperativo. En la detección de espectro cooperativo, el SU vecino comparte su información de detección con el objetivo de aprovechar la diversidad espacial. Un desafío en la selección de espectro cooperativa es cómo combinar la información de los usuarios cooperativos mientras se realiza la transmisión (Masonta, Mzyece y Ntlatlapa, 2013).

## Selección de espectro en redes de tráfico heterogéneas

En una determinada CRN puede haber requerimientos de calidad de servicio heterogéneos y el espectro disponible puede presentar fluctuaciones y cualidades variables. En las redes de tráfico heterogéneas, un desafío consiste en seleccionar las bandas de frecuencia apropiadas para satisfacer los requerimientos de QoS de cada SU (Masonta, Mzyece y Ntlatlapa, 2013).

## CONCLUSIONES

El presente trabajo es una revisión bibliográfica reciente sobre algoritmos de asignación de espectro en redes de radio cognitiva. Estos algoritmos son las herramientas que permiten dar solución al problema del uso eficiente del espectro radioeléctrico, además de aportar en diferentes tópicos, como caracterización de canales, políticas locales, requisitos de usuario, entre otras. Las ventajas y desventajas en la adopción de un algoritmo u otro para la asignación de espectro están en función de las necesidades específicas del propósito que se desea lograr y su implementación depende de las necesidades de procesamiento de la señal, tiempos de respuesta, disponibilidad de los datos, capacidad de almacenamiento, capacidad de aprendizaje, robustez, entre otras.

## RECONOCIMIENTO

Este trabajo fue realizado con la financiación del Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Los autores también agradecen la colaboración de la Universidad Nacional de Colombia.

## REFERENCIAS

Abbas, N.; Nasser, Y. y Ahmad, K. El. (2015). Recent Advances on Artificial Intelligence and Learning

- Techniques in Cognitive Radio Networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, (1), 1–20. <http://doi.org/10.1186/s13638-015-0381-7>
- Ahmed, A.; Boulahia, L.M. y Gaiti, D. (2014). Enabling Vertical Handover Decisions in Heterogeneous Wireless Networks: A State-of-the-Art and a Classification. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 16(2), 776–811. Recuperado de: <http://doi.org/10.1109/SURV.2013.082713.00141>
- Akyildiz, I.F.; Lee, W.Y.; Vuran, M.C. y Mohanty, S. (2006). NeXt Generation/Dynamic Spectrum Access/Cognitive Radio Wireless Networks: A Survey. *Computer Networks*, 50(13), 2127–2159. <http://doi.org/10.1016/j.comnet.2006.05.001>
- Akyildiz, I.F.; Lee, W.Y.; Vuran, M.C. y Mohanty, S. (2008). A survey on spectrum management in cognitive radio networks. *Communications Magazine, IEEE*, 46(4), 40–48. <http://doi.org/10.1109/MCOM.2008.4481339>
- Akyildiz, I.F.; Lee, W.Y. y Chowdhury, K.R. (2009). CRAHNs: Cognitive Radio Ad Hoc Networks. *Ad Hoc Networks*, 7(5), 810–836. <http://doi.org/10.1016/j.adhoc.2009.01.001>
- Akyildiz, I.F. y Li, Y. (2006). OCRA: OFDM-Based Cognitive Radio Networks. *Broadband and Wireless Networking Laboratory Technical Report*.
- Bkassiny, M.; Li, Y. y Jayaweera, S.K. (2013). A Survey on Machine-Learning Techniques in Cognitive Radios. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 15(3), 1136–1159. <http://doi.org/10.1109/SURV.2012.100412.00017>
- Bolstad, W.M. (2007). Introduction to Bayesian Statistics. *Journal of Biopharmaceutical Statistics*, 21(5), 971–887. Recuperado de: <http://doi.org/10.1080/10543406.2011.589638>
- Börger, T. y Dustmann, C. (2003). Awarding telecom licences: The recent European experience. *Economic Policy*, 36, 215–268. <http://doi.org/10.1111/1468-0327.00106>
- Cabric, D.; Mishra, S.M. y Brodersen, R. W. (2004). Implementation Issues in Spectrum Sensing for Cognitive Radios. *Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, 1(1), 772–776. <http://doi.org/10.1109/ACSSC.2004.1399240>
- Cheng, X. y Jiang, M. (2011). Cognitive radio spectrum assignment based on artificial bee colony algorithm. *2011 IEEE 13th International Conference on Communication Technology*, 161–164. <http://doi.org/10.1109/ICCT.2011.6157854>
- Christian, I.; Moh, S.; Chung, I. y Lee, J. (2012). Spectrum Mobility in Cognitive Radio Networks. *IEEE Communications Magazine*, 50(6), 114–121. <http://doi.org/10.1109/MCOM.2012.6211495>
- Cortés, J.A.Z.; Serna, M.D.A. y Jaimes, W.A. (2012). Applying fuzzy extended analytical hierarchy (FEAHP) for selecting logistics software. *Ingeniería E Investigación*, 32(1), 94–99.
- Dadios, E.P. (2012). *Fuzzy Logic: Algorithms, Techniques and Implementations*. InTechOpen.
- Dejonghe, A.; Van Wesemael, P.; Pavloski, M. y Chomu, K. (2011). *Flexible and Spectrum Aware Radio Access through Measurements and Modelling in Cognitive Radio Systems*. Technical report. FARAMIR.
- Del Ser, J.; Matinmikko, M.; Gil, S. y Mustonen, M. (2010). A Novel Harmony Search Based Spectrum Allocation Technique for Cognitive Radio Networks. En: *2010 7th International Symposium on Wireless Communication Systems* (pp. 233–237). <http://doi.org/10.1109/ISWCS.2010.5624341>
- Etkin, R.; Parekh, A. y Tse, D. (2007). Spectrum sharing for unlicensed bands. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 25(3), 517–528. <http://doi.org/10.1109/JSAC.2007.070402>
- Federal Communications Commission (2003). Facilitating opportunities for flexible, efficient, and reliable spectrum use employing cognitive radio technologies. *Et Docket*, 03(108), 5–57.
- Ferber, J. (1999). *An Introduction to Distributed Artificial Intelligence*. Addison-Wesley.
- Fraser, A.M. (2008). *Hidden Markov models and dynamical systems*. Filadelfia: SIAM.
- Fudenberg, D. y Tirole, J. (1991). *Game Theory*. MIT Press. Recuperado de: <https://books.google.com.co/books?id=pFPHKwXro3QC>
- Gallardo, J.R.; Pineda, U. y Stevens, E. (2009). Vikor Method for Vertical Handoff Decision in Beyond

- 3G Wireless Networks. En: *2009 6th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control, CCE 2009*. <http://doi.org/10.1109/ICEEE.2009.5393320>
- Gavrilovska, L.; Atanasovski, V.; Macaluso, I. y Dasilva, L.A. (2013). Learning and reasoning in cognitive radio networks. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 15(4), 1761-1777. <http://doi.org/10.1109/SURV.2013.030713.00113>
- Giupponi, L. y Pérez, A.I. (2008). Fuzzy-Based Spectrum Handoff in Cognitive Radio Networks. En: *Proceedings of the 3rd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, CrownCom 2008*. <http://doi.org/10.1109/CROWNCOM.2008.4562535>
- Goldberg, D.E. y Holland, J.H. (1988). Genetic Algorithms and Machine Learning. *Machine Learning*, 3(2), 95–99. Recuperado de: <http://doi.org/10.1023/A:1022602019183>
- Han, J.; Kamber, M. y Pei, J. (2011). *Data mining: concepts and techniques*. Waltham, Massachusetts: Elsevier.
- Haykin, S. (1998). *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. 2a. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR.
- Haykin, S. (2005). Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 23(2), 201–220. <http://doi.org/10.1109/JSAC.2004.839380>
- He, A.; Bae, K.K.; Newman, T.R.; Gaeddert, J.; Kim, K.; Menon, R. y Tranter, W. H. (2010). A survey of artificial intelligence for cognitive radios. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 59(4), 1578–1592. <http://doi.org/10.1109/TVT.2010.2043968>
- Hernández, C.; Pedraza, L.; Páez, I. y Rodríguez-Colina, E. (2015). Análisis de la Movilidad Espectral en Redes de Radio Cognitiva. *Información Tecnológica*, 26(6), 169-186.
- Hernández, C.; Giral, D. y Páez, I. (2015a). Benchmarking of the Performance of Spectrum Mobility Models in Cognitive Radio Networks. *International Journal of Applied Engineering Research (IJAER)*, 10(21), 42189-42197.
- Hernández, C.; Giral, D. y Páez, I. (2015b). Hybrid Algorithm for Frequency Channel Selection in Wi-Fi Networks. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 9(12), 80-83.
- Hernández, C.; Giral, D. y Santa, F. (2015). MCDM Spectrum Handover Models for Cognitive Wireless Networks. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 9(10), 679-682.
- Hernández, C.; Páez, I. y Giral, D. (2015). Modelo AHP-VIKOR para hand off espectral en redes de radio cognitiva. *Tecnura*, 19(45), 29-39.
- Hernández, C.; Salgado, C.; López, H. y Rodríguez-Colina, E. (2015). Multivariable algorithm for dynamic channel selection in cognitive radio networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2015(1), 1-17. <http://doi.org/10.1186/s13638-015-0445-8>
- Hernández, C.; Vásquez, H. y Páez, I. (2015). Proactive Spectrum Handoff Model with Time Series Prediction. *International Journal of Applied Engineering Research (IJAER)*, 10(21), 42259–42264.
- Hernández-Guillén, J.; Rodríguez-Colina, E.; Marcelín-Jiménez, R. y Chalke, M.P. (2012). CRUAM-MAC: A novel cognitive radio MAC protocol for dynamic spectrum access. En: *2012 IEEE Latin-America Conference on Communications, LATINCOM 2012—Conference Proceedings*. <http://doi.org/10.1109/LATINCOM.2012.6505997>
- Hübner, R. (2007). *Strategic supply chain management in process industries: An application to specialty chemicals production network design* (Vol. 594). Berlín: Springer Science & Business Media.
- Jayaweera, S. y Christodoulou, C. (2011). *Radiobots: Architecture, Algorithms and Realtime Reconfigurable Antenna Designs for Autonomous, Self-Learning Future Cognitive Radios*. Hershey, EE.UU.
- Ji, Z.J.Z. y Liu, K.J.R. (2007). Cognitive Radios for Dynamic Spectrum Access—Dynamic Spectrum Sharing: A Game Theoretical Overview. *IEEE Communications Magazine*, 45(5), 88–94. <http://doi.org/10.1109/MCOM.2007.358854>
- Jiang, C.; Chen, Y. y Liu, K.J.R. (2014). Multi-Channel Sensing and Access Game: Bayesian Social Learning with Negative Network Externality.

- IEEE Transactions on Wireless Communications*, 13(4), 2176–2188. Recuperado de: <http://doi.org/10.1109/TWC.2014.022014.131209>
- Kanodia, V.; Sabharwal, A. y Knightly, E. (2004). MOAR: A multi-channel opportunistic auto-rate media access protocol for ad hoc networks. En: *Broadband Networks, 2004. BroadNets 2004. Proceedings. First International Conference on* (pp. 600–610). IEEE.
- Krishnamurthy, S.; Thoppian, M.; Venkatesan, S. y Prakash, R. (2005). Control Channel Based MAC-Layer Configuration, Routing and Situation Awareness for Cognitive Radio Networks. En: *Proceedings-IEEE Military Communications Conference MILCOM* (Vol. 2005). <http://doi.org/10.1109/MILCOM.2005.1605725>
- Masonta, M.T.; Mzyece, M. y Ntlatlapa, N. (2013). Spectrum Decision in Cognitive Radio Networks: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 15(3), 1088–1107. Recuperado de: <http://doi.org/10.1109/SURV.2012.111412.00160>
- Matinmikko, M.; Del Ser, J.; Rauma, T. y Mustonen, M. (2013). Fuzzy-Logic Based Framework for Spectrum Availability Assessment in Cognitive Radio Systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 31(11), 2173–2184. <http://doi.org/10.1109/JSAC.2013.131117>
- Mir, U.; Esseghir, M. y Gaiti D., M.B.L. (2011). Dynamic spectrum sharing for cognitive radio networks using multiagent system. En: *Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 2011 IEEE* (pp. 658–663).
- Mitola, J. y Maguire, G.Q. (1999). Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal. *IEEE Personal Communications*, 6(4), 13–18. <http://doi.org/10.1109/98.788210>
- Nisan, N.; Roughgarden, T.; Tardos, E. y Vazirani, V.V. (2007). *Algorithmic game theory* (Vol. 1). Nueva York: Cambridge University Press Cambridge.
- Ormond, O.; Murphy, J. y Muntean, G.M. (2006). Utility-Based Intelligent Network Selection in Beyond 3G Systems. En: *IEEE International Conference on Communications* (Vol. 4, pp. 1831–1836). Recuperado de: <http://doi.org/10.1109/ICC.2006.254986>
- Patil, S.K. y Kant, R. (2014). A Fuzzy AHP-TOPSIS Framework for Ranking the Solutions of Knowledge Management Adoption in Supply Chain to Overcome its Barriers. *Expert Systems with Applications*, 41(2), 679–693. <http://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.07.093>
- Petrova, M.; Mahonen, P. y Osuna, A. (2010). Multi-Class Classification of Analog and Digital Signals in Cognitive Radios Using Support Vector Machines. En: *2010 7th International Symposium on Wireless Communication Systems* (pp. 986–990). Recuperado de: <http://doi.org/10.1109/ISWCS.2010.5624500>
- Pham, C.; Tran, N.H.; Do, C.T.; Moon, S.I. y Hong, C.S. (2014). Spectrum Handoff Model Based on Hidden Markov Model in Cognitive Radio Networks. En: *Information Networking (ICOIN), 2014 International Conference on* (pp. 406–411). IEEE. doi: 10.1109/ICOIN.2014.6799714
- Ramírez P., C. y Ramos R., V.M. (2010). Handover vertical: un problema de toma de decisión múltiple. En: *VIII Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico*. Cuernavaca Morelos, México.
- Ramírez, C. y Ramos R., V. (2013). On the Effectiveness of Multi-Criteria Decision Mechanisms for Vertical Handoff. En: *27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA)* (pp. 1157–1164). <http://doi.org/10.1109/AINA.2013.114>
- Saaty, T.L. (1990). How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9–26. [http://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](http://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)
- Safavian, S.R. y Landgrebe, D. (1991). A Survey of Decision Tree Classifier Methodology. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 21(3), 660–674. Recuperado de: <http://doi.org/10.1109/21.97458>
- Stevens, E.; Martínez, J.D. y Pineda, U. (2012). Evaluation of Vertical Handoff Decision Algorithms Based on MADM Methods for Heterogeneous Wireless Networks. *Journal of Applied Research and Technology*, 10(4), 534–548.
- Stevens, E. y Wong, V.W.S. (2006). Comparison between vertical handoff decision algorithms for

- heterogeneous wireless networks. En: *IEEE Vehicular Technology Conference* (Vol. 2, pp. 947–951). <http://doi.org/10.1109/VETECS.2004.1388970>
- Sutton, R.S. y Barto, A.G. (1998). Reinforcement Learning: An Introduction. *IEEE Transactions on Neural Networks / a Publication of the IEEE Neural Networks Council*, 9(5), 1054. <http://doi.org/10.1109/TNN.1998.712192>
- Taj, M.I. y Akil, M. (2011). Cognitive Radio Spectrum Evolution Prediction using Artificial Neural Networks based Multivariate Time Series Modelling. En: *Wireless Conference 2011-Sustainable Wireless Technologies (European Wireless), 11th European* (pp. 1–6). VDE.
- Tanino, T.; Tanaka, T. y Inuiguchi, M. (2003). *Multi-objective programming and goal programming: theory and applications* (Vol. 21). Springer Science & Business Media.
- Tragos, E.Z.; Zeadally, S.; Fragkiadakis, A.G. y Siris, V.A. (2013). Spectrum Assignment in Cognitive Radio Networks: A Comprehensive Survey. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 15(3), 1108–1135. <http://doi.org/10.1109/SURV.2012.121112.00047>
- Trigui, E.; Esseghir, M. y Merghem, L. (2012). Multi-agent systems negotiation approach for handoff in mobile cognitive radio networks. En: *2012 5th International Conference on New Technologies, Mobility and Security—Proceedings of NTMS 2012 Conference and Workshops*. <http://doi.org/10.1109/NTMS.2012.6208687>
- Valenta, V.; Mařálek, R.; Baudoin, G.; Villegas, M.; Suarez, M. y Robert, F. (2010). Survey on Spectrum Utilization in Europe: Measurements, Analyses and Observations. *Fifth International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks & Communications (CROWNCOM), 2010* (230126), 1–5. <http://doi.org/10.4108/ICST.CROWNCOM2010.9220>
- Wei, Y.W.Y.; Li, X.L.X.; Song, M.S.M. y Song, J.S.J. (2008). Cooperation Radio Resource Management and Adaptive Vertical Handover in Heterogeneous Wireless Networks. *2008 Fourth International Conference on Natural Computation*, 5, 197–201. Recuperado de: <http://doi.org/10.1109/ICNC.2008.504>
- Woods, W.A. (1986). Important Issues in Knowledge Representation. *Proceedings of the IEEE*, 74(10), 1322–1334.
- Wooldridge, M. (2009). *An introduction to multiagent systems*. Glasgow, Gran Bretaña: John Wiley & Sons.
- Working, S.E. (2015). *Federal Communications Commission Spectrum Policy Task Force*. Recuperado de: [https://transition.fcc.gov/sptf/files/SEWGFFinal-Report\\_1.pdf](https://transition.fcc.gov/sptf/files/SEWGFFinal-Report_1.pdf)
- Xu, G.X.G. y Lu, Y.L.Y. (2006). Channel and Modulation Selection Based on Support Vector Machines for Cognitive Radio. En: *2006 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing* (pp. 4–7). Recuperado de: <http://doi.org/10.1109/WiCOM.2006.181>
- Yifei, W.; Yinglei, T.; Li, W.; Mei, S. y Xiaojun, W. (2013). QoS Provisioning Energy Saving Dynamic Access Policy for Overlay Cognitive Radio Networks with Hidden Markov Channels. *China Communications*, 10(12), 92–101. Recuperado de: <http://doi.org/10.1109/CC.2013.6723882>
- Yonghui, C. (2010). Study of the bayesian networks. En: *E-Health Networking, Digital Ecosystems and Technologies (EDT), 2010 International Conference on* (Vol. 1, pp. 172–174). IEEE. doi: 10.1109/EDT.2010.5496612
- Zhao, Y.; Mao, S.; Neel, J.O. y Reed, J.H. (2009). Performance Evaluation of Cognitive Radios: Metrics, Utility Functions, and Methodology. *Proceedings of the IEEE*, 97(4), 642–658. <http://doi.org/10.1109/JPROC.2009.2013017>
- Zheng, H. y Cao, L. (2005). Device-Centric Spectrum Management. En: *2005 1st IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, DySPAN 2005* (pp. 56–65). <http://doi.org/10.1109/DYSPAN.2005.1542617>





## Efecto de la temperatura en el potencial de aprovechamiento energético de los productos de la pirólisis del cuesco de palma

### Effect of temperature on energy potential of pyrolysis products from oil palm shells

Lina María Romero Millán<sup>1</sup>, María Alejandra Cruz Domínguez<sup>2</sup>,  
Fabio Emiro Sierra Vargas<sup>3</sup>

**Fecha de recepción:** 19 de octubre de 2015

**Fecha de aceptación:** 15 de febrero de 2016

**Cómo citar:** Romero Millán, L. M., Cruz Domínguez, M. A., & Sierra Vargas, F. E. (2016). Efecto de la temperatura en el potencial de aprovechamiento energético de los productos de la pirólisis del cuesco de palma. *Revista Tecnura*, 20(48), 89-99. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.2.a06

#### Resumen

**Contexto:** Teniendo en cuenta que actualmente se producen en Colombia alrededor de 220 000 toneladas de cuesco al año, como subproducto del proceso de transformación de la palma de aceite *Elaeis Guineensis*, el presente trabajo busca establecer el potencial de aprovechamiento energético de esta biomasa residual, a través del proceso de pirólisis lenta.

**Método:** Usando un reactor de lecho fijo a escala de laboratorio, se llevaron a cabo pruebas de pirólisis lenta de cuesco de palma en el rango de temperatura comprendido entre 300°C y 500°C. Se analizó la distribución de los productos sólidos, líquidos y gaseosos del proceso, así como el comportamiento del contenido energético del carbonizado y el gas producidos.

**Resultados:** Se determinó que el carbonizado es el principal producto del proceso, con un rendimiento de hasta 50% en peso y un contenido de hasta 73% de la cantidad de energía presente en la biomasa

original. El contenido energético del carbonizado se incrementó con la temperatura, desde 29,6 MJ/kg para su tratamiento a 300°C, hasta 31,14 MJ/kg a 500°C. Por su parte, el gas producido representó hasta un 13% del contenido energético del cuesco de palma sin pirolizar, con un poder calorífico inferior de hasta 12,5 MJ/m<sup>3</sup>.

**Conclusiones:** De acuerdo con los resultados obtenidos, la pirólisis lenta se considera un proceso de especial interés para la valorización de biomasa residuales como el cuesco de palma, a partir de su aprovechamiento energético; y de la producción de materiales con potencial de ser usados como combustibles o precursores de productos de valor agregado.

**Palabras clave:** Biomasa, Carbonizado, Cuesco de palma de aceite, Pirólisis lenta, Potencial energético.

#### Abstract

**Context:** Taking into account that near 220 000 tons of oil palm shells are produced every year in

1 Ingeniera mecánica, Magister en Energías, PhD (c) Ciencia y Tecnología de los materiales. Integrante del grupo de Investigación Mecanismos de Desarrollo Limpio y Gestión Energética de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Bogotá, Colombia. Contacto: [lmromerom@unal.edu.co](mailto:lmromerom@unal.edu.co)

2 Estudiante de Ingeniería Agroindustrial. Integrante del grupo de Investigación Mecanismos de Desarrollo Limpio y Gestión Energética de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Bogotá, Colombia. Contacto: [maria.cruz@unillanos.edu.co](mailto:maria.cruz@unillanos.edu.co)

3 Ingeniero Mecánico. Magister en Automatización Industrial. Doctor en Ingeniería de la Universidad de Kassel. Director del grupo de Investigación Mecanismos de Desarrollo Limpio y Gestión Energética. Profesor Titular del Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica. Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, Colombia. Contacto: [feserrav@unal.edu.co](mailto:feserrav@unal.edu.co)

Colombia, as a waste of the *Elaeis Guineensis* palm oil transformation process, the aim of this work is to determine the energy potential of oil palm shells, when transformed through slow pyrolysis process.

**Methods:** Using a fixed bed lab scale reactor, different oil palm shells pyrolysis tests were performed between 300°C and 500°C. The effect of the temperature in the process product yield and in the energy content of produced solids and gases were analyzed.

**Results:** With a maximum mass yield of 50%, the char is considered the main product of oil palm shells pyrolysis, containing up to 73% of the raw biomass energy. The heating value of char raised

with the temperature, from 29,6 MJ/kg at 300°C to 31,34 MJ/kg at 500°C. Moreover, the gas produced in the established temperature range had up to 13% of the energy content of the raw biomass, with a heating value near 12,5 MJ/m<sup>3</sup>.

**Conclusions:** According to the results, slow pyrolysis can be considered an interesting process for the valorization of residual biomass as oil palm shells, through the production of solids and gases that can be used as fuels, or as precursor of other value-added products.

**Keywords:** Biomass, Char, Oil palm shells, Slow Pyrolysis, Energy potential.

## INTRODUCCIÓN

Dada su ubicación geográfica y sus condiciones climáticas, Colombia cuenta con una gran biodiversidad y un importante potencial de biomasa, tanto agrícolas como pecuarias, a ser explotadas. En general, las actividades agroindustriales en el país producen más de 70.000.000 de toneladas de residuos agrícolas de cosecha e industriales al año, en cultivos de café, plátano, caña, palma de aceite, maíz, banano y arroz (Escalante *et al.*, 2010).

En particular, Colombia se ha posicionado en los últimos años como el primer productor de palma de aceite en América Latina, y el cuarto a nivel mundial, con una producción superior a un millón de toneladas de aceite en 2013, correspondientes a un 1,85% del total de la producción mundial (Fedepalma, 2014). Dentro de los principales residuos de la industria palmera se encuentra el cuesco, con una producción de alrededor de 220.000 toneladas al año (Escalante *et al.*, 2010), considerándose una biomasa con un importante potencial de aprovechamiento. Desde el punto de vista energético, diversos autores han reportado valores de poder calorífico para el cuesco de palma cercanos a los 20 MJ/kg (Okoroigwe y Saffron, 2012; Kong *et al.*, 2014), por lo cual, el estudio de los

diferentes procesos de aprovechamiento energético de esta biomasa se hace importante en la búsqueda de alternativas para su uso en el país.

La pirólisis se presenta, en este marco, como un proceso de especial interés, ya que permite la descomposición de la biomasa en productos sólidos, líquidos y gaseosos que pueden ser aprovechados en diferentes aplicaciones, tanto energéticas como industriales (Park, Lee, Ryu y Park, 2014). En términos generales, la pirólisis es el proceso de descomposición térmica de la biomasa en ausencia de oxígeno, en el rango de temperaturas comprendido entre 300 °C y 600 °C; y es considerada el paso previo para procesos como la gasificación o la combustión (Basu, 2013). El rendimiento de los productos de la pirólisis depende en gran medida de la naturaleza de la materia prima utilizada y de los parámetros del proceso, como temperatura, tasa de calentamiento, tamaño de partícula, tiempo de residencia, entre otros (Angin, 2013; Demirbas, 2004; Titiladunayo, McDonald y Fapetu, 2012).

En particular, la pirólisis lenta se lleva a cabo a bajas temperaturas, entre 300 °C y 500 °C, con tasas de calentamiento inferiores a 100 °C/min (Basu, 2010). Estas condiciones permiten un alto rendimiento en la producción de carbonizado, que puede ser utilizado como combustible sólido

fácilmente transportable o distribuible, o como precursor de productos de alto valor, como carbón activado o biochar (Lua, Lau y Guo, 2006; Lee *et al.*, 2013). Los combustibles sólidos, con un mayor poder calorífico que la biomasa original, pueden ser usados en procesos posteriores de combustión o gasificación (Liu y Han, 2015). Por su parte, los gases obtenidos, si bien no constituyen el producto principal del proceso y en muchas ocasiones no son aprovechados, tienen también potencial de ser usados en aplicaciones energéticas o como insumos en la industria química (Park *et al.*, 2014).

En este sentido, el presente trabajo analiza la distribución de los productos sólidos, líquidos y gaseosos, obtenidos a partir de la pirólisis lenta del cuesco de palma en el rango de temperaturas comprendido entre 300 °C y 500 °C, usando un reactor de lecho fijo a escala de laboratorio. Se estudia además el comportamiento del contenido

energético del carbonizado y el gas producidos, en los niveles de temperatura establecidos, con el fin de determinar el potencial de aprovechamiento energético del cuesco de palma de aceite, como biomasa residual.

## METODOLOGÍA

### Materias primas

Las pruebas experimentales fueron desarrolladas en el Laboratorio de Plantas Térmicas y Energías Renovables de la Universidad Nacional de Colombia, en Bogotá. El cuesco analizado en este estudio proviene de la palma de aceite *Elaeis Guineensis*, cultivada en Cumaral (Meta) (4°16'10"N 73°29'11"O, 500 msnm, temperatura ambiente 21 °C, 2858 mm de precipitación anual). Sus características fisicoquímicas se presentan en la tabla 1.

**Tabla 1.** Propiedades fisicoquímicas del cuesco de palma utilizado en el presente estudio

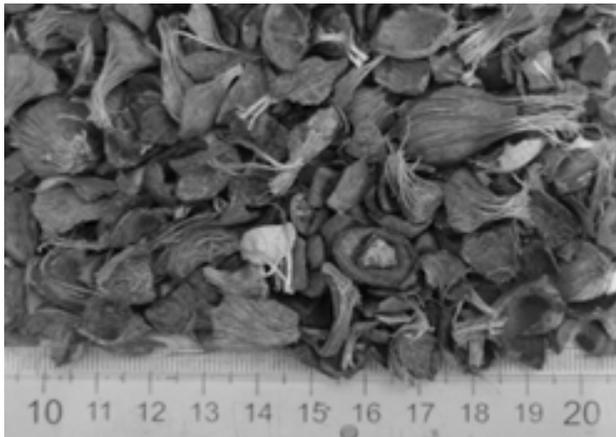
<b>Análisis elemental</b> (% masa daf)	<b>C</b>	47,57
	<b>H</b>	6,59
	<b>O*</b>	45,25
	<b>N</b>	0,58
	<b>O/C</b>	0,71
	<b>H/C</b>	1,66
<b>Análisis próximo</b> (% masa)	<b>Humedad</b>	8,81
	<b>MV</b>	69,80
	<b>CF*</b>	19,68
	<b>Cenizas</b>	1,71
<b>Poder calorífico</b>	<b>MJ/kg</b>	19,46

\*Valores calculados por diferencia

**Fuente:** Elaboración propia.

Para su estudio, la materia prima fue tamizada y clasificada con el fin de homogeneizar el tamaño de partícula y eliminar residuos que pudiesen afectar el resultado de las pruebas. Aunque la forma del cuesco de palma es irregular, luego de su

preparación, las partículas se encuentran en el rango de 0,7 cm a 2 cm. La figura 1 presenta una imagen del cuesco de palma luego de su proceso de limpieza y clasificación.



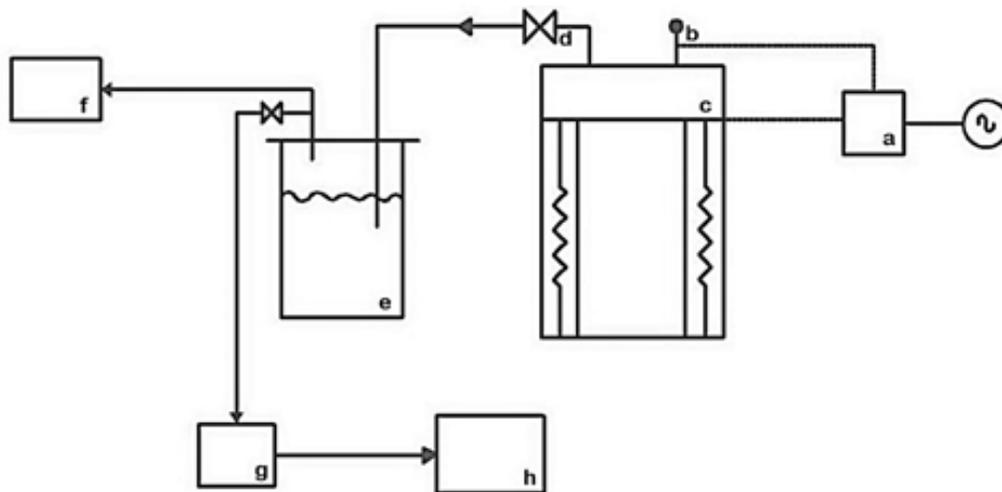
**Figura 1.** Fotografía del casco de palma de aceite. Dimensiones en cm

**Fuente:** Elaboración propia.

## Descripción del sistema de pirólisis

El equipo utilizado para la experimentación es un reactor cilíndrico de lecho fijo a escala de laboratorio, de 30 cm de altura y 18,5 cm de diámetro,

construido en acero. La energía para el proceso es suministrada usando dos resistencias eléctricas de 1000 W cada una, protegidas y aisladas del exterior con un recubrimiento en concreto refractario, que además hace las veces de aislante térmico. Un sistema de control de temperatura integrado al equipo permite alcanzar con precisión la temperatura objetivo para cada una de las pruebas. A la tapa del reactor se acoplan una termocupla tipo K para el monitoreo de la temperatura de la biomasa, y una válvula, por donde se hace la recuperación del material volátil generado durante el proceso de pirólisis. El montaje experimental, cuenta además con un *scrubber* o lavador a baja temperatura ( $0\text{ }^{\circ}\text{C} - 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), cuya finalidad es recolectar la fracción condensable presente en el gas producido. A la salida del lavador, un contador de gas tipo tambor marca Ritter TG1 y un analizador de gases infrarrojo marca Cubic Gasboard 3100P, permiten establecer la cantidad y la composición del gas del proceso. El montaje del sistema se presenta de manera detallada en la figura 2.



**Figura 2.** Montaje experimental y esquema del sistema de pirólisis: a) Controlador de temperatura, b) Termocupla tipo K, c) Piroлизador, d) Salida del material volátil, e) Scrubber, f) Contador de gas, g) Filtro de agua y carbón activado, h) Analizador de gases

**Fuente:** Elaboración propia.

La pirólisis lenta del cuesco de palma fue estudiada para temperaturas comprendidas entre 300 °C y 500 °C, con lo cual la tasa de calentamiento se mantuvo constante en 3 °C/min. Una vez alcanzada la temperatura objetivo, el tiempo del proceso fue de una hora. Durante la prueba, la composición de los gases fue medida cada 10 minutos usando el analizador de gases marca Cubic Gasboard 3100P. Luego de cada experiencia, la cantidad de carbonizado y de condensables producidos fue determinada con la ayuda de una balanza. La producción de gas fue medida usando el contador de gas presente en el montaje.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

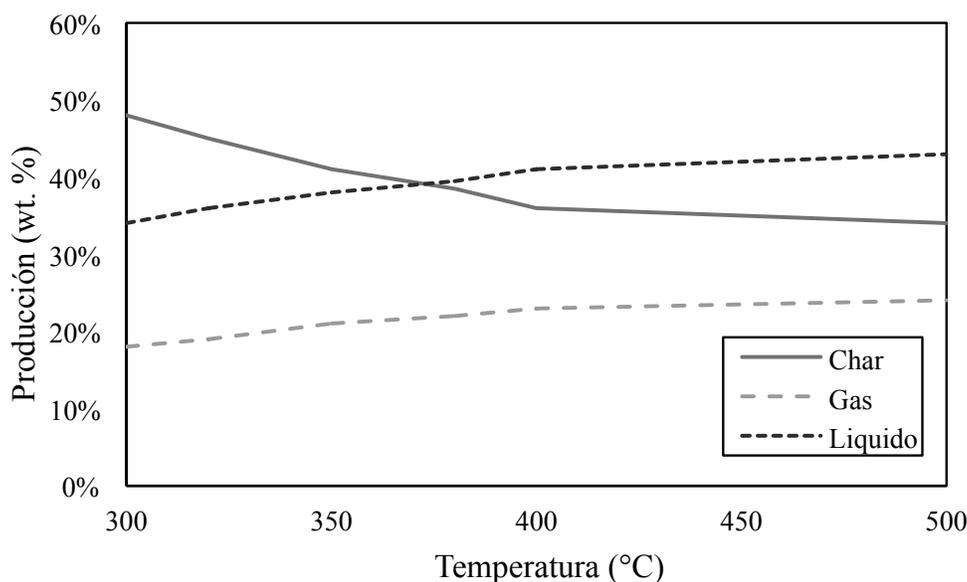
### Distribución de los productos obtenidos

Los resultados de las pruebas indican que la temperatura de pirólisis tiene un efecto importante en la generación de subproductos sólidos, líquidos

y gaseosos. La figura 3 muestra el porcentaje en masa de los subproductos del proceso en función de la temperatura.

Se observa que la cantidad de char o carbonizado disminuye a medida que la temperatura de pirólisis aumenta, dando paso a un incremento en la producción de gas y aceites. A 300 °C predomina el subproducto sólido con un 50 % de la masa inicial de biomasa pirolizada, mientras que el gas y el líquido corresponden a un 18 % y un 32 %, respectivamente. Con una temperatura de pirólisis de 500 °C, la producción de material sólido disminuye hasta un 33 %, mientras que el producto líquido predomina, llegando hasta un 43 %. En general, el porcentaje de producción de gas se mantiene entre 18 % y 24 % para el rango de temperaturas estudiado.

El comportamiento encontrado está relacionado con la composición estructural del cuesco de la palma de aceite *Elaeis Guineensis*, cuyo contenido de hemicelulosa, celulosa y lignina se encuentra



**Figura 3.** Distribución de los subproductos obtenidos en la pirólisis del cuesco de palma

**Fuente:** Elaboración propia.

reportado en la literatura (García, García y Das, 2008). La baja producción de gas a partir de la pirólisis de esta biomasa podría estar relacionada con su contenido de hemicelulosa, que se encuentra alrededor de un 12 %, porcentaje que se considera bajo, en comparación con la composición de celulosa y lignina, que son de alrededor de 30 % y 50 %, respectivamente. En términos generales, la hemicelulosa y la lignina son los componentes constitutivos de la biomasa que mayor contribución tienen frente a la producción de gases no condensables y carbonizados, respectivamente (Basu, 2013). En cuanto al porcentaje de char obtenido en el rango de temperaturas estudiado, se considera que el cuesco de palma de aceite tiene un rendimiento de producción interesante, relacionado con su alto contenido de lignina. En este sentido, esta biomasa podría ser aprovechada en la producción de carbonizados, para su uso como combustible sólido, biochar, o para la fabricación de carbones activados, con varios trabajos reportados por diferentes autores en esta línea (Lua, Lau y Guo, 2006; Gómez, Klose y Rincón, 2010).

### Potencial energético del carbonizado

Las pruebas experimentales desarrolladas permitieron ver el efecto de la temperatura en el rendimiento de la producción de sólidos, líquidos y

gases a partir de la pirólisis lenta del cuesco de palma de aceite. Se evidenció que para el caso del carbonizado, una mayor temperatura de proceso está relacionada con una mayor descomposición térmica de la biomasa y, por ende, una menor producción de sólidos. El cuesco de palma de aceite, dado su importante contenido de lignina, permite sin embargo la obtención de altos rendimientos de productos sólidos, por lo cual, el estudio del potencial energético de estos cobra gran importancia. La composición y el poder calorífico del carbonizado obtenido en cada una de las pruebas fueron determinados experimentalmente, con el apoyo del laboratorio de carbones del Servicio Geológico Colombiano. Los resultados de estos análisis son presentados en la tabla 2 para los carbonizados obtenidos a temperaturas de pirólisis de 300 °C, 400 °C y 500 °C.

Se observa que la degradación de la biomasa tiene consecuencias en su composición elemental. Los análisis permiten evidenciar que el porcentaje de carbono (C) se incrementa con la temperatura de pirólisis, mientras que los contenidos de hidrógeno (H) y oxígeno (O) se ven reducidos. De la misma forma, el contenido de materia volátil (MV) se hace menor con el incremento en la temperatura de proceso, mientras que el porcentaje de carbono fijo (CF) aumenta.

**Tabla 2.** Propiedades del carbonizado de la pirólisis del cuesco de palma de aceite

		Temperatura de pirólisis		
		300 °C	400 °C	500 °C
<b>Análisis elemental</b> (% masa daf)	C	77,83	78,49	81,15
	H	4,87	4,31	3,69
	O	16,55	16,56	14,44
	N	0,75	0,64	0,72
	O/C	0,16	0,13	0,10
	H/C	0,75	0,64	0,55
<b>Análisis próximo</b> (% masa)	MV	40,59	35,10	28,15
	CF	57,10	62,05	68,48
	Cenizas	2,31	2,85	3,37
<b>Poder calorífico</b>	MJ/kg	29,60	30,59	31,14

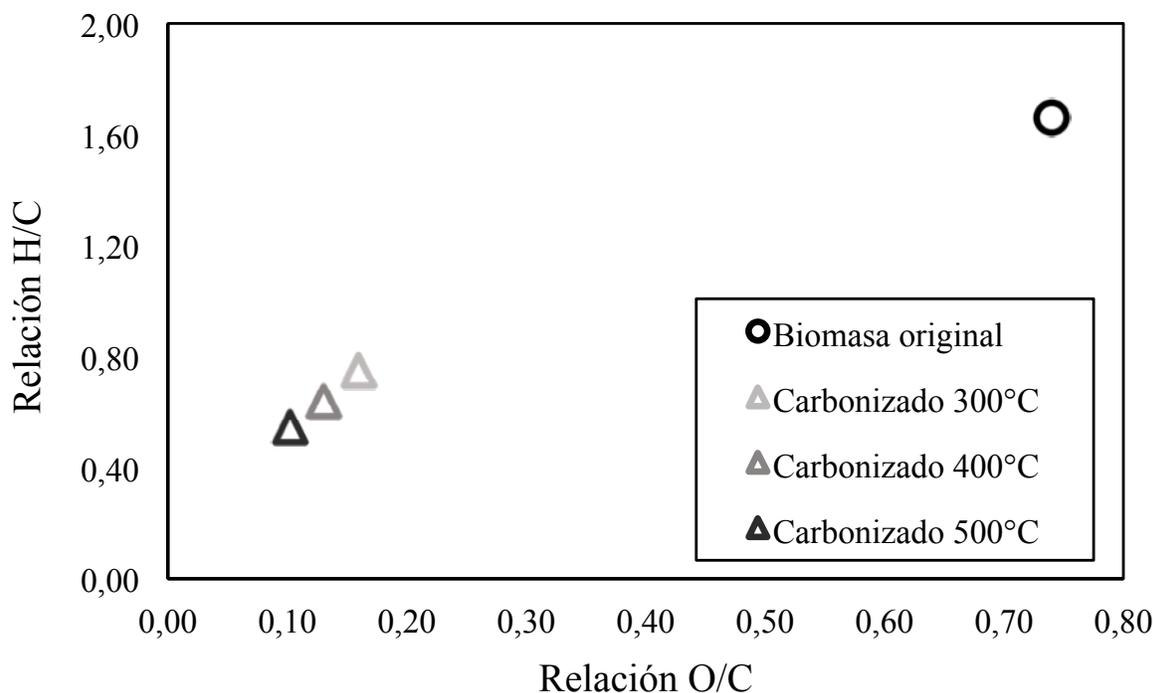
Fuente: Elaboración propia.

A partir del análisis elemental del cuesco de palma y sus carbonizados, las relaciones atómicas H/C y O/C son indicadas en el diagrama de Van Krevelen, presentado en la figura 4. Se observa que con el incremento de la temperatura de proceso las relaciones atómicas se reducen siguiendo una tendencia lineal. Este comportamiento es de esperarse, dado que a medida que avanza la descomposición térmica de la biomasa, se liberan compuestos volátiles que contienen tanto oxígeno como hidrógeno, dando lugar a un sólido rico en carbono (Park *et al.*, 2014). Los valores bajos para las relaciones H/C y O/C obtenidos, indican mayores grados de carbonización de los productos sólidos.

De la misma manera, el incremento en la proporción de carbono está relacionado con el aumento del poder calorífico, lo cual lleva a que la densidad energética del carbonizado sea mayor

a la de la biomasa original. El contenido energético del material pirolizado se incrementa desde 29,6 MJ/kg para su tratamiento a 300 °C, hasta 31,14 MJ/kg a 500 °C. La figura 5 ilustra el comportamiento del poder calorífico superior (PCS) del cuesco y el carbonizado, en función de su porcentaje de carbono. Es posible observar que la relación entre estos parámetros sigue un comportamiento lineal, dejando ver la influencia del contenido de carbono del material sólido en su capacidad energética.

Por consiguiente, a partir del análisis del poder calorífico de los carbonizados y la distribución de los productos obtenidos durante el proceso de pirólisis, se encuentra que en el rango de temperaturas estudiado, más del 50 % de la energía inicial contenida en la biomasa se halla en el sólido. Para el caso de la pirólisis a 300 °C, un 73 % de

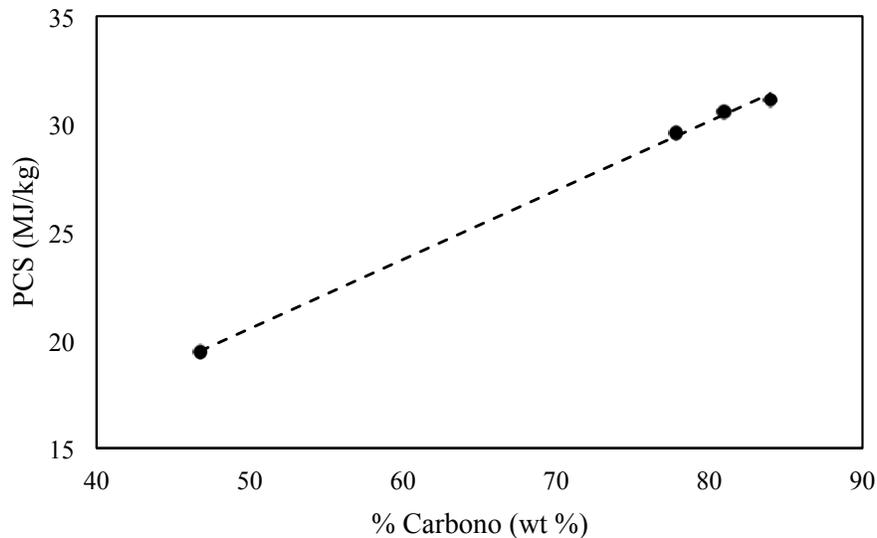


**Figura 4.** Diagrama de Van Krevelen para el cuesco de palma y el carbonizado de pirólisis

**Fuente:** Elaboración propia.

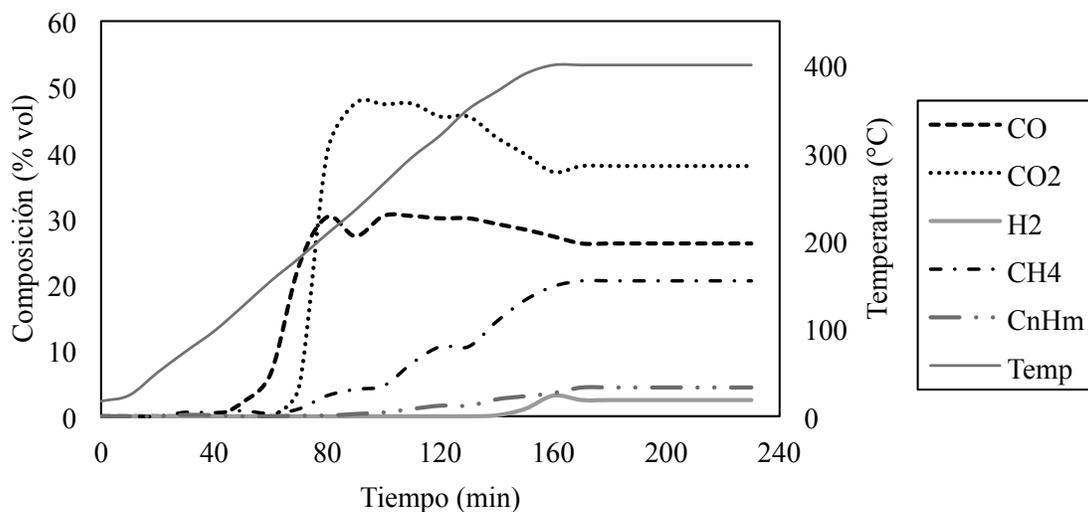
la energía inicial de la biomasa se encuentra en el carbonizado, mientras que a 500 °C, este valor es de 53 %. En este sentido, por cada kilogramo de cuesco de palma pirolizado a 500 °C se tienen 10,27 MJ de energía potencialmente aprovechable, en el producto sólido obtenido.

De acuerdo con lo anterior, el uso del carbonizado de la pirólisis como combustible sólido podría considerarse como una alternativa de aprovechamiento energético del cuesco de palma, ya sea a granel o luego de un proceso de compactación y densificación.



**Figura 5.** PCS del cuesco de palma y su carbonizado en función del porcentaje de carbono

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 6.** Evolución de la composición promedio de los gases medidos para la pirólisis del cuesco de palma a 400 °C

**Fuente:** Elaboración propia.

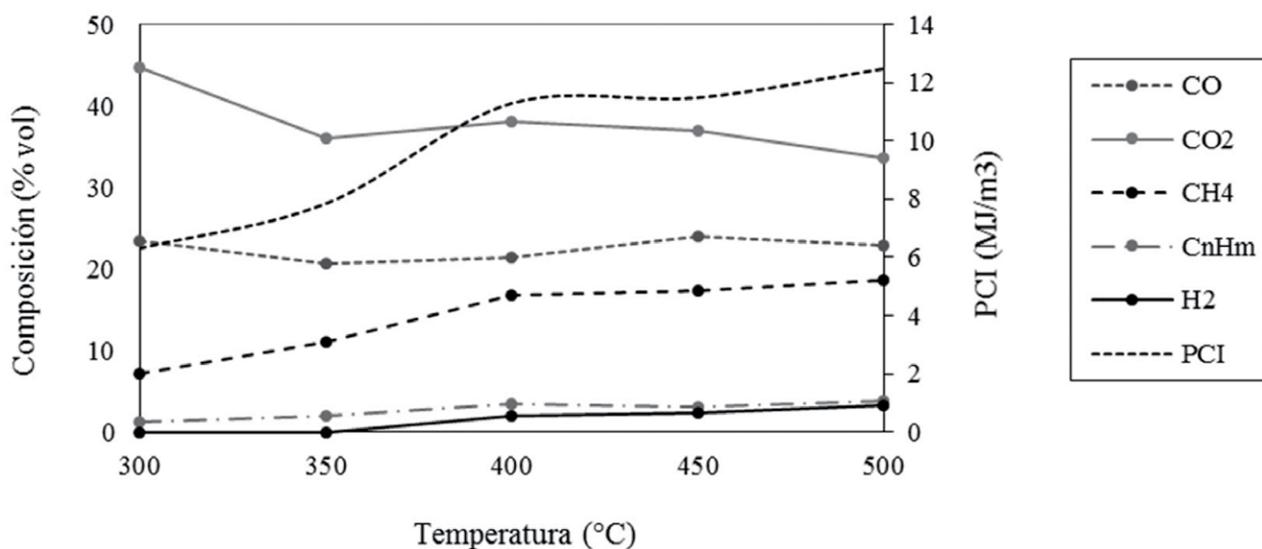
## Potencial energético del gas

Además del potencial energético de los productos sólidos obtenidos en el proceso de pirólisis del cuesco, el comportamiento de la composición y contenido energético del gas también fue estudiado. Una vez alcanzada la temperatura de pirólisis establecida, se determinó el promedio de la composición de cada gas, medida a lo largo de los 60 minutos de cada prueba. En la figura 6 se ilustra la evolución de la composición promedio del gas producido, en función del tiempo, para el caso de la pirólisis a 400 °C. La figura 7, por su parte, muestra la evolución de la composición promedio del gas, una vez alcanzadas las temperaturas objetivo en el rango analizado, así como el comportamiento de su poder calorífico.

En la figura 6 se observa que entre los 200 °C y 300 °C el gas producido durante la pirólisis del cuesco se compone principalmente de CO y CO<sub>2</sub>, con un pequeño porcentaje de CH<sub>4</sub>. En la medida en la que la temperatura se incrementa, la cantidad de CH<sub>4</sub> en el gas se hace más importante. En

una primera etapa, se considera que la descomposición de la hemicelulosa y la celulosa está relacionada con los altos porcentajes de concentración de CO y CO<sub>2</sub> registrados (Yang *et al.*, 2007). Una vez la temperatura alcanza los 400 °C se observa una disminución en la proporción del CO<sub>2</sub> y un incremento en la del CH<sub>4</sub>, llegando este último a valores cercanos al 17 %. Por encima de los 300 °C, la producción gradual de CH<sub>4</sub> podría estar relacionada en cierta medida con la descomposición de la lignina presente en la biomasa (Yang *et al.*, 2007).

Por otra parte, la variación de la composición promedio de los gases obtenidos una vez alcanzada la temperatura objetivo, presentada en la figura 7, permite observar que la concentración de CO<sub>2</sub> en el gas disminuye con el incremento de la temperatura, mientras que la proporción de CH<sub>4</sub> e H<sub>2</sub> se incrementa, llegando a valores cercanos a 19 % y 4 %, respectivamente, a una temperatura de 500 °C. Por encima de los 400 °C se observa un incremento gradual en los contenidos de H<sub>2</sub> y C<sub>n</sub>H<sub>m</sub> en el gas producido. Este último representa



**Figura 7.** Composición del gas obtenido y su poder calorífico inferior

**Fuente:** Elaboración propia.

compuestos como  $C_2H_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_3H_6$  y  $C_3H_8$  (Park *et al.*, 2014). Se evidencia igualmente que el poder calorífico de los gases se incrementa con la temperatura, lo que se relaciona en gran proporción con los contenidos de CO,  $CH_4$  y  $H_2$ . El valor del poder calorífico inferior de los gases se encuentra entre  $6,3 \text{ MJ/m}^3$  ( $5,2 \text{ MJ/kg}$ ) para  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $12,5 \text{ MJ/m}^3$  ( $10,7 \text{ MJ/kg}$ ) para  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ . A mayor temperatura, se obtiene, además de una mayor producción de gases, un mayor contenido energético en estos.

Es de notar que, a pesar de que el contenido energético de los gases de pirólisis es inferior al del carbonizado, su potencial no es despreciable. Teniendo en cuenta el rendimiento de producción de gas para el rango de temperaturas estudiado, entre un 18 % y un 24 % de la masa de materia prima pirolizada es transformada en gases, que podrían ser quemados para la producción de calor utilizable en el mismo proceso de pirólisis o en otros procesos. En este sentido, tomando el caso de la pirólisis del cuesco de palma a  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ , por cada kilogramo de biomasa, se tendrían aproximadamente 2,5 MJ de energía disponible en el gas producido.

## CONCLUSIONES

El proceso de pirólisis de biomasa permite la transformación de la materia prima en productos sólidos, líquidos y gaseosos con potencial de aprovechamiento energético. Para el caso de la pirólisis lenta del cuesco de palma, se obtuvieron altos rendimientos de producción de carbonizado en el rango de temperaturas estudiado, encontrándose estos entre el 33 % y el 50 % de la masa inicial.

Desde el punto de vista energético, teniendo en cuenta el contenido de carbono y poder calorífico, se considera que el carbonizado es el principal producto de la pirólisis en el rango de temperaturas analizado. En consecuencia, el uso de este como combustible sólido se considera viable, ya sea a granel o luego de un proceso de compactación. Al tener una mayor densidad energética, el

carbonizado puede ser transportado con mayor facilidad que la biomasa original, para su uso posterior en procesos de combustión o gasificación. Por otra parte, la alta proporción de carbono identificada en los carbonizados y su alto rendimiento, ha sugerido también su uso como precursores de carbones activados.

En cuanto a los gases, mayores temperaturas de pirólisis están relacionadas con una mayor producción de gas y un mejor poder calorífico. En este contexto, el potencial energético de los gases podría ser aprovechable en diversos procesos, incluyendo la pirólisis, para suplir parte del calor necesario para su desarrollo. Sin embargo, teniendo en cuenta que la pirólisis requiere de una atmósfera inerte para llevarse a cabo, las alternativas para el calentamiento indirecto del proceso requerirán del uso de intercambiadores de calor, y deberán estudiarse en detalle en función de cada aplicación. Aún con esta aclaración, es de resaltar que el contenido de energía de los gases de pirólisis puede llegar a representar hasta un 13 % de la energía disponible en la biomasa inicial, por lo cual, su potencial debe ser tenido en cuenta.

Por consiguiente, la pirólisis lenta se constituye como un proceso de especial interés para la valorización de biomasa residual como el cuesco de palma, a partir de su aprovechamiento energético; y de la producción de materiales con potencial de ser usados como combustibles o precursores de productos de valor agregado.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Servicio Geológico Colombiano, por su apoyo en la realización de las pruebas de caracterización físico-química de la materia prima y los carbonizados del proceso. A las empresas extractoras de aceite de palma: Unipalma S.A. y La Mejorana S.A., por la información y materias primas suministradas para el estudio, y al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (Colciencias), por la financiación

otorgada para el proyecto con código 1101-701-49238, en el marco de la convocatoria 701-2014.

## FINANCIAMIENTO

El presente trabajo de investigación ha sido financiado por el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (Colciencias), en el marco de la convocatoria 701-2014 – “Convocatoria para el apoyo al desarrollo y validación precomercial y comercial de prototipos funcionales de tecnologías biológicas, biomédicas y energéticas con alto potencial de crecimiento empresarial”.

## REFERENCIAS

- Angin, D. (2013). Effect of Pyrolysis Temperature and Heating Rate on Biochar Obtained from Pyrolysis of Safflower Seed Press Cake. *Bioresource Technology*, 128, 593–597. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.150>
- Basu, P. (2010). *Biomass Gasification and Pyrolysis. Practical Design*. 1a. ed. Oxford: Elsevier Inc.
- Basu, P. (2013). Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction. En: P. Basu *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction* (pp. 147–176). 2a. ed. Londres: Elsevier Inc. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-396488-5.00005-8>
- Demirbas, A. (2004). Effects of Temperature and Particle Size on Bio-Char Yield from Pyrolysis of Agricultural Residues. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 27(2), 243–248. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.jaap.2004.07.003>
- Escalante, H.; Orduz, J.; Zapata, H.J.; Cardona, M.C. y Duarte, M. (2010). *Atlas de Biomasa: UPME. Anexo E. Potencial energético de la biomasa residual*. Recuperado de: [http://www.si3ea.gov.co/si3ea/documentos/documentacion/Biodiesel/Anexo\\_E\\_Potencial\\_energetico\\_departamental.pdf](http://www.si3ea.gov.co/si3ea/documentos/documentacion/Biodiesel/Anexo_E_Potencial_energetico_departamental.pdf)
- Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite (Fedepalma) (2014). *Anuario Estadístico de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia y en el mundo*. Bogotá, Colombia.
- García, J.A.; García, M.P. y Das, K.C. (2008). Determinación de los parámetros cinéticos de degradación térmica de los subproductos de las plantas de beneficio mediante análisis termogravimétrico y calorimetría de barrido diferencial. *Revista Palmas*, 29(4), 31-46.
- Gómez, A.; Klose, W. y Rincón, S. (2010). *Carbón activado de cuesco de palma. Estudio de termogravimetría y estructura*. Kassel: Kassel University Press.
- Kong, S.H.; Loh, S.K.; Bachmann, R.T.; Rahim, S.A. y Salimon, J. (2014). Biochar from oil palm biomass: A review of its potential and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 729–739. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.107>
- Lee, Y.; Park, J.; Ryu, C.; Gang, K.S.; Yang, W.; Park, Y.K.; ... Hyun, S. (2013). Comparison of Biochar Properties from Biomass Residues Produced by Slow Pyrolysis at 500°C. *Bioresource Technology*, 148, 196–201. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.08.135>
- Liu, Z. y Han, G. (2015). Production of Solid Fuel Biochar from Waste Biomass by Low Temperature Pyrolysis. *Fuel*, 158, 159–165. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.05.032>
- Lua, A.C.; Lau, F.Y. y Guo, J. (2006). Influence of Pyrolysis Conditions on Pore Development of Oil-Palm-Shell Activated Carbons. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 27(1-2), 96–102. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.jaap.2005.08.001>
- Okoroigwe, E. y Saffron, C. (2012). Determination of Bio-Energy Potential of Palm Kernel Shell by

Physicochemical Characterization. *Nigerian Journal of Technology*, 31(3), 329–335. Recuperado de: <http://nijotech.com/index.php/nijotech/article/view/561>

Park, J.; Lee, Y.; Ryu, C. y Park, Y.K. (2014). Slow Pyrolysis of Rice Straw: Analysis of Products Properties, Carbon and Energy Yields. *Bioresource Technology*, 155, 63-70. Recuperado de: <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.084>

Titiladunayo, I.F.; McDonald, A.G. y Fapetu, O.P. (2012). Effect of Temperature on Biochar Product Yield from Selected Lignocellulosic Biomass in a Pyrolysis Process. *Waste and Biomass Valorization*, 3(3), 311–318. Recuperado de: <http://doi.org/10.1007/s12649-012-9118-6>

Yang, H.; Yan, R.; Chen, H.; Lee, D.H. y Zheng, C. (2007). Characteristics of Hemicellulose, Cellulose and Lignin Pyrolysis. *Fuel*, 86(12-13), 1781–1788.





## Análisis de sequías meteorológicas para la cuenca del río Dagua, Valle del Cauca, Colombia

### Analysis of meteorological drought for Dagua river basin, Valle del Cauca, Colombia

Nathalia González López<sup>1</sup>, Yesid Carvajal Escobar<sup>2</sup>,  
Wilmar Loaiza Cerón<sup>3</sup>

**Fecha de recepción:** 21 de agosto de 2015

**Fecha de aceptación:** 15 de febrero de 2016

**Cómo citar:** González López, N., Carvajal Escobar, Y., & Loaiza Cerón, W. (2016). Análisis de sequías meteorológicas para la cuenca del río Dagua, Valle del Cauca, Colombia. *Revista Tecnura*, 20(48), 101-113. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.2.a07

#### Resumen

**Contexto:** Los eventos climáticos extremos ocasionan grandes retos para la sostenibilidad social, económica y medioambiental, de una región, como es el caso de las sequías que afectan significativamente las actividades agrícolas, aumentando el riesgo de la subsistencia y la seguridad alimentaria de la población rural, principalmente de países en desarrollo. Este estudio tuvo como objetivo caracterizar las sequías meteorológicas en la cuenca del río Dagua, Valle del Cauca.

**Método:** Se estimó la intensidad, magnitud, duración y frecuencia de eventos de sequía mediante el uso del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) para agrupaciones semestrales y anuales, usando el registro de 19 estaciones en el período comprendido entre 1982-2011

**Resultados:** Al menos una sequía fue identificada en cada serie, mientras el área próxima a la región subxerófica de la cuenca, presentó mayor frecuencia

de sequías extremadamente fuertes y los menores umbrales de precipitación mínima; el mayor porcentaje de cobertura espacial coincidió con la ocurrencia de eventos del fenómeno El Niño, tales como los ocurridos en 91-92 y 09-10.

**Conclusiones:** Los resultados obtenidos sirven como aproximación para la predicción y caracterización de las sequías, y ofrecen insumos para generar estrategias de planificación y mitigación de sus impactos.

**Palabras clave:** Cuenca del río Dagua, Fenómeno El Niño Oscilación del Sur, Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), Sequías meteorológicas.

#### Abstract

**Context:** Extreme climatic events causes great challenges for social, economic and environmental sustainability of a region. Droughts affect agricultural activities significantly thus endangering the livelihoods and food security of rural populations, this is especially crucial for developing countries. The

- 1 Ing. Agrícola, Joven Investigador de COLCIENCIAS, Universidad del Valle, Escuela de Ingeniería de los Recursos Naturales y del Ambiente, Cali, Colombia. Contacto: [Nathalia.gonzalez.lopez@correounivalle.edu.co](mailto:Nathalia.gonzalez.lopez@correounivalle.edu.co)
- 2 Ingeniero Agrícola, M.Sc en Suelos y Aguas, PhD en Hidráulica y Medio Ambiente, Docente de la Universidad del Valle, Escuela de Ingeniería de los Recursos Naturales y del Ambiente, Cali, Colombia. Contacto: [yesid.carvajal@correounivalle.edu.co](mailto:yesid.carvajal@correounivalle.edu.co)
- 3 Geógrafo, M.Sc. en Desarrollo Sustentable. Doctorado em clima e ambiente (c), Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA) & Universidade do Estado do Amazonas, Ciudad Manaus, Estado de Amazonas. Brasil. Contacto: [wilmar.ceron@correounivalle.edu.co](mailto:wilmar.ceron@correounivalle.edu.co)

objective of this study is to characterize meteorological drought in Dagua river basin, Valle del Cauca. Method: Intensity, magnitude, duration and frequency of drought events was estimated using the Standardized Precipitation Index (SPI), for semi-annual and annual groupings with records of 19 stations, during the period 1982-2011

**Results:** At least one drought was identified in each series; the area near to the subxerófitic Basin region, exhibits more frequency of extremely strong drought and lower threshold of minimum precipitation;

the largest percentage of spatial coverage of drought coincides with El Niño phenomena events, such as those that occurred in 91-92 to 09-10.

**Conclusions:** The results obtained provide an approach for prediction and characterization of drought, and offer inputs to generate strategies for planning and mitigation of their impacts.

**Keywords:** Watershed Dagua river, El Niño/Southern Oscillation (ENSO), Standardized Precipitation Index (SPI), Meteorological droughts.

## INTRODUCCIÓN

Las fluctuaciones climáticas que se han observado en diversas regiones del planeta están siendo objeto de interés, debido principalmente al aumento en la frecuencia y severidad de desastres socio-naturales y a su impacto directo en la producción agrícola. De acuerdo con el *Informe sobre desarrollo humano*, del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD, 2014), en promedio 200 millones de personas se ven afectadas cada año por desastres naturales, la mayor parte de ellas en países en desarrollo. En el último siglo más de 2000 millones de personas han sufrido a causa de sequías y 11 millones han perdido la vida como consecuencia de sus efectos (Kaipper, 2013).

Las sequías es uno de los fenómenos más dañinos relacionados con el clima, y a diferencia de las inundaciones, los huracanes, los tornados y los terremotos, que se producen durante periodos limitados de tiempo y resultan en perjuicios visualmente obvios, el desarrollo de las sequías ocurre lentamente y en forma inapreciable, por lo que a menudo pasan desapercibidas hasta que la escasez de precipitaciones se vuelve severa y los impactos en los ecosistemas naturales y las actividades humanas comienzan a ocurrir. Este fenómeno causa serios daños a la

economía de un país, especialmente al sector agrícola y aquellos que dependen directamente de los recursos hídricos (Ding, Hetes y Windhalm, 2011; Wagner, Ortiz y Barragán, 2012); adicionalmente, se debe prestar atención particular a los posibles incendios forestales y al incremento en la erosión del suelo, que a su vez reduce la capa fértil de este, la capacidad de crecimiento de las plantas y provoca un aumento en la deposición de sedimentos, y por tanto, en la turbiedad de los ríos.

Las sequías ocurren en casi todas las zonas climáticas, tanto en las de alta como baja precipitación; sin embargo la variabilidad climática (VC), los distintos factores socioeconómicos y la naturaleza estocástica de la demanda agua en las diferentes regiones del mundo, impide establecer una definición precisa de la sequía (Mishra y Singh, 2010). En términos generales, la sequía se puede definir como un fenómeno temporal que resulta de la escasez o de una irregular distribución prolongada de la precipitación, la cual se encuentra ligada a anomalías océano atmosféricas como el fenómeno ENOS. Para considerar como sequía a una reducción del agua y humedad disponibles, Morales (2005) señala que se debe cumplir, entre otras, que la reducción sea temporal y significativa respecto a la cantidad normal o esperada para un período

dado; y que la reducción se defina con respecto a una *norma* y que el periodo empleado como base para la *norma* esté especificado.

De acuerdo con sus características, impactos y metodologías, suele agruparse en diferentes tipos: sequía meteorológica, hidrológica, agrícola y socioeconómica; la primera hace referencia al déficit de precipitación por un periodo extendido de tiempo respecto a las condiciones climáticas normales (Bedoya, Contreras y Ruiz, 2010; Ezzine, Bouziane y Ouazar, 2014; Silva *et al.*, 2013); las demás son consecuencia de esta; por lo cual, es importante monitorearla a través de diferentes índices, y así detectar zonas vulnerables para implementar medidas de acción con el fin de reducir sus posibles impactos (Ortega, 2012). Esta investigación caracterizó las sequías meteorológicas, a partir de los parámetros de intensidad, magnitud, frecuencia, duración y cobertura espacial, obtenidos del cálculo del SPI semestral y anual, en la cuenca del río Dagua; lo cual representa un papel importante en la inserción económica de Colombia, pero muestra un deterioro progresivo, ocasionado por la ampliación de la frontera agrícola y su inadecuado manejo, la desestabilización de la oferta ambiental, la degradación de suelos, la pérdida de la calidad de agua, la contaminación y problemas sociales (Daza, Reyes y Fajardo, 2012; Cardona, Ávila, Carvajal y Jiménez, 2013), que sumados a la incidencia del fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENOS) podrían agravar los impactos en la economía, la sociedad y los recursos naturales.

## METODOLOGÍA

La metodología se agrupó en dos actividades, la primera consistió en recopilar, procesar y analizar información meteorológica de la zona; en la segunda etapa se calcularon diferentes parámetros para caracterizar las sequías meteorológicas.

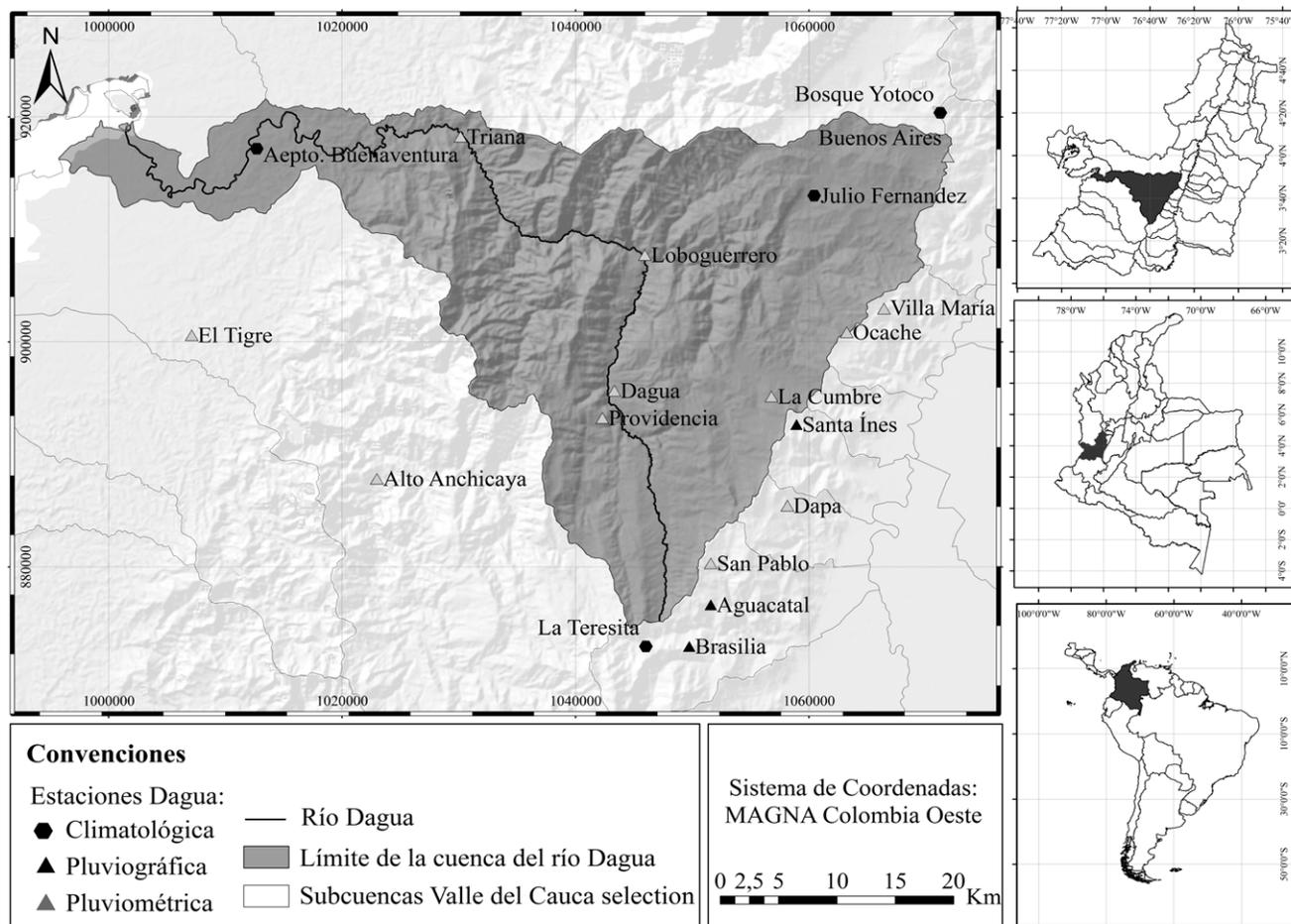
## Descripción y localización de la cuenca de estudio

La cuenca del río Dagua está localizada en el pacífico vallecaucano (figura 1), tiene una extensión aproximada de 1.422 km<sup>2</sup>, de los cuales el 98,2 % corresponden a zona de ladera y el 1,8 % a planicie marina (CVC, 2007). La precipitación total anual oscila entre los 2.000 y 8.000 mm en parte baja, y entre 800-1.600 mm en la parte alta, al oriente de la cuenca.

La cuenca representa un papel importante en la conectividad de Colombia con el principal puerto sobre la costa pacífica (Buenaventura) y, por tanto, para la competitividad de la industria. Sin embargo los derrumbes y deslizamientos en ocasiones afectan el tránsito de la carretera Buga-Buenaventura, y las 255.000 ton/año de lodo y sedimento, que deposita el río Dagua y sus afluentes en la Bahía, generan un alto costo de dragado del canal de acceso (PNUD, 2008). Su oferta hídrica está asociada a la ocurrencia del fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENOS); en su fase extrema cálida, ocasiona reducciones de la precipitación hasta en un 39 % (Gutiérrez, Carvajal y Ávila, 2013), lo que podría generar déficit del recurso. La principal actividad económica es la agricultura de secano, que sumada a la poca cobertura vegetal en la parte alta de la cuenca, y la contaminación del recurso hídrico, hacen de esta un área altamente vulnerable a la ocurrencia de eventos de sequías.

## Selección, recopilación y procesamiento de la información

Los criterios para la selección de la red meteorológica fueron: ubicación, tiempo de registro, vigencia de funcionamiento, porcentaje de datos faltantes inferiores al 10 % en cada estación y que el comportamiento fuera estadísticamente confiable según el análisis exploratorio de datos (AED); este último consiste en detectar por



**Figura 1.** Localización de la cuenca y de las estaciones seleccionadas para el estudio

Fuente: elaboración propia.

medios gráficos y cuantitativos la existencia o no de alguna tendencia o cambio, y la homogeneidad de la serie. La estimación de los datos faltantes se realizó con el método de proporciones normales; posteriormente se realizó un análisis gráfico, a través de histogramas y diagramas de cajas; se hizo un análisis descriptivo numérico, por medio de medidas de tendencia central y dispersión; seguido de la prueba de normalidad y del análisis confirmatorio, mediante la prueba de U Mann Whitney que es una de las pruebas no paramétricas más utilizadas (Castro y Carvajal, 2010).

### Caracterización de las sequías meteorológicas

El SPI cuantifica el déficit o exceso de precipitación, ajustando los datos a una distribución, normalmente Gamma, para definir la relación de la probabilidad de precipitaciones y transformarla a una distribución normal estandarizada, con media cero (0) y desviación estándar uno (1) (McKee, Doesken y Kleist, 1993; Núñez, Núñez, Podestá y Skansi, 2005). Permite determinar el inicio, final, duración, intensidad, magnitud y frecuencia de las sequías, solo con datos de

precipitación; por lo que puede aplicarse en zonas con poca información, adicionalmente puede calcularse en diferentes escalas de tiempo, lo que hace apto para estudiar sequías relevantes para la meteorología, la agricultura y la hidrología superficial y subterránea (Zhai *et al.*, 2010; González y Domínguez, 2012; Zucarelli, 2013; Asadi, Sivakumar y Sharma, 2014). Esta investigación comparó la precipitación acumulada de 6 y 12 meses de un año particular con la precipitación acumulada promedio del registro total; las series se calcularon de la suma móvil de datos de precipitación mensual de 1982 a 2011 de 19 estaciones. Se seleccionaron estas agrupaciones ya que permiten tener mayor análisis temporal del fenómeno y se pueden asociar mejor a la fase cálida del fenómeno ENOS. Una vez estandarizados las anomalías se clasifican teniendo en cuenta los valores de la tabla 1.

**Tabla 1.** Clasificación del SPI

SPI	Categoría
Mayor a 2,0	Humedad extrema
2,0 a 1,5	Humedad severa
1,5 a 1,0	Humedad moderada
1,0 a -1,0	Cerca de lo normal
-1,0 a -1,5	Sequía suave
-1,5 a -2,0	Sequía severa
Menor a -2,0	Sequía extrema

**Fuente:** adaptado de Lloyd-Hughes y Saunders (2002).

*Eventos, intensidades y magnitudes.* Cada evento de sequía inicia cuando el índice es igual o menor a -1,00 y termina cuando se hace mayor; el valor que alcanza el SPI para cada agrupación es la intensidad del evento, y la magnitud se obtiene de la sumatoria de los valores consecutivos del SPI que indican sequía. Dado que las magnitudes pueden tomar diversos valores, se clasificaron en cinco tipos de sequía meteorológica, según el valor alcanzado, para obtener la *frecuencia de ocurrencia de cada evento*. Los rangos se calcularon de acuerdo con el

comportamiento de los datos y se muestran en la tabla 2; posteriormente se estimó el porcentaje de ocurrencia de cada una.

**Tabla 2.** Tipo sequías de acuerdo a la magnitud

Sequía	Semestral	Anual
Leve	$1 \leq M < 5$	$1 \leq M < 10$
Poco fuerte	$5 \leq M < 10$	$10 \leq M < 20$
Fuerte	$10 \leq M < 15$	$20 \leq M < 30$
Muy fuerte	$15 \leq M < 20$	$30 \leq M < 40$
Extremadamente fuerte	$> 20$	$> 40$

**Fuente:** elaboración propia.

*Umbrales de precipitación.* Para encontrar la lámina de lluvia (mm) que corresponde al límite mínimo para definir una sequía, se retrotrajeron los valores del  $SPI = -1$  de las series, es decir, se determinó la ecuación característica de los valores del SPI ( $x$ ) asociados al valor de la precipitación acumulada para cada agrupación ( $y$ ), y se calculó la lámina de lluvia correspondiente, cuando SPI es -1. Si en una agrupación  $x$  no logra acumularse esa cantidad de lluvia, en dicha agrupación ocurriría una sequía (Hernández, 2008).

*Cobertura espacial de la sequía.* Para delimitar el análisis de la información obtenida, se determinó la cobertura espacial de los eventos de sequía, a partir del porcentaje de estaciones en las que se calcularon valores de  $SPI \leq -1,0$  para seleccionar eventos específicos que presentaron mayor cobertura espacial para realizar un análisis más detallado.

## RESULTADOS

### Selección, recopilación y procesamiento de la información necesaria

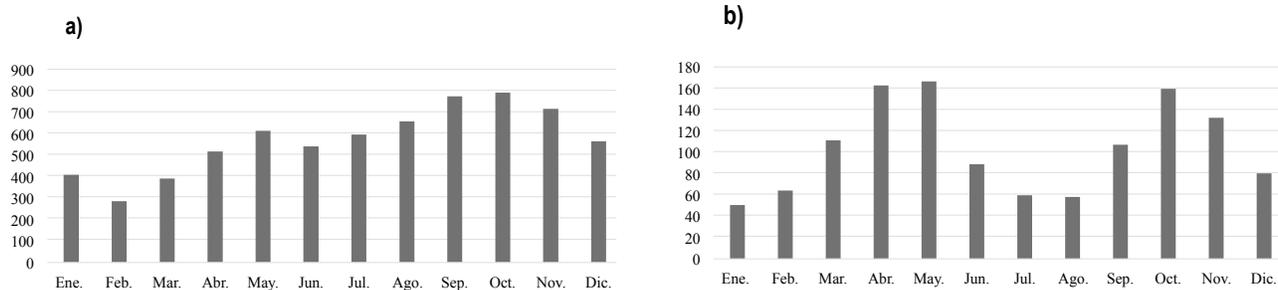
Las series de precipitación mensual empleadas, de las 19 para el periodo 1982-2011, tenían menos del 10 % de DF; a partir de los histogramas

se observó que los valores extremos tienen una menor frecuencia y los diagramas de cajas indicaron que la estación Aeropuerto de Buenaventura fue la única que no presentó valores atípicos por fuera de su cerco. Las partes alta y media de la cuenca presentaron un comportamiento bimodal de las precipitaciones, es decir, dos periodos con mayor frecuencia de valores de precipitación altos (entre marzo-mayo y septiembre-noviembre) y dos periodos con precipitaciones menores (entre diciembre-febrero y junio-agosto), la figura 2b muestra un ejemplo de una de las estaciones ubicada en zona alta,

en contraste la parte baja es monomodal, donde se presentan precipitaciones todo el año (figura 2a).

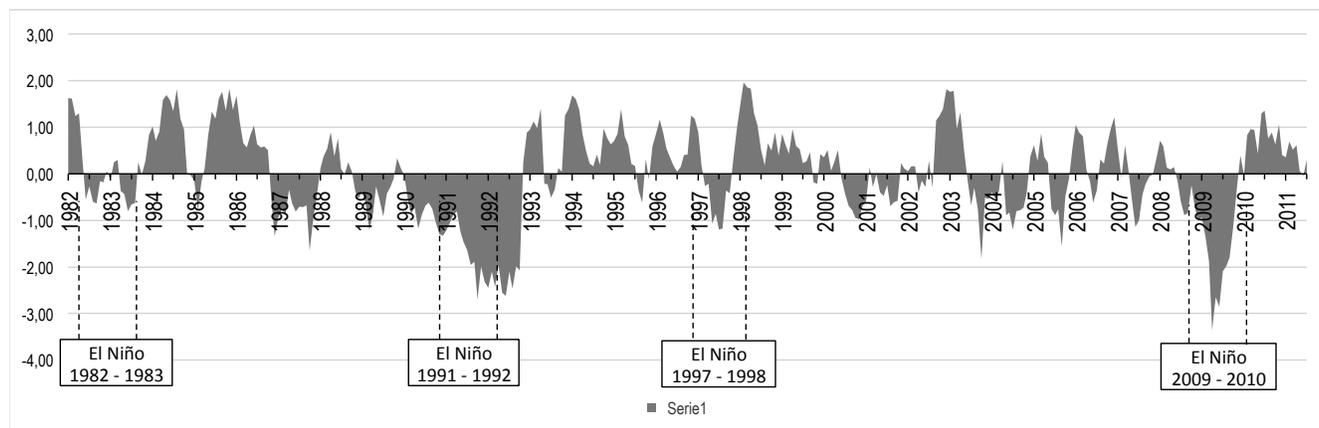
### Eventos de sequía, intensidades y magnitudes

En todas series se identificó al menos un evento de sequía. La figura 3 muestra un ejemplo del comportamiento de la intensidad del SPI en la estación Aguacatal, que presentó la mayor magnitud de 37,94, desde octubre-1991 hasta marzo-1993, con un pico de intensidad de -2,70 en



**Figura 2.** Precipitación media mensual mutianual. **a)** Estación Aeropuerto Buenaventura, **b)** Estación La Cumbre

**Fuente:** elaboración propia.



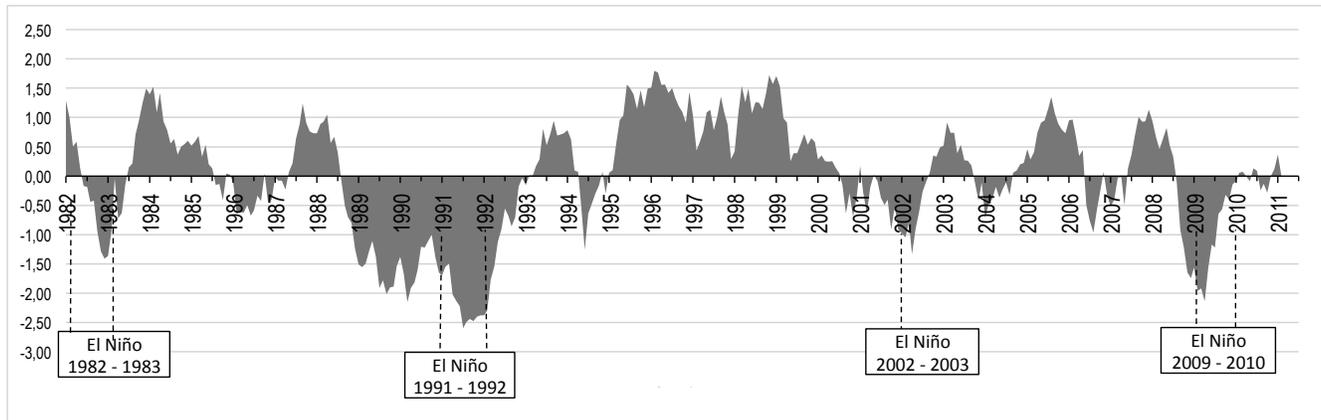
**Figura 3.** Transcurso del SPI semestral de 1982 a 2011 en la estación Aguacatal

**Fuente:** elaboración propia.

marzo-1992. Para la agrupación anual, la misma estación reportó una magnitud de 55,04 que abarcó desde febrero-1991 hasta abril-1993, con un pico de -3,17 en noviembre-1992, alcanzando la segunda magnitud más alta, antecedida por la serie de La Teresita (figura 4) en la que se calculó una magnitud de 73,64 desde

noviembre-1989 hasta abril-1993, con un pico de -2,59 en junio-1992. Es posible identificar que los eventos de sequía coinciden con años en los que según la NOAA se presentó El Niño, como: 82-83, 91-92, 97-98 y 09-10.

En las tablas 3 y 4 se muestran los cinco eventos con las magnitudes máximas para la



**Figura 4.** Transcurso del SPI anual de 1982 a 2011 en la estación Teresita

**Fuente:** elaboración propia.

**Tabla 3.** Magnitud de los diez eventos máximos. Agrupación semestral

No.	Estación	Magnitud	Inicio	Final	Int <sub>máx</sub>
1	Aguacatal	37,94	oct-91	mar-93	2,7
2	San Pablo	37,71	abr-87	jun-88	3,3
3	Brasilia	29,72	oct-91	ene-93	2,78
4	La Teresita	28,88	oct-91	ene-93	2,37
5	San Pablo	26,19	mar-91	ago-92	2,06

**Fuente:** elaboración propia.

**Tabla 4.** Magnitud de los diez eventos máximos. Agrupación anual

No.	Estación	Magnitud	Inicio	Final	Int <sub>máx</sub>
1	La Teresita	73,64	nov-89	abr-93	2,49
2	Aguacatal	55,04	feb-91	abr-93	3,17
3	El Tigre	48,25	dic-00	dic-03	1,85
4	Santa Inés	46,17	abr-09	feb-11	2,96
5	Brasilia	37,41	oct-91	mar-93	3,02

**Fuente:** elaboración propia.

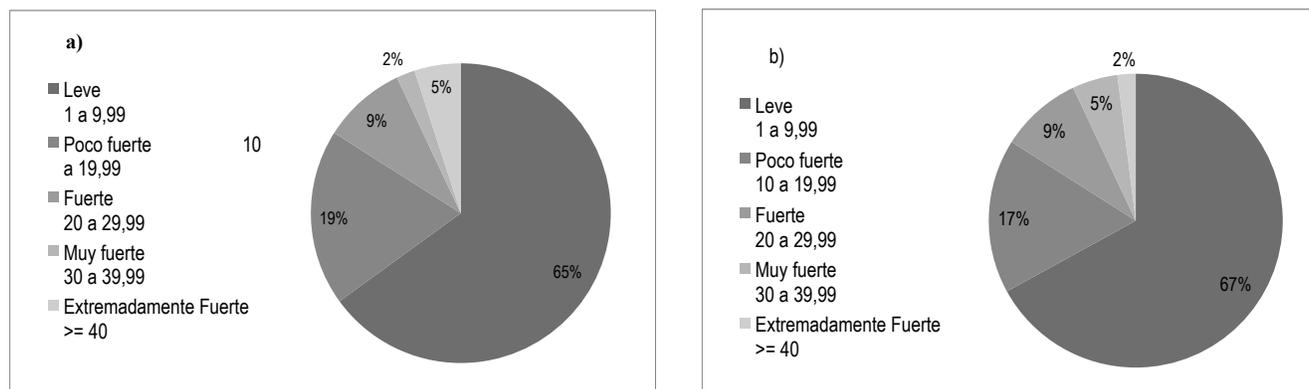
agrupación semestral y anual respectivamente; se indica la fecha de inicio y finalización del evento, así como la máxima intensidad ( $Int_{m\acute{a}x.}$ ). Las mayores magnitudes no presentan necesariamente las duraciones más largas; la intensidad alcanzada influye en la magnitud final; por ejemplo, la estación Brasilia presentó una magnitud de 29,79 en 16 agrupaciones semestrales, mientras que la estación San Pablo alcanzó una magnitud de 37,71 en solo 15 semestres continuos.

### Frecuencia de ocurrencia de eventos de sequía

En la agrupación semestral se calcularon 304 eventos de sequía, de los 14 fueron clasificados como sequía extremadamente fuerte, es decir aproximadamente el 5 %. Para la agrupación anual se reportaron 171 eventos y solo 4 fueron extremadamente fuertes, según la clasificación de la tabla 2. Para ambas agrupaciones se evidenció que la mayor ocurrencia es de sequías leves y a medida que aumenta su magnitud sus frecuencias son menores; las sequías leves están asociadas a intensidades de moderadas a bajas y

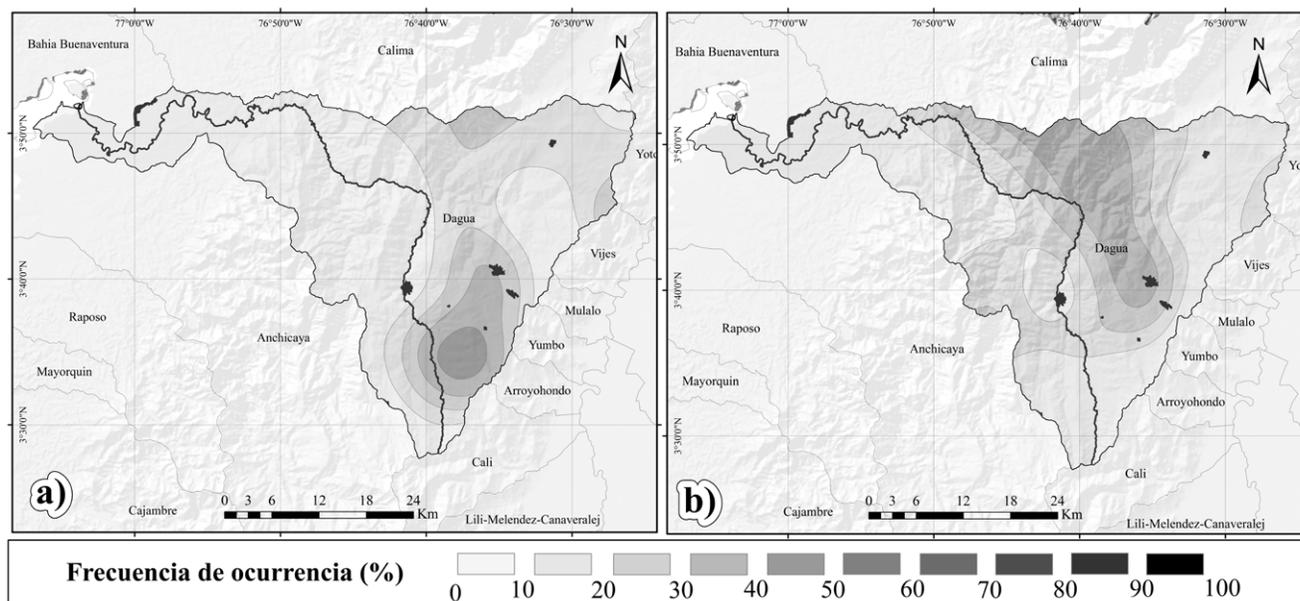
de corta duración. Los resultados indican que el número de eventos se reduce en las agrupaciones anuales respecto a las semestrales, y estas a su vez son menores que las sequías trimestrales, estas últimas fueron calculadas por Loaiza (2014), quien en su estudio reportó 545 eventos, para el mismo periodo. Lo anterior refleja que para agrupaciones más largas se obtiene un menor número de eventos, pero estos presentan una mayor magnitud y duración. La figura 5 muestra el porcentaje de ocurrencia de las sequías según su magnitud para cada agrupación.

La distribución espacial de la frecuencia de ocurrencia proporciona información sobre el comportamiento de la reducción de la precipitación en la cuenca. Los resultados indicaron que las zonas con un mayor porcentaje de sequías leves (90 % y 100 %), no presentaban una alta frecuencia de ocurrencia de sequías fuertes, estas últimas oscilaron entre el 0 % y el 10 %. La figura 6 muestra un ejemplo de la distribución espacial de la frecuencia de ocurrencia de sequías fuertes; a partir de la cual se identificó que para la agrupación semestral (a), este tipo de sequías afectó principalmente la zona sur de la cuenca; sin embargo no superó el



**Figura 5.** Frecuencia de ocurrencia de sequía según su magnitud. a) Semestral, b) Anual

**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 6.** Frecuencia de ocurrencia (%) de sequía fuerte: **a)** Agrupación semestral, **b)** Agrupación anual

**Fuente:** elaboración propia.

50 % de frecuencia de ocurrencia en ninguna zona. Para la agrupación anual (b), se observaron frecuencias entre el 30 % y 40 % desde la zona norte de la cuenca hasta el centro de ésta, tal como se muestra en la figura 6b; condición que sumada a la presencia del enclave subxerofítico, hace de esta zona la más susceptible a los eventos de sequía.

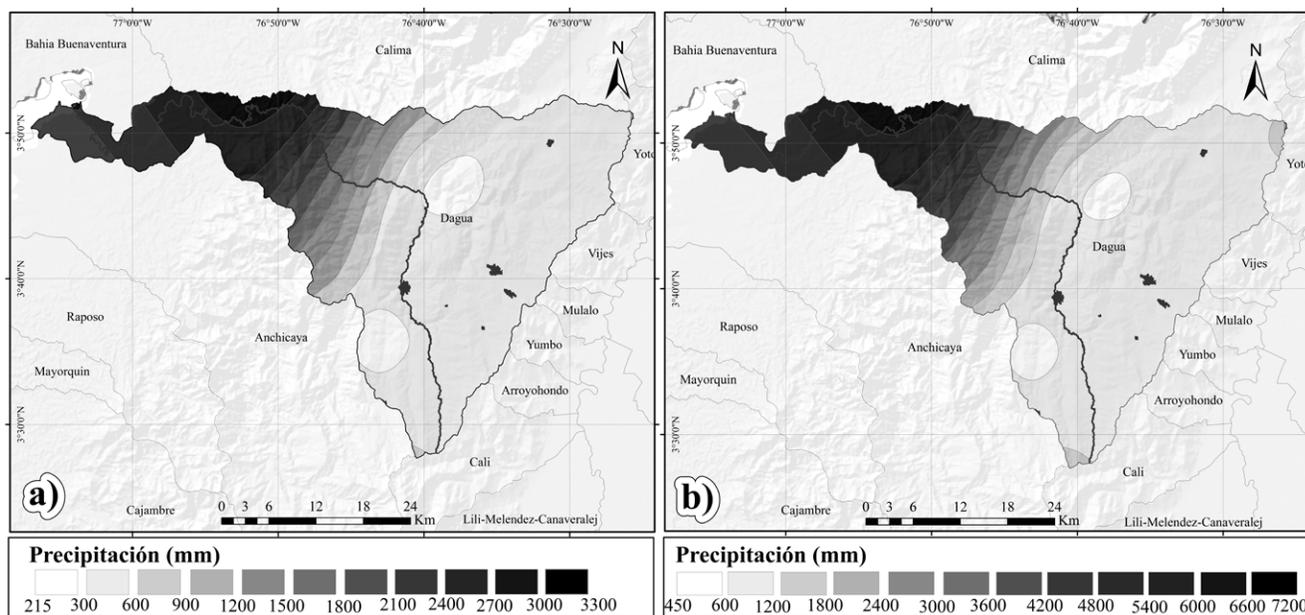
El zona seca del río Dagua está al occidente de Colombia, sobre la vertiente occidental de la cordillera Occidental, si bien es un área pequeña dentro del Chocó biogeográfico, con un microclima muy seco que contrasta con la humedad de su zona de influencia, compuesta por bosques húmedos tropicales, cumple un papel importante en la regulación del clima en el ámbito local y en el mantenimiento de especies de interés especial endémicas, entre otros servicios ecosistémicos (Instituto de Investigaciones Ambientales del Paífico Jhon Von Neuman, 2012).

## Umbrales de precipitación

Se calculó la lámina de precipitación a partir de la cual puede ocurrir una sequía; esto con el fin de proporcionar información clave para generar sistemas de alerta temprana de este fenómeno. En la figura 7 se muestra la distribución de los umbrales semestrales (a) y anuales (b), en ambas se presentó un comportamiento similar, los valores acumulados de lluvia son menores en la parte media y alta de la cuenca, y aumentan hacia la parte baja, que es la más próxima al Pacífico vallecaucano.

## Cobertura espacial de la sequía

Se eligieron eventos particulares con base a la cobertura espacial que presentaron. Para la agrupación semestral se calcularon 22 eventos con un porcentaje de cobertura mayor al 53 %, de los cuales 17 corresponden a años a los que se



**Figura 7.** Umbral de precipitación mínimos: **a)** Agrupación semestral, **b)** Agrupación anual

**Fuente:** elaboración propia.

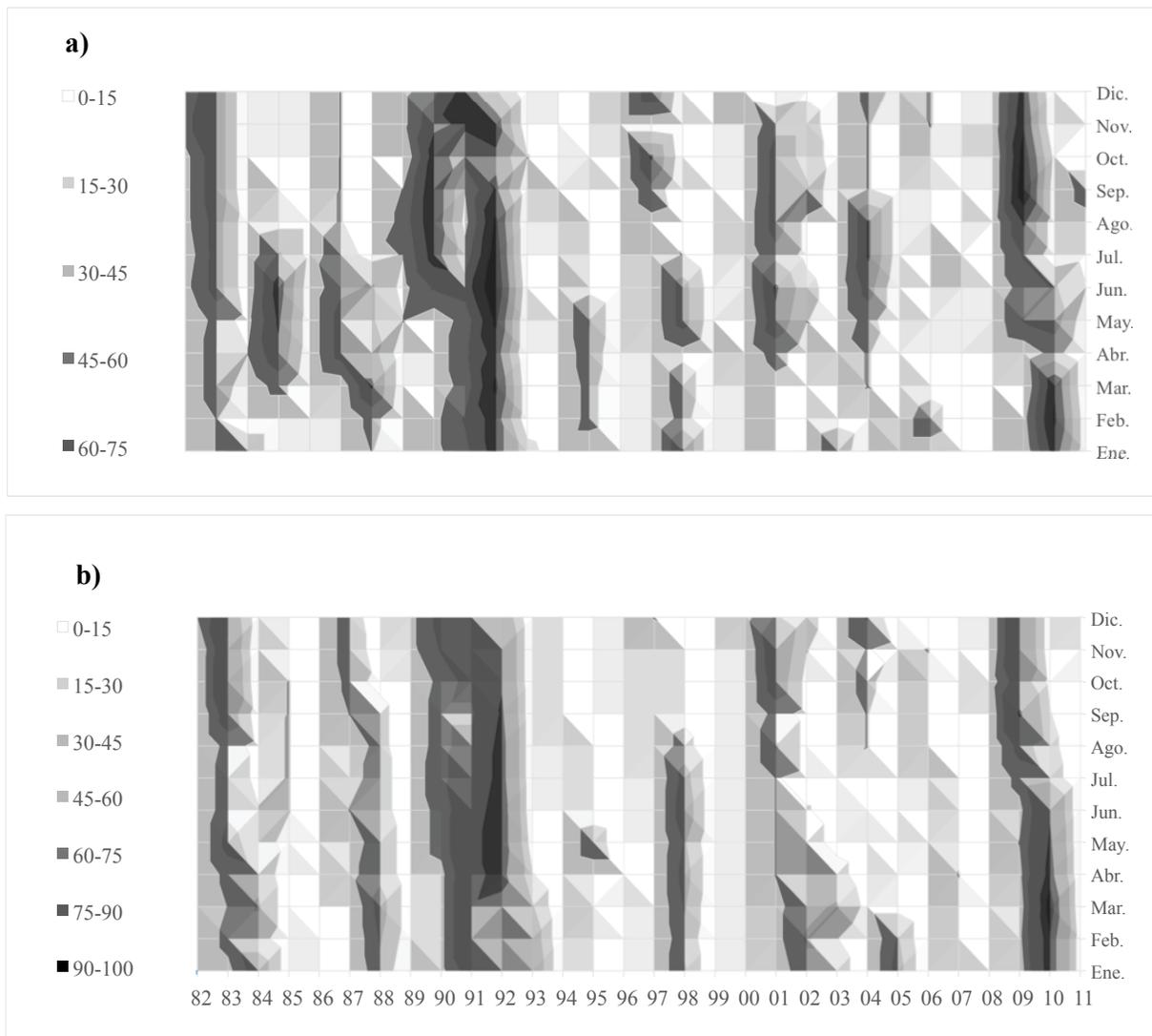
presentó el fenómeno El Niño en el país. Para la agrupación anual se reportaron 24 eventos con una cobertura espacial igual o mayor al 53 % y todos coinciden con años El Niño, como los ocurridos en 1991, 1992, 2009 y 2010. La figura 8 ilustra los resultados obtenidos, a partir de los cuales se identificó que tanto para la agrupación semestral (a) como para la anual (b), el año 1992, finales de 2009 y comienzos de 2010 fueron los años con mayor cobertura espacial. Se debe recordar que los acrósticos usados representan el último mes de la agrupación, por ejemplo, para el caso del SPI semestral, en el eje Y, el mes de agosto está representando los meses de marzo hasta agosto.

En la agrupación semestral de jun-92 se alcanzó una cobertura de 74%, al igual que en sep-09, en feb-10 el 63% de las estaciones reportaron un evento de sequía. Para la agrupación anual, se alcanzó una cobertura del 84% en mar-10, que fue la mayor en todo el registro.

Si bien el fenómeno El Niño de 2009-2010 fue clasificado como moderado, afectó de manera significativa la dinámica climática promedio del país, generó condiciones extremas en algunas regiones e impactó de manera importante el funcionamiento normal de diversos sectores del país que dependen del recurso hídrico (Bedoya, Contreras y Ruiz, 2010), y generó también en un déficit de precipitación en la cuenca del río Dagua, tal como lo muestran los resultados.

### Eventos seleccionados

Para el SPI semestral de septiembre-2009, el 67 % del área presentó algún tipo de sequía, predominando la intensidad extrema, que afectó el 33 %, principalmente en la zona norte (figura 9a). En marzo de 2010 el 36 % de la cuenca presentó sequía extrema, el 28 % severa, el 11 % suave, el 21 % condiciones cercanas a lo normal y en el 4 % restante condiciones de humedad,



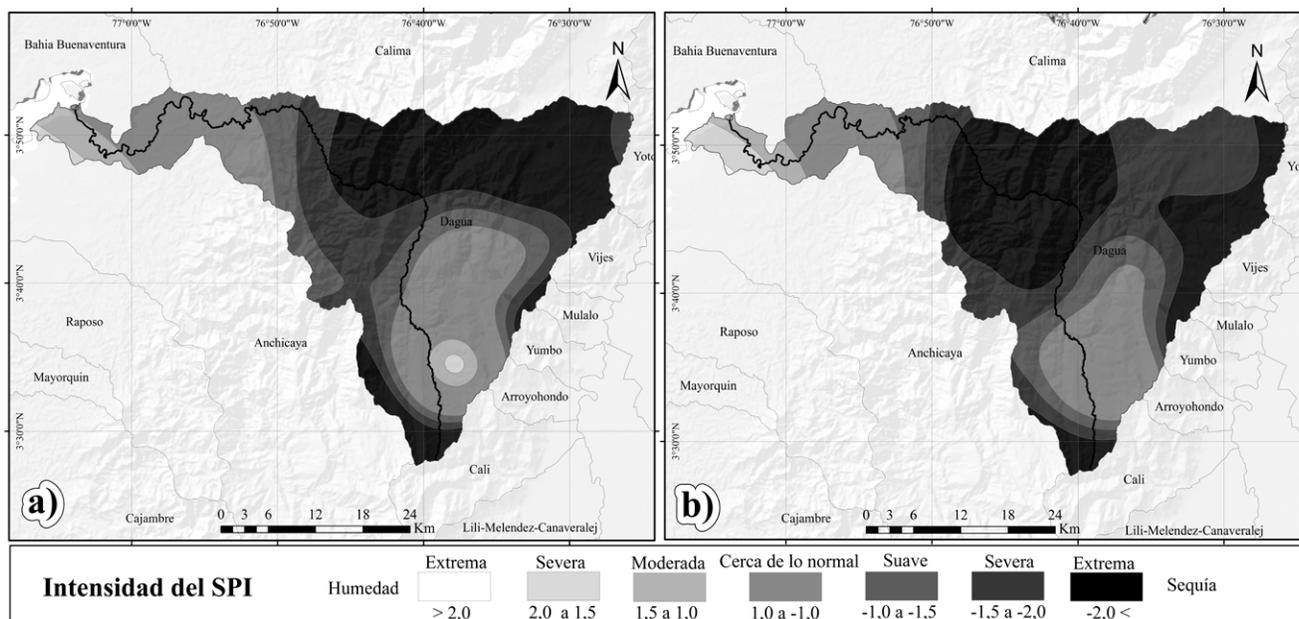
**Figura 8.** Porcentaje de localidad de sequía en el periodo evaluado: a) Semestral, b) Anual

**Fuente:** elaboración propia.

principalmente en la parte baja de la cuenca (figura 9b.).

Los resultados indican que en la cuenca se han presentado diferentes eventos de sequía, los cuales se concentran en la zona media y alta de esta, afectando principalmente zonas cercanas al enclave subxerofítico. Lo anterior evidencia la necesidad de realizar planes de contingencia y mitigación, con el fin de prevenir condiciones

de desertificación y aridez, que sumados a las pendientes, pueden incrementar el grado de erosión, y con ello la cantidad de sedimentos que se vierten al canal de Buenaventura, la intensidad y frecuencia de los derrumbes y deslizamientos; situación que impacta la economía del país, al afectar la principal vía que conecta a Colombia con el puerto marítimo del país.



**Figura 9.** a) Intensidad SPI semestral – septiembre-2009. b) Intensidad SPI anual – marzo-2010

**Fuente:** elaboración propia.

## CONCLUSIONES

La caracterización de los eventos de sequía meteorológica a partir del cálculo de su intensidad, duración, magnitud y frecuencia, es una aproximación a la descripción detallada de este fenómeno, el cual debe ser analizado de manera sistémica. El SPI permitió caracterizar las sequías a nivel semestral y anual, a partir de los datos de precipitación de 19 estaciones desde 1982 hasta 2011, mostrando que en todas las series se reportó al menos un evento de sequía; los periodos con la mayor cobertura espacial coincidieron con los años en los se presentó El Niño en el país, como 1992, 2009 y 2010.

Las sequías leves fueron las de mayor frecuencia, superando el 50 % de ocurrencia en más de la mitad de la cuenca. Los umbrales de precipitación calculados indicaron que los valores acumulados de lluvia mínima son menores en la parte media y alta de la cuenca y

aumentan hacia la parte baja. Se recomienda estudiar con mayor detalle el enclave subxerofítico ubicado en la cuenca del río Dagua, debido a que los resultados reflejaron una alta frecuencia de eventos de sequía extrema en esta zona, los ecosistemas secos son más sensibles a sufrir condiciones de desertificación en periodos de sequías prolongados.

La precipitación es la principal determinante de la severidad de una sequía, sin embargo, es importante considerar en futuros estudios, otras variables que pueden influir en la ocurrencia, intensidad y magnitud de este fenómeno, como temperatura, humedad relativa, brillo solar y la evapotranspiración, parámetros que cobran importancia en el escenario actual de cambio climático, y cuyo estudio está restringido por falta de estaciones para su monitoreo y seguimiento.

Los resultados son una aproximación para la detección y caracterización de las sequías, que a su vez contribuyen a tener elementos básicos

para la generación de estrategias de planificación y mitigación de sus impactos.

## FINANCIAMIENTO

Unesco-IHE por medio del proyecto titulado "CLIMADAPTATION Climate Variability and climate change signal detection in an Andean and Mediterranean basin to define adaptation strategies to manage water resources and establish an environmental flow regime", elaborado por el grupo IREHISA de la Universidad del Valle.

## AGRADECIMIENTOS

Al grupo IREHISA, a la Universidad del Valle, a Unesco-IHE. A la CVC, el Ideam y a todas las entidades que suministraron la información.

## REFERENCIAS

- Asadi, M.; Sivakumar, B. y Sharma, S. (2014). Droughts in a Warming Climate: A Global Assessment of Standardized. *Journal of Hydrology*, 526, 183-195.
- Bedoya, M.; Contreras, C. y Ruiz, F. (2010). Alteraciones del régimen hidrológico y de la oferta hídrica por variabilidad y cambio climático. En: IDEAM. *Estudio Nacional del Agua 2010*. Bogotá: IDEAM.
- Cardona, F.; Ávila, A.; Carvajal, Y. y Jiménez, E. (2013). Tendencias en las series de precipitación en dos cuencas torrenciales andinas del Valle del Cauca (Colombia). *Tecnológicas*, 17(32), 85-95.
- Castro, L. y Carvajal, Y. (2010). Análisis de tendencia y homogeneidad de series climatológicas. *Revista EIDENAR*, 9, 15-25.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) (2007). *Balance oferta-demanda de agua superficial, cuenca del río Dagua*. Recuperado de: [http://www.cvc.gov.co/images/CVC/Tematicas/Recurso\\_Hidrico/Aguas\\_Superficial/balances\\_ofertas\\_demanda/BalanceDagua.pdf](http://www.cvc.gov.co/images/CVC/Tematicas/Recurso_Hidrico/Aguas_Superficial/balances_ofertas_demanda/BalanceDagua.pdf)
- Daza, M.; Reyes, A., W.L. y Fajardo, P. (2012). Índice de sostenibilidad del recurso hídrico agrícola para la definición de estrategias sostenibles y competitivas en la Microcuenca Centella Dagua, Valle del Cauca. *Gestión y Ambiente*, 15(2), 47-58.
- Ding, Y.; Hetes, A. y Windhalm, M. (2011). Measuring Economic Impacts of Drought: A Review and Discussion. *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, 20(4), 434-447. DOI:10.1108/09653561111161752
- Ezzine, H.; Bouziane, A. y Ouazar, D. (2014). Seasonal Comparisons of Meteorological and Agricultural Drought Indices in Morocco Using Open Short Time-Series Data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 26, 36-48.
- González, M. y Domínguez, D. (2012). Statistical Prediction of Wet and Dry Periods in the Comahue Region (Argentina). *Atmospheric and Climate Sciences*, 2, 23-31.
- Gutiérrez, S.; Carvajal, Y. y Ávila, A. (junio de 2013). Estudio de la influencia del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur en la oferta hídrica de la cuenca hidrográfica del río Dagua. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 13, 26-33.
- Hernández, R. (2008). *Caracterización de la sequía meteorológica en los climas Árido, Semiárido y Subhúmedo seco en los Llanos Centro Orientales de Venezuela, para el manejo de los recursos hídricos*. Tesis de maestría. Caracas: Universidad Nacional Experimental.
- Instituto de Investigaciones Ambientales del Paífico Jhon Von Neuman (2012). *Valoración integral de los bosques secos del Dagua-Valle del Cauca*. Quibdó. Recuperado de: [http://siatpc.iiap.org.co/docs/avances/valoracion\\_integral\\_de\\_los\\_bosques\\_secos\\_del\\_dagua-valle\\_del\\_cauca.pdf](http://siatpc.iiap.org.co/docs/avances/valoracion_integral_de_los_bosques_secos_del_dagua-valle_del_cauca.pdf)
- Kaipper, M. (11 de diciembre de 2013). La sequía: enemigo silencioso de Latinoamérica. *El País.com*. Recuperado de: <http://internacional.elpais.com>

- elpais.com/internacional/2013/12/11/actualidad/1386777333\_583840.html
- Lloyd-Hughes, B. y Saunders, M. (junio de 2002). A Drought Climatology for Europe. *International Journal of Climatology*, 22(13), 1571-1592.
- Loaiza, W. (2014). *Fenómeno de El Niño-Oscilación Del Sur (ENOS) y su impacto sobre los sistemas productivos agrícolas de la cuenca del río Dagua, Valle Del Cauca*. Tesis de maestría. Cali: Universidad del Valle.
- McKee, T.; Doesken, N. y Kleist, J. (1993). The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. *Eighth Conference on Applied Climatology* (pp. 17-22). Anaheim: California.
- Mishra, A. y Singh, V. (septiembre de 2010). A Review of Drought Concepts. *Journal of Hydrology*, 391, 202-216.
- Morales, J. (2005). *El efecto de la longitud de registro en el cálculo del índice de precipitación estándar*. Tesis de maestría. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Núñez, S.; Núñez, L.; Podestá, G. y Skansi, M. (2005). *El índice estandarizado de precipitación como herramienta para la caracterización y el monitoreo de la sequía: una prueba de concepto*. XIX Congreso Argentino de Meteorología. Buenos Aires.
- Ortega. (2012). *Sequía en Nuevo León: vulnerabilidad, impactos y estrategias de mitigación*. México: Instituto del Agua de Estado de Nuevo León.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) (2008). *Hacia un Valle del Cauca incluyente y pacífico*. Cali.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) (2014). *Resumen Informe sobre desarrollo humano 2014. Sostener el progreso humano: reducir vulnerabilidades y construir resiliencia*. Washington. Recuperado de: <http://hdr.undp.org/sites/default/files/hdr14-summary-es.pdf>
- Silva, F.; Genz, F.; Aguiar, W.; Silva, N. y Kiperstok, A. (junio de 2013). Avaliação da ocorrência de secas na Bahia utilizando o Índice de Precipitação Padronizada (SPI). *Bahia Análise & Dados*, 23(2), 461-473.
- Wagner, A.; Ortiz, R. y Barragán, M. (2012). *Valuación de la sequía hidrológica en la cuenca Lerma Chapala*. XXII Congreso Nacional de Hidráulica. Acapulco.
- Zhai, J.; Su, B.; Krysanova, V.; Gao, C y Jiang, T. (2010). Spatial Variation and Trends in PDSI and SPI Indices and Their Relation to Streamflow in 10 Large Regions of China. *Journal of Climate*, 23, 649-663.
- Zucarelli, V. (2013). Identificación de eventos hídricos extremos en la cuenca del río Paraná. *Tecnología y Ciencias del Agua*, IV(5), 181-187.





## Evaluación de la resistencia a la compresión en morteros de pega de acuerdo con la dosificación establecida por el código Sismo Resistente Colombiano. Estudio de caso

### Evaluation of compressive strength in cement mortars, according to the dosage established by the colombian seismic resistance code. Case study

Sergio Giovanni Valbuena Porras<sup>1</sup>, Milton Mena Serna<sup>2</sup>,  
César Augusto García-Ubaque<sup>3</sup>

**Fecha de recepción:** 19 de agosto de 2015

**Fecha de aceptación:** 15 de febrero de 2016

**Cómo citar:** Valbuena Porras, S. G., Mena Serna, M., & García Ubaque, C. A. (2016). Evaluación de la resistencia a la compresión en morteros de pega de acuerdo con la dosificación establecida por el código Sismo Resistente Colombiano. *Revista Tecnura*, 20(48), 115-121. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.2.a08

#### Resumen

**Contexto:** En un muro de mampostería el mortero representa entre un 10 y un 20 % del volumen total del sistema, no obstante su efecto en el comportamiento del mismo es significativamente mayor de lo que indica este porcentaje.

**Objetivo:** El propósito de esta investigación fue evaluar la resistencia a la compresión de dos tipos de mortero de pega (A y B), preparados con muestras de arenas trituradas y naturales provenientes de la localidad de Usme en la ciudad de Bogotá.

**Método:** Se prepararon dos tipos de mortero de pega, de acuerdo a las proporciones de cemento y arena establecidas en la sección D.3.4-1 de la NSR-10 (Tabla 1); estas proporciones fueron calculadas utilizando un recipiente de 0,0028 m<sup>3</sup> para medidas de peso unitario. Para el mortero tipo A

se empleó arena de peña y para el mortero tipo B arena de río.

**Resultados:** La resistencia a la compresión alcanzada por el mortero tipo A al final del estudio fue en promedio de un 84% de la esperada, mientras que para los morteros tipo B esta fue en promedio un 64% por encima de la espera.

**Conclusión:** Las mezclas de mortero elaboradas con arena triturada o de peña (tipo A), no alcanzan la resistencia a la compresión exigida por las normas, a pesar de cumplir con la dosificación establecida en la NSR 10 y con los criterios de calidad de las NTC; mientras que la arena de origen natural o de natural de río si cumplen con dichas normas.

**Palabras clave:** Mortero de pega, arena de peña, arena de río, resistencia a la compresión, dosificación.

- 1 Ingeniero Civil, Ms.C. en Economía. Docente de la Facultad Tecnológica Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: [svalbuena@udistrital.edu.co](mailto:svalbuena@udistrital.edu.co)
- 2 Ingeniero Civil, Ms.C. en Construcción. Docente de la Facultad Tecnológica Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: [mmenas@udistrital.edu.co](mailto:mmenas@udistrital.edu.co)
- 3 Ingeniero Civil, Ms.C., Ph.D. en Ingeniería. Profesor Asociado Facultad Tecnológica Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: [cagarcia@udistrital.edu.co](mailto:cagarcia@udistrital.edu.co)

## Abstract

**Context:** In a masonry wall the mortar it is between 10 and 20% of the total volume of the system, despite its effect on the behavior of it is significantly higher than this percentage indicates.

**Objective:** The purpose of this research was to evaluate the resistance to compression of two types of mortar paste (A and B), prepared with natural sand from the town of Usme in Bogotá, in accordance with the proportions set by the Standard Colombian earthquake Resistant regulation (NSR-10).

**Method:** Two types of mortar paste were prepared, according to the proportions of cement and sand established in NSR-10 section D.3.4-1 of (Table 1); these proportions were calculated using a 0.0028 m<sup>3</sup>

container for measuring unit weight. For type A mortar rock sand was used and river sand for type B mortar.

**Results:** The resistance to compression for mortars type A at the end of the study was on average 84% of the expected resistance, whereas for type B mortars it averaged 64% above the expected resistance.

**Conclusion:** Mortar mixes made with crushed or rock (type A) arena do not reach the compressive strength required demanded by regulatory standards, despite complying with the dosage established in NSR 10 and with NTC quality criteria; while the natural sand origin or natural river sand meet these standards.

**Keywords:** Mortar paste, rock sand, river sand, compressive strength, dosing.

## INTRODUCCIÓN

Se denomina *mortero* a aquella pasta formada por la combinación de materiales cementantes, agregados y aditivos, que mezclados con una cantidad conveniente de agua dan lugar a una masa plástica. Es uno de los elementos de uso más común en construcción debido a su gran versatilidad; es posible encontrar una gran variedad de morteros que se diferencian según su composición y a la función para la cual son preparados. Estos pueden ser empleados como material de revestimiento (mortero para revoque o repello), como relleno (mortero de relleno o *grouting*) o para unir unidades de mampostería (mortero de pega). En la actualidad, el mortero más común es aquel que se prepara con cemento, arena y agua. Se caracteriza por ofrecer una mayor resistencia debido a su proceso de secado rápido y a su dureza.

En Colombia, al igual que en muchos países, la mampostería es el sistema constructivo más usado; esta técnica permite la construcción de muros (reforzados o no), mediante la unión de mampuestos (ladrillos o bloques de concreto)

por medio de un mortero. El estudio del comportamiento del mortero como componente importante de la mampostería es de vital importancia para garantizar la durabilidad y estabilidad de las edificaciones construidas mediante esta práctica, pues garantiza su resistencia frente a las fuerzas a las que se puedan exponerse.

Si bien, el mortero representa entre el 10 % y 20 % del volumen total de un muro de mampostería, su efecto en el comportamiento del muro es mucho mayor de lo que podría indicar tal porcentaje (Navas, 1999; Salamanca, 2001). Su función se encuentra subordinada a condiciones especiales del sistema constructivo; el mortero tiene que absorber esfuerzos de tensión y compresión, siendo necesario que conserve ciertas propiedades que se evalúan en dos etapas diferentes de acuerdo con su estado físico (fresco o endurecido) (Gutiérrez de López, 2003).

Las propiedades en estado endurecido se relacionan con la puesta en obra del mortero e influyen en el rendimiento y la calidad de la ejecución. Un buen mortero de pega debe adherirse a una superficie, extenderse con facilidad y no perder mucha agua ni entumecerse al

entrar en contacto con los mampuestos o con otras bases que puedan resultar absorbentes (Salazar, 2000). En el grueso de la literatura y en el lenguaje de la construcción estas características son conocidas como *plasticidad*, *consistencia* y *capacidad de retención de agua* y ayudan al mortero a lograr una buena unión entre los elementos del sistema, disminuyendo adicionalmente el riesgo de penetración de fluidos, principalmente de la lluvia.

Las propiedades en estado endurecido dependen de las prescripciones estipuladas en el proyecto constructivo y deben cumplir con las exigencias normativas y reglamentarias vigentes. El mortero de pega debe soportar cargas no muy elevadas mientras se encuentra en estado fresco y una vez endurecido debe resistir el peso de los mampuestos superiores en el caso de un muro de cerramiento o, incluso, soportar cargas elevadas cuando se trata de un muro portante; por lo tanto debe ser resistente a la compresión, propiedad a la que se recurre como criterio para la selección del tipo de mortero a emplear y como parámetro de control de calidad del sistema (Drysdale, Hamid y Baker, 1994). La resistencia a la compresión es relativamente fácil de medir y se relaciona con propiedades como la resistencia a la tensión y la absorción. A su vez, influye de manera directa en la resistencia a la compresión del sistema completo de mampostería, debido a que el mortero es el encargado de mantener unidos monolíticamente los mampuestos. La resistencia del mortero depende significativamente del contenido de cemento y de la relación agua/cemento (Maruyama, Kanematsu, Noguchi y Tomosawa, 2004). No obstante, según Farny, Melander y Panarese (2008) no es recomendable utilizar una resistencia superior a la demanda, debido a que esto disminuye la maniobrabilidad de la mezcla y no es garante de que la resistencia del sistema aumente proporcionalmente.

Debido a su uso recurrente en el contexto colombiano, existen numerosas investigaciones

que se han encargado de estudiar la mampostería y sus componentes como sistema (García, Guerrero y Monroy, 2012; Martínez y Santana, 2005; Páez, Parra y Gutiérrez, 2009; Santana y Gómez, 2007; Torres, 2009). No obstante, los estudios sobre los morteros de pega son escasos (Salazar, 2000; Sánchez, 1998). Como consecuencia, es un error común asumir que los conocimientos obtenidos de los concretos son traducibles simultáneamente al estudio de los morteros. Esta es una aseveración errónea debido a que difieren de manera importante en características como la consistencia en obra, el método de colocación y el ambiente de curado.

El mortero de pega es utilizado para unir unidades de mampostería que forman un elemento estructural individual, en contraposición al concreto que es generalmente por sí mismo un elemento estructural. Adicionalmente, en la práctica la manera en que son manipulados en obra es considerablemente disímil: el concreto se funde habitualmente en encofrados caracterizados por ser no absorbentes, metálicos o de madera, permitiendo así la retención de la mayor cantidad de agua. El mortero, por su parte, se prepara casi siempre en obra y se coloca entre unidades absorbentes, las cuales al entrar en contacto con este atraen un porcentaje de su humedad.

En Colombia, el título E de la Norma Sismo Resistente Colombiana NSR-10 establece los requisitos generales para morteros de pega utilizados en construcciones de 1 y 2 pisos, señalando que deben tener una resistencia mínima a la compresión a los 28 días de 7.5 Mpa (75 kgf/cm<sup>2</sup>), cuya dosificación entre material cementante (cemento y cal) respecto a la arena cernida por malla No. 8, no puede ser inferior a 1:4 en volumen. No obstante, la norma no es explícita acerca del tipo de agregado fino que debe emplearse, por lo que se hace necesario remitirse a la Norma Técnica Colombiana NTC 3329 en la cual se reitera el criterio de dosificación y

se indica que las arenas usadas en morteros de mampostería deben ser evaluadas en conformidad con lo establecido en la NTC 2240, la cual define que el agregado fino a utilizar debe ser una arena natural (fluvial) o triturada.

En el caso particular de la ciudad de Bogotá, la arena de peña (triturada) es el agregado fino dominante en el mercado y el más utilizado para el desarrollo de morteros para construcciones de toda índole. La localidad de Usme alberga algunas de las más importantes minas de extracción (canteras) de este material. No obstante, no existen estudios que permitan determinar si los morteros fabricados con dicha arena alcanzan una resistencia a la compresión que garantice la durabilidad y estabilidad esperadas en conformidad con los requerimientos establecidos en la NSR 10. De este modo, el empleo de una arena inadecuada podría incrementar la vulnerabilidad de las construcciones tanto al paso del tiempo como a la ocurrencia de fenómenos sísmicos. El objetivo de este estudio fue determinar si los morteros preparados con arena de peña, en las cantidades exigidas por la norma, alcanzan la resistencia a la establecida. Adicionalmente las muestras de arena fueron ensayadas según los parámetros de las NTC, para verificar que estas cumplan con todos los requisitos de calidad exigidos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

Las arenas empleadas en el estudio fueron obtenidas en seis diferentes expendios de materiales de construcción de la localidad de Usme, en Bogotá. Las pruebas y ensayos fueron conducidos en el Laboratorio para Concretos y Materiales de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Cada material fue ensayado de acuerdo con los parámetros establecidos en las Normas Técnicas

Colombianas (NTC) del Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Icontec), como criterio de aceptación o rechazo.

### Caracterización de los materiales

#### *Cemento*

En Colombia, la NTC 30 distingue seis tipos de cemento clasificados según su composición química, porcentaje de ceniza volante y puzolanas naturales o escorias de alto horno; factores estrechamente ligados a su comportamiento físico-mecánico. En este estudio se utilizó cemento Portland tipo I (Cemento Argos de uso general®, Argos, Colombia); este material fue ensayado según las NTC 121 y NTC 321.

#### *Agregado fino*

Se emplearon dos tipos de arenas naturales: la primera obtenida a partir del lavado de peña (arena de peña) y la segunda de origen fluvial (arena de río). Para cada tipo de arena se obtuvieron tres muestras provenientes de diferentes expendios de la zona, arena de peña (expendios 1, 2 y 3) y arena de río (expendios 4, 5 y 6). Las seis muestras fueron cernidas utilizando un tamiz N.º 4, con el fin de evitar la presencia de partículas con un tamaño superior a 4,75 mm. De conformidad con lo establecido en la NTC 2240, las muestras fueron ensayadas para determinar su granulometría y módulo de finura (NTC 77), y sudensidad y absorción (NTC 237).

### Preparación de los morteros de pega

Se prepararon dos tipos de mortero de pega, de acuerdo con las proporciones de cemento y arena establecidas en la sección D.3.4-1 de la NSR-10 (tabla 1); estas proporciones fueron calculadas utilizando un recipiente de 0,0028 m<sup>3</sup> para medidas de peso unitario. Para el mortero tipo A se empleó arena de peña y para el mortero

tipo B arena de río, para cada tipo de mortero se prepararon tres mezclas diferentes; cada una de ellas utilizando una de las seis muestras de arena previamente descritas; posteriormente se prepararon nueve probetas de cada mezcla para un total de 54 probetas.

### **Fabricación de las probetas de mortero**

Se elaboraron 54 moldes cilíndricos mediante el uso de tubos en PVC con un diámetro interno de 75 mm y una longitud 150 mm, según lo establecido en la NTC 3546. Cada molde fue sellado con un tapón de tubería PVC en uno de sus extremos; para mantener fijos los tapones durante el proceso de fraguado se emplearon correas plásticas. Los moldes fueron identificados con rotulador de acuerdo con el tipo de mortero (A o B) y a la procedencia de la arena empleada (números del 1 al 6).

Cada mezcla de mortero fue vertida en el molde correspondiente hasta llenarlo por completo. Posteriormente, con un mazo de caucho se golpeó cada molde para garantizar la liberación de posibles burbujas de aire, 24 horas después las probetas fueron desencofradas y dejadas a la intemperie a una temperatura ambiental entre 14 °C y 22 °C.

### **Fallado de las probetas**

El proceso de fallado fue realizado a los 7, 14 y 28 días, utilizando una prensa manual análoga para ensayos de compresión (E 654, Pinzuar LTDA, Colombia). Para cada fecha de fallado se eligieron tres probetas al azar de cada una de las muestras de arena empleadas, nueve para cada tipo de mortero. El cálculo de la resistencia a la compresión se obtuvo dividiendo la carga

máxima soportada por la probeta sobre el área de la sección transversal de la misma (4417,86 mm<sup>2</sup>). El resultado de las tres probetas de cada muestra de arena fue promediado según lo establecido en la NTC 3546.

### **Análisis de datos**

Para el procesamiento de los datos obtenidos se utilizaron herramientas de estadística descriptiva, particularmente medidas de promedio y desviación estándar para cada uno de los grupos de análisis definidos en el estudio.

## **RESULTADOS**

La resistencia promedio a la compresión para cada una de las mezclas se muestra en la tabla 1. A los siete días los morteros tanto tipo A como B no cumplieron con el 65 % de la resistencia esperada a los 28 días como lo establece la NTC 3546; la resistencia que alcanzaron los morteros A17, A27 y A37 fue en promedio de 23,47 % con una desviación estándar de 3,8 %, mientras que para los morteros B17, B27 y B37 fue en promedio de 46,98 % con una desviación estándar de 2,59 %. A los 14 días la resistencia que alcanzaron los morteros A17, A27 y A37 fue en promedio de 29,87 % con una desviación estándar de 1,47 %; mientras que para los morteros B17, B27 y B37 fue en promedio de 57,82 % con una desviación estándar de 12,66 %. Por último, a los 28 días la resistencia alcanzada por los morteros A17, A27 y A37 fue en promedio de 84,13 % con una desviación estándar de 2,27 %; mientras que para los morteros B17, B27 y B37 fue en promedio de 164,44 % con una desviación estándar de 14,24 %.

**Tabla 1.** Resistencia a la compresión promedio alcanzada por las seis muestras a lo largo del estudio

Mortero de pega	Resistencia a la compresión promedio		
	7 días	14 días	28 días
A1	1,49	3,32	13,47
A2	2,06	5,2	11,35
A3	1,77	4,49	12,18
B4	3,3	2,35	6,14
B5	3,62	2,13	6,48
B6	3,65	2,24	6,31

**Fuente:** elaboración propia.

Las mezclas de mortero tipo B obtuvieron resistencias significativamente superiores, no solo en relación a las obtenidas en las mezclas de mortero tipo A (que solo llegaron al 84 %), sino que fueron en promedio un 64 % más resistentes de lo esperado. Por otro lado, la desviación estándar para las mezclas A1, A2 y A3 a lo largo del estudio se encuentra en un rango de 1,47 % a 3,80 %, mientras que para las mezclas B1, B2 y B3 se encuentra en un rango de 2,59 % a 14,24 %. El comportamiento de la desviación estándar permite observar que si bien en todas las mezclas de mortero los datos obtenidos presentan cierta dispersión en relación al promedio, para el caso de los morteros tipo B hay fluctuaciones considerables, es decir que los valores de la resistencia obtenidos en cada muestra durante los eventos de falla varían considerablemente en relación a la media.

Las mezclas de mortero elaboradas con arena de peña (tipo A), a pesar de cumplir con la dosificación establecida en la NSR 10 y con los criterios de calidad de las NTC, no alcanzan la resistencia a la compresión exigida por estos códigos. En función de lo anterior, resulta pertinente que la normativa haga la salvedad de que la proporción de 1:4 en volumen permite alcanzar la resistencia exigida siempre y cuando se utilice

arena de río y que para morteros que empleen arenas de peña esta dosificación debe redefinirse. Esta aclaración resulta de vital importancia debido a que en ciudades como Bogotá la oferta de arena de peña es significativamente superior a la de río, siendo el agregado fino predominante en la construcción de todo tipo de edificaciones. Adicionalmente, el uso recurrente de este agregado a nivel práctico está ligado a que por su módulo de finura ofrece mejores acabados; no obstante, como se pudo evidenciar, esta práctica en las proporciones establecidas por la normativa supone una importante disminución en la resistencia a la compresión del mortero.

Por otro lado, aunque la variabilidad para los morteros con arena de río fue mayor, gracias a su mayor resistencia, no representa un peligro para el comportamiento de las construcciones; sin embargo, los morteros con arena de peña además de estar por debajo de la resistencia esperada tiene una desviación estándar de 3,80 % lo cual solo aumenta el nivel de riesgo en el que se encuentran las estructuras construidas con el material A. No obstante, debido a las fluctuaciones en los datos, resulta pertinente realizar un estudio a futuro con más especímenes que permita de manera más rigurosa verificar el comportamiento de las probetas.

En este estudio se empleó cemento de uso general debido a que es el más recurrente en la construcción de edificaciones; las probetas obtenidas no fueron curadas debido a que se pretendía simular las condiciones de obra, aspecto importante debido a que el no curado de las muestras puede afectar la resistencia a la compresión, la adherencia y la plasticidad del mortero.

## REFERENCIAS

- Drysdale, R.G.; Hamid, A.A. y Baker, R.L. (1994). *Masonry Structures: Behavior and Design*. Nueva Jersey: Prentice Hall.
- Farny, J.; Melander, J. y Panarese, W. (2008). *Concrete Masonry—Hand Book*. Australia: Concrete Masonry Association of Australia.
- García, N.; Guerrero, G. y Monroy, R. (2012). Propiedades físicas y mecánicas de ladrillos macizos cerámicos para mampostería. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 22(1), 43–58.
- Gutiérrez de López, L. (2003). Morteros. En: L. Gutiérrez de López. *El concreto y otros materiales para construcción* (pp. 115-130). Manizales: Universidad Nacional de Colombia Recuperado de: <http://www.bdigital.unal.edu.co/6167/#sthash.GDtC2DMB.dpuf>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Icontec) (1982). Ingeniería civil y arquitectura. Cemento Pórtland. Especificaciones químicas. NTC 321. Bogotá: Icontec.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Icontec) (1995). *Ingeniería civil y arquitectura. Método para determinar la densidad y la absorción del agregado fino*. NTC 237. Bogotá: Icontec.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Icontec) (1996). *Cemento Pórtland. Clasificación y nomenclatura*. NTC 30. Bogotá: Icontec.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Icontec) (2003). *Concretos. Métodos de ensayo para determinar la evaluación en laboratorio y en obra, de morteros para unidades de mampostería simple y reforzada*. NTC 3546. Bogotá: Icontec.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Icontec) (2004). *Concretos. Especificaciones de mortero para unidades de mampostería*. NTC 3329. Bogotá: Icontec.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Icontec) (2007). *Concretos. Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos*. NTC 77. Bogotá: Icontec.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Icontec) (2013). *Concretos. Agregados usados en morteros de mampostería*. NTC 2240. Bogotá: Icontec.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Icontec) (2014). *Especificación de desempeño para cemento hidráulico. Concretos. Especificaciones de mortero para unidades de mampostería*. NTC 121. Bogotá: Icontec.
- Martínez, U. y Santana, I. (2005). *Determinación experimental de la deformación unitaria en el momento de falla de la mampostería estructural: mampostería en arcilla*. archivo de computador. Bogotá. Recuperado de: <http://ezproxy.unal.edu.co/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat02704a&AN=unc.000320272&lang=es&site=eds-live>
- Maruyama, I.; Kanematsu, M.; Noguchi, T. y Tomosawa, F. (2004). *Optimization of Mix Proportion of Concrete under Various Severe Conditions by Applying the Genetic Algorithm*. The 3rd (CON-SEC'01). Vancouver.
- Navas, A. (1999). *Propiedades mecánicas de la mampostería de concreto*. Proyecto de tesis de Maestría en Ingeniería Civil. San José de Costa Rica:

- Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica.
- Páez, D.F.; Parra, S.X. y Gutiérrez, C.A. (2009). Alternativa estructural de refuerzo horizontal en muros de mampostería. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(14), 51–69. Recuperado de: <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=75012454005>
- Salamanca, R. (2001). La tecnología de los morteros. *Colombia Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 11, 41-48. Recuperado de: <http://www.umng.edu.co/documents/63968/74795/11art6.pdf>
- Salazar, A. (2000). Pastas y morteros. En: A. Salazar. *Morteros de pega para muros de mampostería* (pp. 5-13). Cali: Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle.
- Sánchez, D. (1998). *Concretos y morteros*. 2a. ed. Bogotá: Asociación Colombiana de Productores de Concreto (Asocreto).
- Santana, I. y Gómez, J. (2007). *Determinación de la resistencia a la compresión en muros existentes, mediante el corte y ensayo de prismas*. Tesis de maestría. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Torres, J. (2009). *Comportamiento de muros de mampostería con elementos de borde confinados con platinas en el mortero de pega*. Trabajo de Especialización en Estructuras. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.





## Implementación de un controlador de posición y movimiento de un robot móvil diferencial

### Implementation of a position and movement controller for a differential mobile robot

Germán Hernández Millán<sup>1</sup>, Luís Hernando Ríos Gonzales<sup>2</sup>, Maximiliano Bueno López<sup>3</sup>

**Fecha de recepción:** 10 de junio de 2014

**Fecha de aceptación:** 15 de febrero de 2016

**Cómo citar:** Hernández Millán, G., Ríos Gonzales, L. H., & Bueno López, M. (2016). Implementación de un controlador de posición y movimiento de un robot móvil diferencial. *Revista Tecnura*, 20(48), 123-136. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.2.a09

#### Resumen

**Contexto:** La robótica móvil continúa siendo un área de constante actualización, donde se busca tener aplicaciones que permitan mejorar la calidad de vida de los seres humanos. Con base en lo anterior, en este artículo se presenta un novedoso diseño de un controlador de posición y movimiento para un robot móvil diferencial, utilizando redes neuronales artificiales y cuyo fin es llevarlo a aplicaciones reales en diferentes campos de acción.

**Método:** La propuesta presentada está basada en un controlador PID, el cual ha sido sintonizado con una red neuronal y requiere conocer el modelo cinemático del robot.

**Resultados:** Las simulaciones muestran la eficiencia del control de posición para el seguimiento de caminos explícitos, en este caso para el seguimiento de trayectorias rectilíneas y curvilíneas. La interfaz gráfica presentada permite ajustar las ganancias con facilidad y verificar el seguimiento de la trayectoria en línea.

**Conclusiones:** De los resultados obtenidos se puede concluir que la estrategia propuesta es de fácil implementación ya que se requiere información que de manera general entregan los sensores de un robot móvil. Finalmente la sintonización realizada del controlador PID con la red neuronal permite obtener un correcto desempeño para seguimiento de trayectorias.

**Palabras clave:** Control Automático, Modelo Dinámico, Robot Móvil Diferencial.

#### Abstract

**Context:** Mobile robotics remains being an area of constant updating, which seeks to have applications to improve the life quality of human beings. Therefore, the paper presented a novel design of a position and move controller to a differential mobile robot using artificial neural networks, which aims is to bring a real applications in different fields.

**Method:** The proposal is based on a PID controller, which has been tuned using a neural network and requires knowledge of the kinematic model of the robot.

1 Ingeniero Electricista, Magister en Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia. Contacto: [germanhernandez08@gmail.com](mailto:germanhernandez08@gmail.com)

2 Ingeniero Electrónico, Especialista en Computadores y Sistemas Digitales, Master of Science in engineering, Diploma de Estudios Avanzados (DEA), Magister en Ingeniería Eléctrica. Docente de la Universidad Tecnológica de Pereira- UTP. Pereira, Colombia. Contacto: [lhgonza@utp.edu.co](mailto:lhgonza@utp.edu.co)

3 Ingeniero Electricista, Magister en Ingeniería Eléctrica, Doctor en Ingeniería, Director Programa de Ingeniería en Automatización Universidad de La Salle. Bogotá D.C., Colombia. [mbueno@lasalle.edu.co](mailto:mbueno@lasalle.edu.co)

**Results:** The simulations show the efficiency of the control position for following paths, in this case for tracking straight and curved paths. The graphical interface allows adjusting the gains easily and verifies the trajectory tracking online.

**Conclusions:** From the results we can conclude that the proposed strategy is easy to implement since the

required information is generally delivered by mobile robot sensors. Finally, tuning PID controller with the neural network allows obtaining a correct performance for trajectory tracking.

**Keywords:** Automatic Control, Differential mobile robot, Dynamic model.

## INTRODUCCIÓN

Los robots móviles son dispositivos electromecánicos capaces de desplazarse en un espacio de trabajo con cierto grado de autonomía. De acuerdo con su forma de locomoción se clasifican en: robots móviles de locomoción mediante orugas, mediante patas y mediante ruedas.

Los robots móviles propulsados por ruedas, a su vez, se clasifican según el número y el tipo de grados de libertad (Blazic, 2014).

Cuando se trata de generar trayectorias o caminos en sistemas no holónomos, hay características relevantes directamente relacionadas con el tipo de trayectorias que pueden seguir estos sistemas; en efecto, una configuración inicial y una final no pueden unirse mediante cualquier trayectoria. Las restricciones cinemáticas del sistema imponen unas condiciones que solo algunos caminos cumplirán, entendiendo por *camino* la discretización de una función continua que interpola las configuraciones definidas en una ruta. Por último, cuando se habla de trayectoria, se hace referencia a un camino que tiene asociado un perfil cinemático; es decir, a cada configuración perteneciente al camino se le asocia una velocidad (Campion, Bastin y d'Andréa Novel, 1993).

Para poder llevar el robot móvil hasta una posición deseada siguiendo una trayectoria se han propuesto diferentes estrategias de control (Kwon, y Dongkyoung, 2012; Jingkui, Wenxin y Liangliang, 2010; Rezaee y Abdollahi, 2014; Yandong, Zongyi y Ling, 2010), algunas no requieren la utilización del modelo matemático, por el contrario otras

requieren obtener el modelo cinemático y dinámico. En este artículo se obtuvo un modelo cinemático del robot asumiendo que el punto de referencia se encuentra en medio de las dos ruedas de tracción de la plataforma, optando así por un método basado en el centro de masa con restricciones no holonómicas. Este control utiliza un modelo geométrico, el cual emplea el cálculo del radio de curvatura para realizar el seguimiento de una trayectoria deseada. Con las primeras simulaciones se pudo comprobar que este método funciona muy bien tanto para seguimiento de trayectorias rectilíneas como curvilíneas.

## CONTROL DE POSICIÓN DEL ROBOT MÓVIL DIFERENCIAL

El objetivo de este control es que el robot diferencial ejecute de forma autónoma movimientos previamente planificados (Saidonr, Desa y Rudzuan, 2011). Se pretende que el robot móvil siga un camino específico de forma autónoma. Este problema puede formularse como la obtención de las leyes de control que permitan estabilizar al robot sobre un punto de trabajo. En un problema de seguimiento de caminos explícitos se pretende que el error entre la posición deseada y la posición actual  $q_d(t) - q(t)$  tienda a cero (0), manteniéndose acotadas las señales de control (Toda y Kubota, 2013).

El camino explícito que se pretende seguir puede especificarse de varias formas, de las cuales cabe mencionar las siguientes (Vachhani, Mahindrakar y Sridharan, 2011):

- Especificación previa en coordenadas absolutas a partir de planos o mapas.
- Especificación iterativa desde un terminal empleando técnicas de teleoperación.

En una arquitectura de control inteligente se emplean por lo general métodos de planificación de caminos mediante la utilización de sistemas de percepción, tal como ocurre en el seguimiento de líneas obtenidas mediante un sistema de visión (Velrajakumar, Manohar y Raju, 2010).

Para el control de posición de robots móviles se distinguen varias técnicas, entre las que se pueden mencionar:

- Técnica basada en teorías de control, la cual utiliza los modelos matemáticos del robot para encontrar un controlador que lo estabilice y a la vez consiga la tarea deseada.
- Técnica basada en métodos geométricos para seguir trayectorias o planificar caminos matemáticamente.
- Técnica basada en sistemas inteligentes, como redes neuronales, algoritmos genéticos o lógica difusa, para el control de movimiento y la coordinación de comportamientos.

## CONTROL DE MOVIMIENTO DEL ROBOT MÓVIL DIFERENCIAL

Para diseñar el controlador se hace uso del conocimiento del modelo dinámico del robot y de las herramientas de análisis y diseño aportadas por la teoría del control (Jung-Hoon, Arkin y Dong-Soo, 2003).

Dada una estructura particular (robot móvil diferencial), será necesario determinar los movimientos requeridos por cada rueda del robot (dichas ruedas son controladas por los motores), para que pueda ser llevado a una posición y orientación requeridas en el espacio de trabajo. Este tipo de control tiene como objetivo procurar que las trayectorias seguidas por el robot  $q(t)$  sean lo más parecidas a las que el control de movimiento propone como trayectoria deseada  $q_d(t)$  (Yang *et al.*, 2010).

La cinemática del robot diferencial estudia el movimiento del mismo con respecto a un sistema de referencia (Spyros, 2014; Cook, 2011). La cinemática se interesa por la descripción analítica del movimiento espacial del robot como una función del tiempo, y en particular por las relaciones entre la posición y la orientación final del robot con los valores que toman sus coordenadas.

En el tipo de tracción diferencial, el robot se mueve por la acción de dos ruedas motrices independientes; para plantear el modelo cinemático de este tipo de robots se utilizan las siguientes hipótesis que ayudan a simplificar el modelo:

- El robot se mueve en una superficie plana.
- El eje guía es perpendicular al plano.
- Las ruedas se mueven sin restricciones.
- El robot no tiene partes flexibles.
- Durante los pequeños intervalos de tiempo en que la dirección se mantiene constante, el vehículo se moverá de un punto a otro siguiendo un arco de circunferencia.
- El robot es considerado como un cuerpo rígido y cualquier parte móvil de las ruedas de dirección, se desplazará siguiendo un comando del control de posición.

Todas estas suposiciones se cumplen razonablemente bien en la mayoría de los robots móviles actuales. El deslizamiento es de hecho el mayor problema con que se encuentra cualquier robot móvil a la hora de establecer una autolocalización precisa.

### Modelo jacobiano

Asumiendo que  $p$  representa un lugar en el espacio con  $n$  coordenadas generalizadas y  $q$  un vector de  $m$  variables de actuadores (para  $n > m$ ), y asumiendo que  $\dot{p}$  y  $\dot{q}$  son las respectivas derivadas de tales vectores, entonces el modelo directo es obtenido por la matriz jacobiana,  $J(p)$  dado por la ecuación (1).

$$\dot{p} = J(p)\dot{q} \quad (1)$$

Esta expresión del jacobiano puede escribirse en la forma mostrada en la ecuación 2:

$$\dot{p} = f(p) + \sum_{i=1}^m g(p)_i \dot{q}_i, \quad (2)$$

$$\dot{p} = \begin{bmatrix} -\sin\phi \\ \cos\phi \\ 0 \end{bmatrix} v + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \omega. \quad (3)$$

La ecuación 2 se presenta en forma matricial por la ecuación 3, donde  $v$  es la velocidad lineal del vehículo y  $\omega$  es la velocidad angular, estas ecuaciones pueden ser también escritas en la forma de (1) como

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\phi & 0 \\ \cos\phi & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Para  $\dot{q} = [v \ \omega]^T$

De la ecuación 4 se puede obtener la ecuación 5:

$$\dot{x} \cos\phi + \dot{y} \sin\phi = 0, \quad (5)$$

Esto es debido a que el vehículo solamente puede moverse a lo largo de su eje longitudinal.  $\phi$  viene dado por la ecuación 6:

$$\text{tg } \phi = -\frac{\dot{x}}{\dot{y}} \quad (6)$$

Las anteriores expresiones permiten asegurar que la posición del vehículo  $(x, y)$  y la orientación  $\phi$  no son independientes.

### Cinemática directa e inversa

Existen dos problemas fundamentales para resolver la cinemática del robot. El primero de ellos se conoce como el *problema cinemático directo*, y consiste en determinar cuál es la posición y orientación final del robot con respecto a un sistema de coordenadas que se toma como referencia. Los valores de las velocidades angulares de las ruedas del robot son conocidos. El segundo, denominado *problema cinemático inverso*, resuelve el proceso de la determinación de los parámetros de control

para llevar al robot a un lugar deseado, proporcionando las velocidades angulares que deben tomar las ruedas del robot para una posición y orientación conocidas.

La cinemática inversa del sistema implica la inversa del jacobiano. Cuando este último no es una matriz cuadrada, es necesario calcular su pseudoinversa, multiplicando ambos lados por  $J^T$ , y resolviendo para  $\dot{q}$ , con lo cual se obtiene la ecuación 7:

$$\dot{q} = [J(p)^T J(p)]^{-1} J(p)^T \dot{p}. \quad (7)$$

Entonces, para el modelo se obtiene la expresión dada por la ecuación 8:

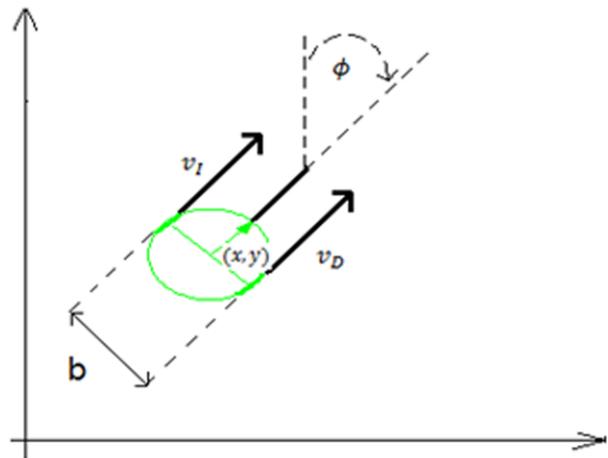
$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Donde  $v$  está dada por la ecuación 9:

$$v = \dot{x} \sin\phi + \dot{y} \cos\phi \quad (9)$$

### Configuración del robot móvil diferencial

La figura 1 muestra el clásico vehículo de tracción diferencial, el cual usa en ambas ruedas,



**Figura 1.** Configuración típica de un robot móvil diferencial

**Fuente:** elaboración propia.

velocidades independientes ( $V_I$  y  $V_D$ , respectivamente), que se mueven en el plano 2D hacia un punto específico  $(x, y)$  y una orientación  $\phi$  específica.

Asumiendo para el modelo de tracción diferencial, que  $\omega_I$  y  $\omega_D$  son las velocidades correspondientes de las ruedas izquierda y derecha, dado el radio de las ruedas como  $r$ , las correspondientes velocidades lineal y angular están dadas por las ecuaciones 10 y 11 respectivamente

$$v = \frac{v_D + v_I}{2} = \frac{\omega_D + \omega_I}{2} r, \quad (10)$$

$$\omega = \frac{v_D - v_I}{b} = \frac{\omega_D - \omega_I}{b} r. \quad (11)$$

Donde  $b$  es la separación entre las dos ruedas del vehículo. También si las velocidades lineal y angular son dadas, entonces la velocidad angular puede ser obtenida por las ecuaciones 12 y 13:

$$\omega_I = \frac{v - (b/2)\omega}{r} \quad (12)$$

$$\omega_D = \frac{v + (b/2)\omega}{r} \quad (13)$$

Sustituyendo las ecuaciones 10 y 11 en el modelo de robot móvil (3) se obtienen las ecuaciones 14 y 15:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(r \sin \phi)/2 \\ (r \cos \phi)/2 \\ -r/b \end{bmatrix} \omega_I + \begin{bmatrix} -(r \sin \phi)/2 \\ (r \cos \phi)/2 \\ r/b \end{bmatrix} \omega_D \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(r \sin \phi)/2 & -(r \sin \phi)/2 \\ (r \cos \phi)/2 & (r \cos \phi)/2 \\ -r/b & r/b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_I \\ \omega_D \end{bmatrix} \quad (15)$$

## IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR DE POSICIÓN Y MOVIMIENTO DEL ROBOT MÓVIL DIFERENCIAL

El siguiente paso es representar las ecuaciones del modelo cinemático (15) en un diagrama de bloques del SimuLink, el cual permite calcular la posición del robot móvil en cada instante de tiempo. Este bloque se llama *cinemática directa diferencial* y servirá para probar el control de posición, el cual será diseñado posteriormente. El bloque *cinemática directa diferencial* se muestra en la figura 2.

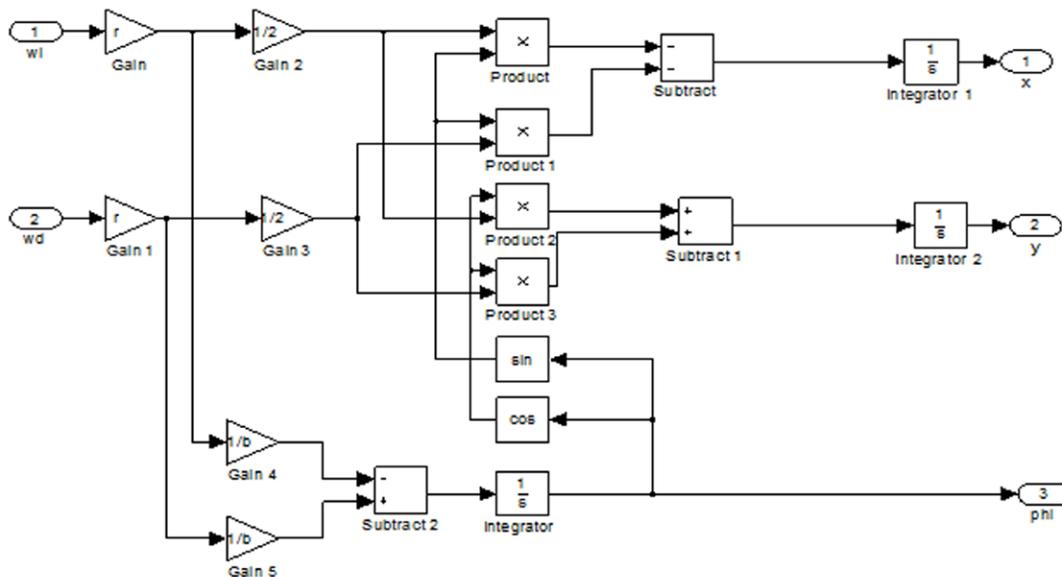


Figura 2. Bloque cinemática directa diferencial

Fuente: elaboración propia.

Para probar el funcionamiento del esquema de la figura 2 se integraron en un bloque de SimuLink los siguientes elementos: dos modelos de los motores con sus respectivos controles de velocidad manejados por *redes neuronales artificiales* (RNA), dos bloques reductores de velocidad y el bloque *cinemática directa diferencial*; a dicho esquema se le aplicaron diferentes señales de control en las entradas de referencia, tal como se muestra en la figura 3.

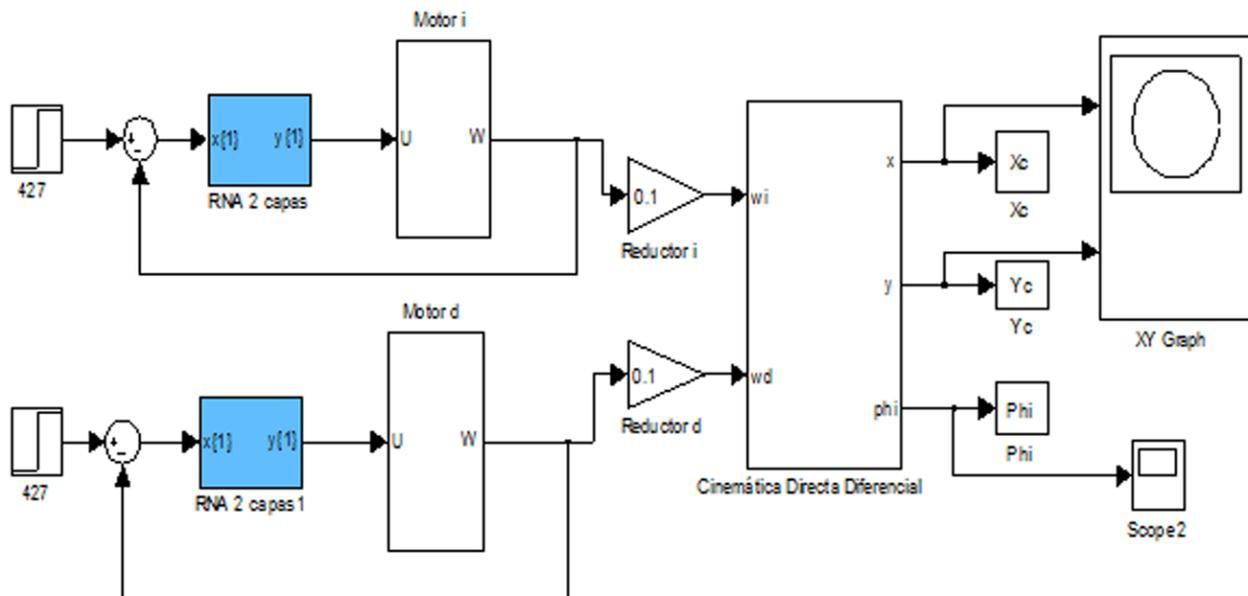
En este artículo se ha comprobado que las redes neuronales pueden emular el comportamiento de un controlador PID para controlar los perfiles de velocidad de los motores de tracción un robot móvil tipo diferencial. La configuración de la red neuronal es un punto fundamental para que una aplicación produzca buenos resultados. Si los datos de entrenamiento son correctos, pero la arquitectura de la red no es la adecuada para la aplicación, la red neuronal no se comportará como se espera. Inicialmente se obtuvo un modelo en forma de función de transferencia de todas las partes

eléctricas y mecánicas del modelo físico que eran necesarias para la construcción del robot móvil de tracción diferencial. En este modelo no se tuvieron en cuenta las no linealidades del modelo y se consideró el motor libre de carga. Para el diseño del controlador de velocidad se estudiaron diferentes técnicas de control, pero al final se optó por reemplazar un PID sintonizado con la herramienta *sisotool* por una RNA. Después de tener sintonizado el controlador de velocidad PID se desarrollaron varias arquitecturas de RNA con un tipo de redes de retropropagación (*back-propagation*), entrenadas con los datos obtenidos del controlador PID. En la figura 4 se muestra la comparación entre estas dos estrategias de control.

Para verificar el correcto funcionamiento del esquema mostrado en la figura 3 se partió de una posición inicial de coordenadas  $x_{in} = 0$ ,  $y_{in} = 0$ ,  $\phi_{in} = 0$  que son las coordenadas del origen. Las simulaciones que se realizaron fueron las siguientes:

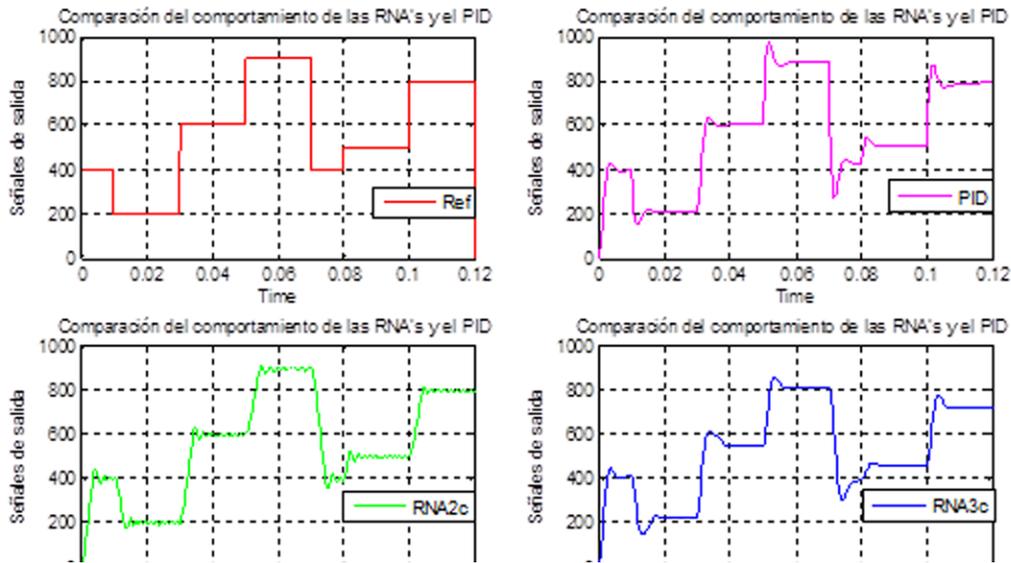
Velocidades angulares iguales  $\omega_i = \omega_d$ .

Velocidad angular  $\omega_i = 247$  rad/s y  $\omega_d = 0$  rad/s.



**Figura 3.** Esquema del sistema completo

**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 4.** Comparación del comportamiento de las RNA y el PID frente a un tren de pulsos

**Fuente:** elaboración propia.

Velocidad angular  $\omega_i = 247 \text{ rad/s}$  y  $\omega_d = -247 \text{ rad/s}$ .

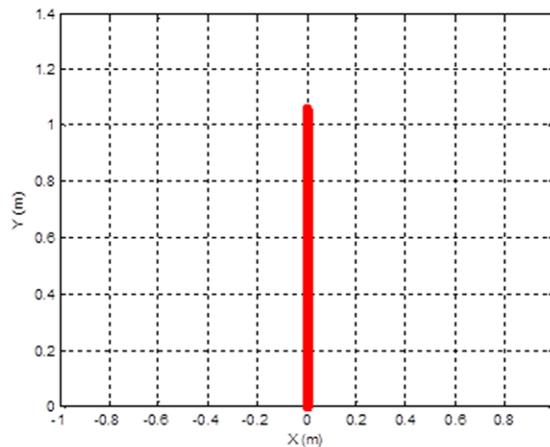
Para estas simulaciones se asumieron los siguientes valores:

$r = 0,05 \text{ m}$  radio de las rueda del robot diferencial.

$b = 0,4 \text{ m}$  distancia de separación entre las ruedas del robot diferencial.

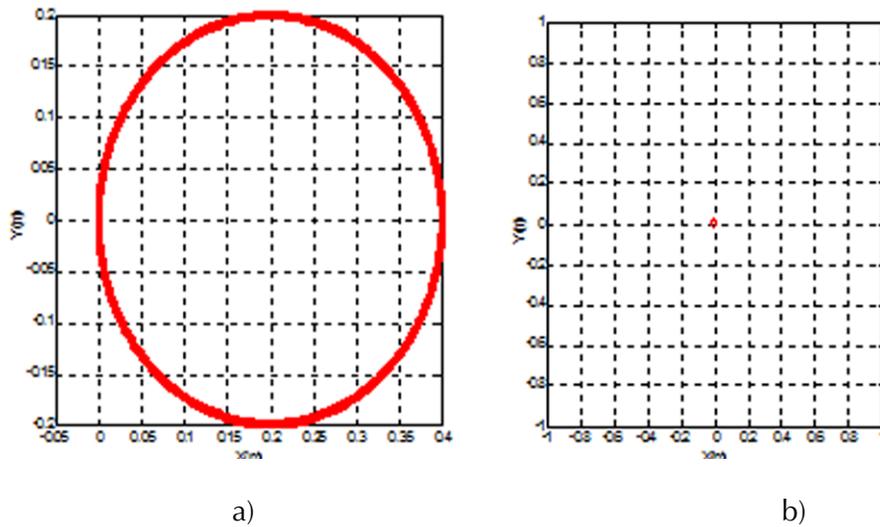
$\frac{N_1}{N_2} = 0.1$  índice de reducción.

Con estos valores y un tiempo de simulación de 500 ms, la primera simulación hizo un recorrido en línea recta de aproximadamente de 1.07 m. Para la segunda prueba se describió una circunferencia perfecta de radio  $b/2 = 0.2 \text{ m}$  y para la tercera se mostró un punto fijo. Los resultados de las simulaciones son presentados en las figuras 5 y 6.



**Figura 5.** Simulación para  $\omega_i = \omega_d = 427 \text{ rad/s}$

**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 6.** a) Simulación para  $\omega_i = 427 \text{ rad/s}$ ,  $\omega_d = 0 \text{ rad/s}$ . b) Simulación para  $\omega_i = 427 \text{ rad/s}$ ,  $\omega_d = -4.27 \text{ rad/s}$

**Fuente:** elaboración propia.

## MÉTODO DE PERSECUCIÓN PURA PARA EL SEGUIMIENTO DE CAMINOS EXPLÍCITOS

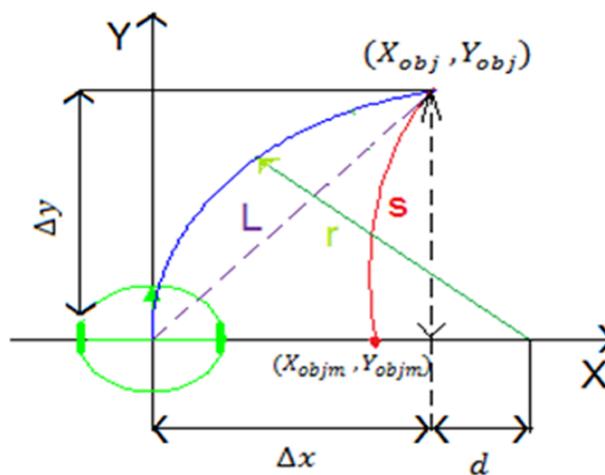
Considérese un sistema de referencia local asociado al movimiento del vehículo, tal como se muestra en la figura 7.

Del análisis de la figura 7 se deducen las ecuaciones 16 y 17:

$$r = \Delta x + d, \quad (16)$$

$$d^2 + \Delta y^2 = r^2. \quad (17)$$

Siendo  $r$  el radio de curvatura del vehículo.



**Figura 7.** Seguimiento de caminos mediante persecución pura

**Fuente:** elaboración propia.

**Nota:** Se supone que en el intervalo de control, la curvatura es constante, describiendo el vehículo un arco de circunferencia.

Despejando  $d$  en 16 y sustituyendo en 17, se obtiene la ecuación 18:

$$(r - \Delta x)^2 + \Delta y^2 = r^2. \quad (18)$$

De donde el radio de curvatura necesario para que el vehículo se desplace  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  es dado por la ecuación 19:

$$r = \frac{\Delta x^2 + \Delta y^2}{2\Delta x}. \quad (19)$$

Por tanto, la curvatura que es necesario suministrar al vehículo se expresa por la ecuación 20:

$$\gamma_r = \frac{1}{r} = -\frac{2\Delta x}{L^2}, \quad (20)$$

Donde el signo viene dado por el sentido de giro necesario para alcanzar el punto objetivo en la figura 7,  $L$  es la distancia a la que se encuentra el punto objetivo y  $\Delta x$  es el desplazamiento lateral.

La expresión anterior constituye la ley de control de persecución pura (*pure pursuit*), lo que permite identificar con claridad la forma de una ley de control proporcional al error lateral ( $\Delta x$ ) con respecto al punto objetivo. La constante de proporcionalidad varía con la inversa del cuadrado de  $L$ .

En la figura 7 puede verse también que la curvatura de la persecución pura es la inversa del radio de una de las circunferencias que pasa por la posición actual del vehículo y por el punto objetivo.

El algoritmo para la aplicación de esta ley de control solo necesita determinar el punto del camino que se encuentra a una distancia previamente definida  $L$ , y calcular el error lateral ( $\Delta x$ ) con respecto a la posición actual del centro de guiado del vehículo. Si las coordenadas están en un sistema global, es necesario tener en cuenta la orientación del vehículo para obtener  $\Delta x$ , es decir, si el vehículo está en las coordenadas globales  $(x, y)$  con orientación  $\phi$ . El punto objetivo sobre el camino está en las coordenadas globales  $(x_{obj}, y_{obj})$  y se expresa mediante la ecuación 21:

$$\Delta x = (x_{obj} - x) \cos(\phi) + (y_{obj} - y) \sin(\phi). \quad (21)$$

Un método práctico para aplicar la ley de control consiste en obtener a la tasa de muestreo, el punto  $(x_{obm}, y_{obm})$  del camino objetivo que está más próximo al vehículo  $(x, y)$  y elegir el punto  $(x_{ob}, y_{ob})$  a una distancia fija  $s$  sobre el camino tomado en el sentido de avance a partir de  $(x_{obm}, y_{obm})$  tal como se muestra en la figura 6; posteriormente se calcula  $L$  y se aplica la ley de control 20 y 21. El cálculo de  $L$  se realiza con el teorema de Pitágoras mediante la ecuación 22:

$$L = \sqrt{(x_{obj} - x)^2 + (y_{obj} - y)^2}. \quad (22)$$

La ley de control es dependiente de la velocidad, obteniéndose las ecuaciones 23 y 24:

$$\omega_l = \frac{v - (b/2)\omega}{r} \quad (23)$$

$$\omega_D = \frac{v + (b/2)\omega}{r} \quad (24)$$

Aislando las velocidades lineales de cada rueda, y sabiendo que  $v = r*\omega$  estas ecuaciones se pueden reescribir mediante las ecuaciones 25 y 26:

$$V_l = \omega_l * r = \frac{r(v - b/2\omega)}{r} = v - b/2\omega \Rightarrow V_l = v(1 - \frac{b}{2*r}), \quad (25)$$

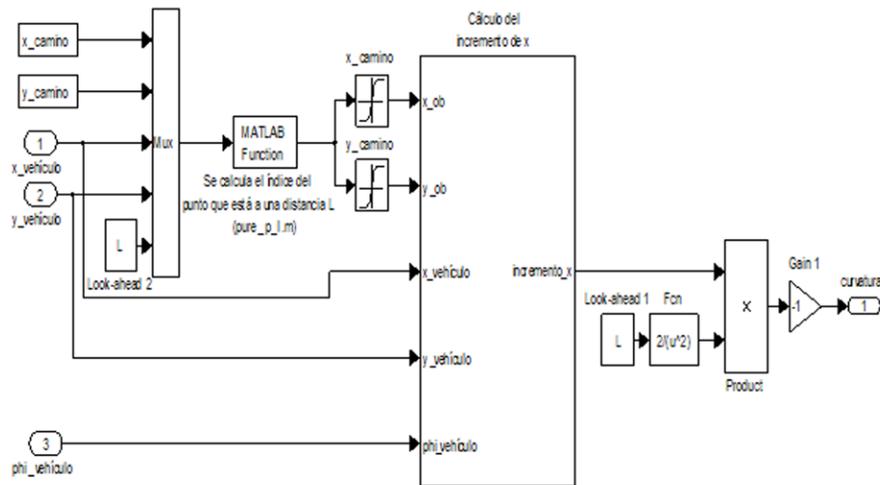
$$V_D = \omega_D * r = \frac{r(v + b/2\omega)}{r} = v + b/2\omega \Rightarrow V_D = v(1 + \frac{b}{2*r}). \quad (26)$$

Donde  $r$  es el radio de giro,  $b$  la distancia entre las ruedas y  $v$  la velocidad lineal del móvil.

El algoritmo de persecución pura se puede implementar en SimuLink mediante el bloque de la figura 8.

Este bloque es llamado *persecución pura l* y consta de una MATLAB Function con nombre *pure\_p\_l* que es la encargada de calcular el índice de los valores  $x_{camino}$  y  $y_{camino}$  más próximos a la posición del robot y un sub-bloque denominado *cálculo de incremento* de  $x$  que es la representación de la función 21. Este bloque fue tomado del *toolbox Hemero* y entrega a su salida el valor de la función 20 que es la curvatura entregada al robot móvil (Vachhani, Mahindrakar y Sridharan, 2011).

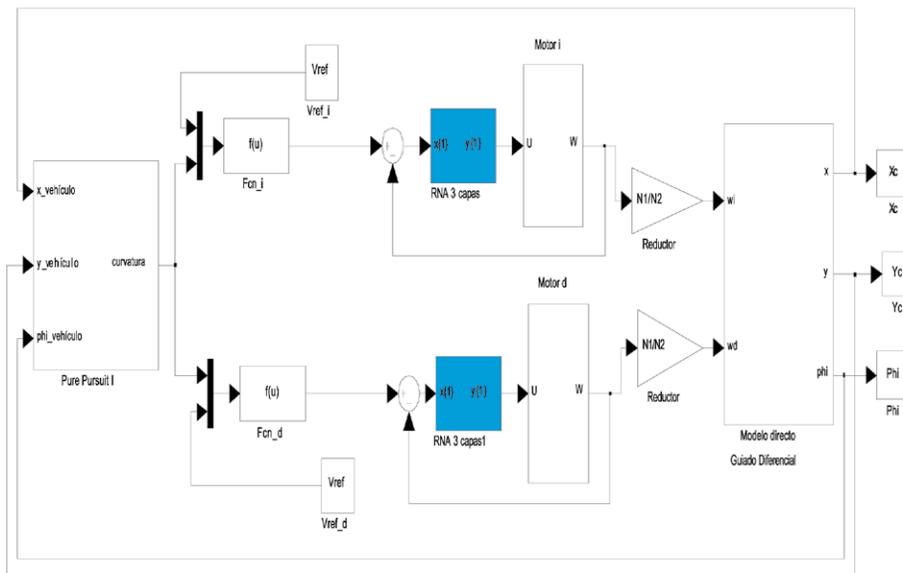
Con este bloque se pueden realizar las siguientes simulaciones:



**Figura 8.** Esquema de SimuLink para el cálculo de la curvatura

**Fuente:** elaboración propia.

- Se comprobará cómo evoluciona el robot diferencial al momento de seguir una trayectoria rectilínea de la forma  $y = x$ .
  - Se comprobará cómo se comporta el robot diferencial ante el requerimiento de seguir una parábola de la forma  $y = x^2$ .
  - Se comprobará cómo se comporta el robot diferencial ante el requerimiento de seguir una trayectoria en forma de circunferencia de la forma  $y = \sin(t)$  y  $y = \cos(t)$ .
- Por último, en la figura 9 se muestra el bloque implementado para el control de posición.



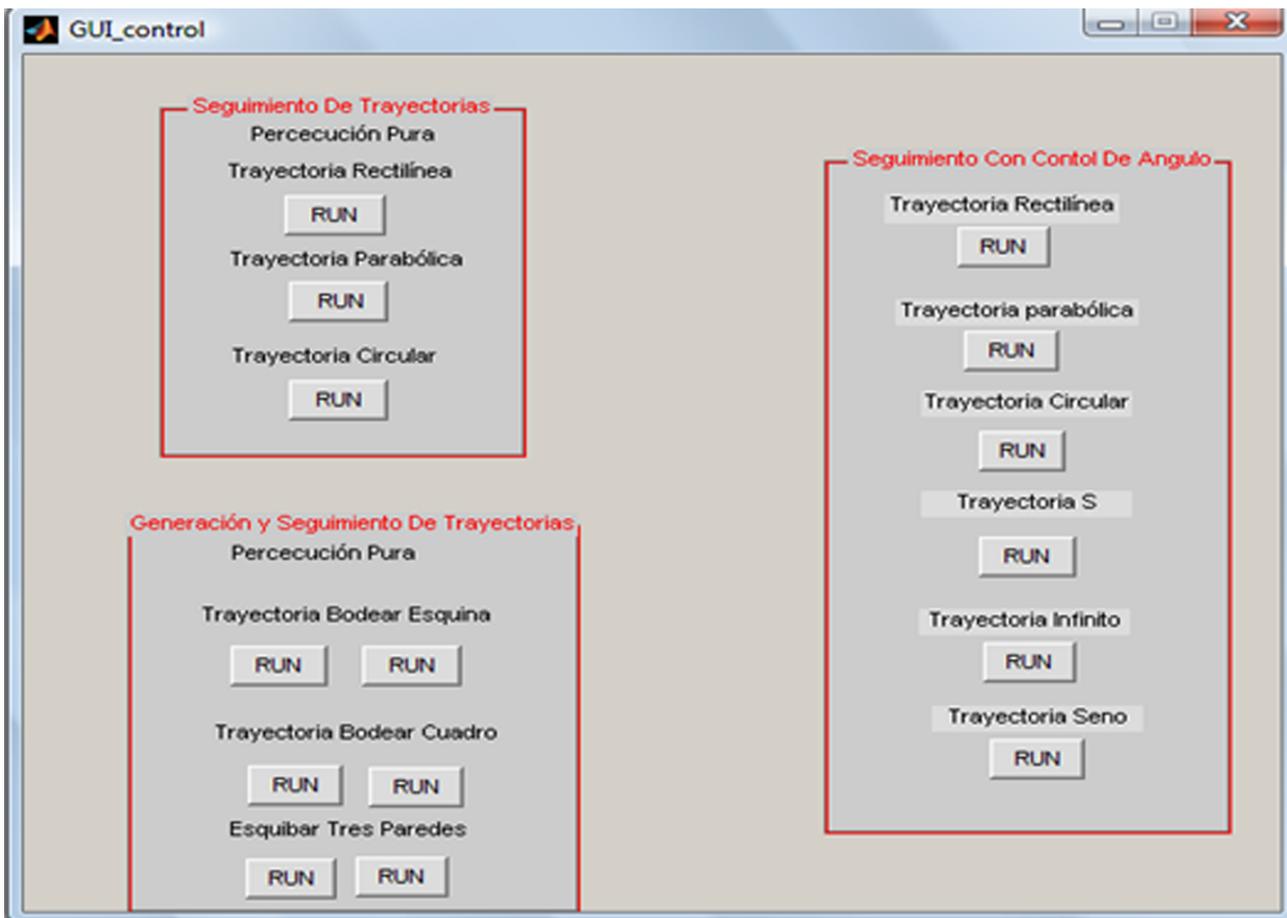
**Figura 9.** Bloque control de posición

**Fuente:** elaboración propia.

## RESULTADOS OBTENIDOS. SIMULACIÓN DEL CONTROL DE POSICIÓN

Se implementó una interfaz gráfica GUI para la presentación de las diferentes trayectorias seguidas por el robot móvil. En la figura 10 se muestra la GUI implementada.

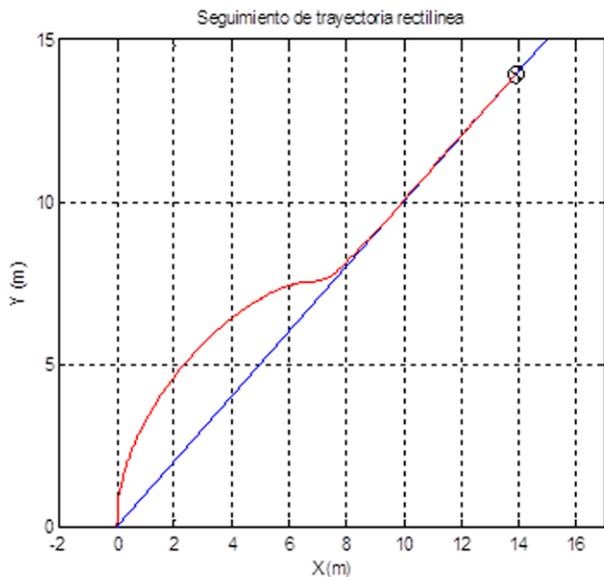
Se simularon trayectorias realizadas controlando solamente el ángulo de giro y utilizando el control de posición mediante el método geométrico de persecución pura implementado. Las simulaciones que se implementaron utilizando el control de posición mediante el método geométrico de persecución pura fueron las siguientes:



**Figura 10.** Interfaz gráfica simular las trayectorias realizada en Matlab

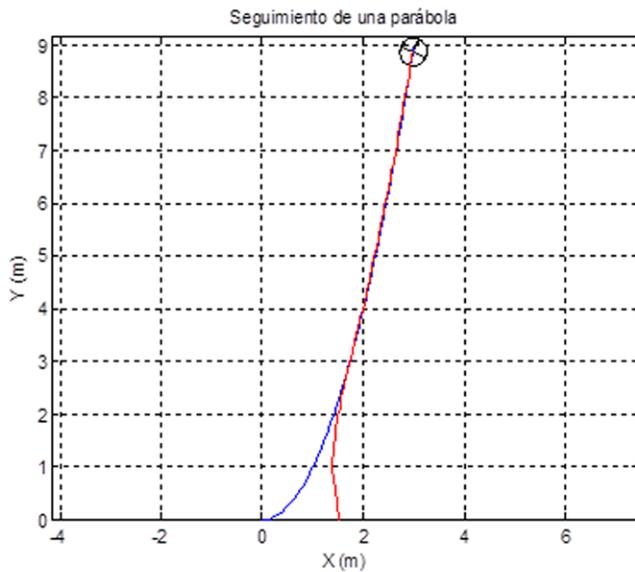
**Fuente:** elaboración propia.

- Seguir una trayectoria rectilínea de la forma  $y = x$  (figura 11).
- Seguir una trayectoria con forma de parábola de la forma  $y = x^2$  (figura 12).



**Figura 11.** Seguimiento de una trayectoria rectilínea

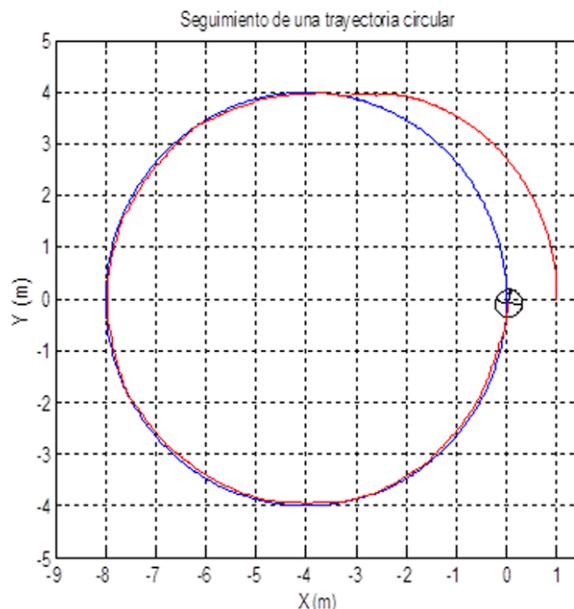
**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 12.** Seguimiento de una parábola

**Fuente:** elaboración propia.

- Seguir una trayectoria en forma de circunferencia de la forma  $y = \sin(t)$  y  $y = \cos(t)$  (figura 13).



**Figura 13.** Seguimiento de una trayectoria circular

**Fuente:** elaboración propia.

## CONCLUSIONES

De las simulaciones se puede observar la eficiencia del control de posición para el seguimiento de caminos explícitos, en este caso para el seguimiento de trayectorias rectilíneas y curvilíneas. Como se puede apreciar en estas simulaciones se observa que el control de posición se comporta muy bien al momento de seguir cualquier curva, en especial frente a curvas suaves.

En algunas simulaciones donde se trató de seguir trayectorias rectilíneas muy inclinadas y  $\Delta x$  se hace muy pequeño este controlador presenta fallas, debido a que la función del radio de curvatura para una trayectoria vertical es  $\gamma = -\frac{2 * \Delta x}{L} = 0$ , y en ese momento los perfiles de velocidad serán cero (0) y por este motivo se pierde el control de seguimiento.

El trabajo realizado permite la implementación práctica de las técnicas estudiadas en una plataforma real, garantizando el éxito de dichas técnicas.

## REFERENCIAS

- Blazic, S. (2014). On Periodic Control Laws for Mobile Robots. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(7), 3660-3670.
- Campion, G.; Bastin, G. y d'Andréa Novel, B. (1993). Structural Properties and Classification of Kinematic and Dynamics Models of Wheeled Mobile Robots. *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, 12(1), 47-61.
- Cook, G. (2011). *Mobile Robots: Navigation, Control and Remote Sensing*. Nueva Jersey: Wiley-IEEE Press.
- Jingkui, S.; Wenxin, H. y Liangliang, Y. (2010). A New Sensor-Follow Control Strategy for Tracking Control Mobile Robot. *International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE)* (pp. 163-167). Wuhan.
- Jung-Hoon, H.; Arkin, R. y Dong-Soo, K. (2003). *Mobile Robots at Your Fingertip: Bezier Curve On-Line Trajectory Generation for Supervisory Control*.

- International Conference on Intelligent Robots and Systems (pp. 1444-1449).
- Kwon, J.W. y Dongkyoung, C. (2012). Hierarchical Formation Control Based on a Vector Field Method for Wheeled Mobile Robots. *IEEE Transactions on Robotics*, 28(6), 1335-1345.
- Rezaee, H. y Abdollahi, F. (2014). A Decentralized Cooperative Control Scheme with Obstacle Avoidance for a Team of Mobile Robots. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(1), 347-354.
- Saidonr, M.; Desa, H. y Rudzuan, M. (2011). *A Differential Steering Control with Proportional Controller for an Autonomous Mobile Robot*. IEEE 7th International Colloquium on Signal Processing and its Applications (pp. 90-94). Penang.
- Spyros, G. (2014). *Introduction To Mobile Robot Control*. Londres: Elsevier.
- Toda, Y. y Kubota, N. (2013). Self-Localization Based on Multiresolution Map for Remote Control of Multiple Mobile Robots. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9(3), 1772-1781.
- Vachhani, L.; Mahindrakar, A. y Sridharan, K. (2011). Mobile Robot Navigation Through a Hardware-Efficient Implementation for Control-Law-Based Construction of Generalized Voronoi Diagram. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 16(6), 1083-1095.
- Velraj Kumar, P.; Manohar, S. y Raju, A. (2010). *Development of Real-Time Tracking and Control Mobile Robot Using Video Capturing Feature for Unmanned Applications*. Communication Control and Computing Technologies (ICCCCT) (pp. 90-92). Ramanathapuram.
- Yandong, L.; Zongyi, W. y Ling, Z. (2010). *Adaptive Neural Network PID Sliding Mode Dynamic Control of Nonholonomic Mobile Robot*. IEEE International Conference on Information and Automation (pp. 735-757). Harbin.
- Yang, Y.; Fu, M.; Zhu, H.; Xiong, G. y Sun, C. (2010). *Control Methods of Mobile Robot Rough-Terrain Trajectory Tracking*. 8th IEEE International Conference on Control and Automation (pp. 731-738). Xiamen.





## Control difuso aplicado a un convertidor DC-DC buck para una carga no lineal

### Buck DC DC converter using fuzzy logic control for no linear load

Rubén Darío Bonilla Isaza<sup>1</sup>

**Fecha de recepción:** 21 de noviembre de 2015

**Fecha de aceptación:** 15 de febrero de 2016

**Cómo citar:** Bonilla Isaza, R. D. (2016). Control difuso aplicado a un convertidor DC-DC buck para una carga no lineal. *Revista Tecnura*, 20(48), 117-148. <http://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.2.a10>

#### Resumen

**Contexto:** Este artículo presenta un sistema matemático llamado lógica difusa como técnica de control para mejorar el desempeño de un convertidor DC-DC (Buck) ante variaciones de cargas de no lineales.

**Método:** Para ello se construyó por medio de Simulink MATLAB un convertidor DC-DC de lazo cerrado al cual se le colocó en serie un controlador basado en lógica difusa, con entradas de control de señal de voltaje de salida y de la derivada del voltaje y como salida un valor constante que sintoniza el ciclo útil de un modulador de pulsos (PWM), que luego ajustar la tensión de salida del controlador de acuerdo a una referencia deseada. El controlador difuso fue construido con funciones de pertenencia en las que se integraron variables lingüísticas que explican cuándo un valor de voltaje de salida debe corregirse y cuándo la variación del voltaje se sale de los rangos establecidos entre -1 y 1 por ciento de variación permitida.

**Resultados:** Para evaluar el desempeño de este tipo de control se compara con un convertidor DC-DC con control de lazo cerrado de ganancia unitaria obteniendo un 40% de mejora en la integral de área respecto al controlador difuso con un tiempo de estabilización del orden de 0.01s. En las cargas no lineales existen fenómenos aleatorios o efectos indeseados propios de la resonancia del circuito por lo

cual se emuló mediante la interrupción por ciclos de un interruptor controlado por tiempo.

**Palabras clave:** carga no lineal, convertidor Buck, ciclo útil, funciones de pertenencia, lógica difusa.

#### Abstract

**Background:** This paper presents a mathematical system called fuzzy logic as a control technique to improve the performance of a DC-DC converter (Buck) to changes in non-linear loads.

**Method:** Through Simulink MATLAB was built a DC-DC converter of closed loop, which is placed in series with a controller based on fuzzy logic. The control inputs are the voltage signal and its derivative, and the output is a constant value, which tunes the duty cycle of a pulse modulator (PWM). This adjust the output of voltage of the controller according to a desired reference. The fuzzy controller was built with membership functions in which linguistic variables that explain when a value of output of voltage must be corrected and when the voltage variation is out of the established ranges between -1 and 1 percent of allowable variation were integrated.

**Results:** To evaluate the performance of this type of control compared to a DC-DC converter with control of closed loop of unity gain, obtaining a 40% improvement in the integral of area regarding the fuzzy controller, with a stabilization time of 0.01s. In non-linear

<sup>1</sup> Ingeniero Electricista y magíster en Ingeniería de Automatización Industrial. Docente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Contacto: [rdbonillai@udistrital.edu.co](mailto:rdbonillai@udistrital.edu.co)

loads, there are random phenomena or own unwanted effects of resonance circuit, then was emulated by interrupting cycles of a time-controlled switch.

**Keywords:** nonlinear load, Buck converter, duty cycle, membership functions, fuzzy logic.

## INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de tecnología ha desarrollado una carrera contra reloj para la cual los dispositivos que son más eficientes y con mayores prestaciones tendrán el éxito esperado. Una de las ventajas competitivas radica en la forma en que se controlan los procesos para los cuales están diseñados estos dispositivos. Un ejemplo actual, pero que lleva bastante tiempo implementado, son las fuentes conmutadas, las cuales se utilizan en la mayoría de los elementos de tecnología actuales, tales como TV, DVD, Smartphone entre otros. Estos dispositivos cuentan con fuentes de diferentes tipos, llamados también *convertidores*, con modelo de conversión DC-DC (corriente directa), AC-DC (corriente alterna) y AC-AC (corriente alterna).

Las fuentes conmutadas que usan estos principios de funcionamiento alimentan cargas de todo tipo, motivo por el cual los convertidores están sujetos a fenómenos aleatorios en las cargas no lineales o efectos indeseados propios de la resonancia del circuito (Collin, 2013). Este efecto hace que las tensiones ideales a las que fueron diseñados se vean afectadas por los comportamientos antes mencionados. Para evitar esto se realiza un control de alguna variable que afecte directamente el circuito (Asumadu & Ho, 2004). Un ejemplo, para fuentes conmutadas es la tensión de salida del convertidor donde se conecta la carga se utiliza la información que se obtiene debido a las variaciones no lineales de la carga para diseñar un control y así garantizar un error mínimo en la tensión de salida.

Una pregunta surge en este punto: ¿Qué método lograría realizar el control que permita eliminar los efectos no lineales y aleatorios de las cargas que alimenta?, y si se encuentra un método, ¿es este eficiente? Para responder la primera pregunta se requiere de investigaciones previas, las cuales se

han enfocado en qué técnicas pueden servir para el control. La segunda se determina realizando una correlación en dos posibles escenarios. Uno de ellos, el convertidor DC-DC sin ninguna técnica de control, y otro usando una propuesta de control.

En este artículo se evaluó el método mediante lógica difusa como técnica de control para evaluar el desempeño de un convertidor DC-DC (*buck*) ante variaciones de cargas no lineales simulado mediante el *software MATLAB*.

## CONVERSOR DC-DC

Los convertidores DC-DC son el resultado de la conmutación en semiconductores que los hacen eficientes y económicos (Rashid, González, & Fernández, 2004). En general, como se deduce de su nombre, son dispositivos que transforman una señal de corriente continua (DC) a otra señal regulada de mayor o menor valor de corriente continua (DC). Debido a su salida regulada los convertidores DC-DC también son conocidos como reguladores de conmutación (Dash & Nayak, n.d.).

Las aplicaciones académicas e industriales de los convertidores son amplias por su rápida respuesta dinámica. La clasificación de los convertidores es debida a los niveles de tensión de salida con respecto a la entrada, generalmente se clasifican en tres grupos (Rashid, González y Fernández, 2004):

- *Convertidores DC-DC reductores (buck converter)*: Permiten obtener en la salida una tensión menor a la señal de tensión de entrada, se conocen como convertidores *buck*.
- *Convertidores DC-DC elevadores (boost converter)*: Permiten obtener en la salida una tensión mayor a la señal de tensión de entrada, se conocen como convertidores *boost*.

- *Convertidores DC-DC reductores-elevadores*: Permiten obtener en la salida una tensión mayor o menor a la señal de tensión de entrada, se conocen como convertidores *buck-boost*, *flyback* y *cuk*.

El circuito equivalente de un convertor DC-DC está compuesto por elementos activos y elemento pasivos como se muestra en la figura 1 (Elmas, Deperlioglu y Sayan, 2009), la cual ilustra cada una de las configuraciones según el tipo de convertor a implementar. Para los elementos identificados con la letra *a* el circuito equivalente corresponde a un convertor DC-DC *buck*; los elementos identificados con la letra *b* corresponden a un convertor DC-DC *boost*; y por citar un ejemplo reductor-elevador, los elementos identificados con la letra *c* corresponden a un convertor DC-DC *buck-boost*. La carga generalmente y con el objetivo de realizar el desarrollo analítico se puede modelar netamente resistiva o a partir de un modelo en serie RL.

### Variables de control en un convertidor DC-DC

Un convertidor DC-DC transforma una tensión DC en otra de la misma naturaleza mediante el ajuste del ciclo útil (Dash & Nayak, n.d.). El *buck*, en modo continuo, es un convertidor cuya salida de tensión depende exclusivamente del ciclo útil y de la tensión de entrada (Ramot, Friedman, Langholz y Kandel, 2003; Dash y Nayak, s.f.). La relación está dada por la ecuación 1.

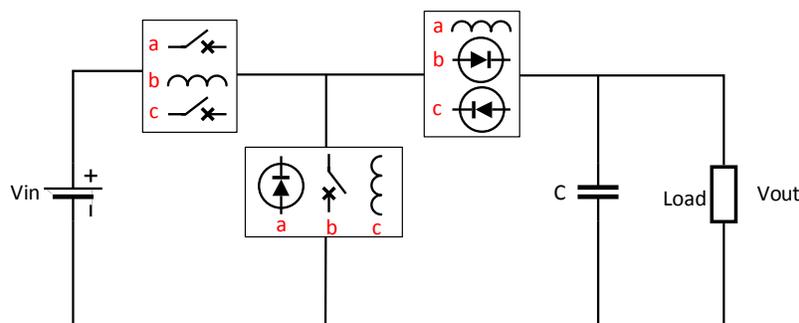
$$V_{Salida} = DV_{Entrada} \quad (1)$$

Donde  $V_{Salida}$  es la tensión de salida,  $V_{Entrada}$  es la tensión de entrada de la alimentación y  $D$  es el ciclo útil, variando  $0 \leq D \leq 1$  y para  $D=0$  se considera circuito abierto y  $D=1$  circuito cerrado.

En un convertidor DC-DC tipo *buck* el valor del ciclo útil se ajusta para que la tensión de salida se establezca de acuerdo con el valor de diseño que se desea (Rashid, González y Fernández, 2004). Sin embargo, al conectar una carga con la que se puede alimentar un sistema, la tensión de salida se ve afectada por el efecto mismo de la carga que se conectó (Collin, 2013). Una forma de controlar la tensión de salida dado la perturbación de la carga consiste en ajustar de forma dinámica el ciclo útil. Variar el ciclo útil a medida que la carga va exigiendo corriente al convertidor es una forma simple de lograrlo; otra manera consiste en controlar el sistema mediante la corriente que le exige la carga al convertidor; un método más complejo radica en controlar la corriente del inductor y la tensión de salida del convertidor.

### FUZZY LOGIC

La lógica difusa (*fuzzy logic*) es una técnica matemática que permite plantear proposiciones de tipo lógico para caracterizar estados o escenarios definidos (lógica multivaluada). Respecto a la lógica



**Figura 1.** Circuito equivalente convertor DC-DC

**Fuente:** elaboración propia.

binaria que establece relaciones absolutas ante un escenario ("hace calor" o "hace frío"), la lógica difusa puede establecer más estados diferentes a referencias meramente absolutas. En el mundo actual la lógica binaria funciona muy bien para los computadores, sin embargo, al intentar solucionar problemas que requieren lógica humana, se queda corta. La lógica difusa ha mostrado buenos resultados en la caracterización y resolución de problemas que con técnicas tradicionales no podían ser resueltos (Ramot, Friedman, Langholz y Kandel, 2003). Es una técnica heurística que está sujeta al diseño de la persona que desea estudiar el problema. El mismo diseñador plantea los estados y pone sus límites y restricciones. El buen entendimiento del problema, generará buena definición de reglas en la lógica difusa (Maussion y Hissel, 1998).

Las reglas son las funciones matemáticas que explican cuándo un escenario se está presentando y, por tanto, deben realizarse las tareas correspondientes. Una función de pertenencia asigna un dominio para la cual las condiciones ocurren.

### Funciones de pertenencia

En la figura 2 se muestran funciones de pertenencia para cada intervalo en el dominio del error de un fenómeno particular. Decir que la función de pertenencia que va desde A-3 hasta A-2 y A-1 es mencionar

que existen condiciones en el dominio para las cuales una función existe (Dash y Nayak, s.f.).

### Cálculo del error

El error que se desea estimar es el error relativo, donde la referencia es el punto de control calculado con los parámetros del ciclo útil ajustados (Elmas, Deperlioglu y Sayan, 2009). La ecuación 2 muestra cómo se calcula en error para un sistema continuo. Debido a la discretización de la simulación en *MATLAB*, la ecuación 3 muestra el modo de calcular el error. En la ecuación 4 se observa también cómo se calcula la derivada del error por unidad de tiempo de simulación.

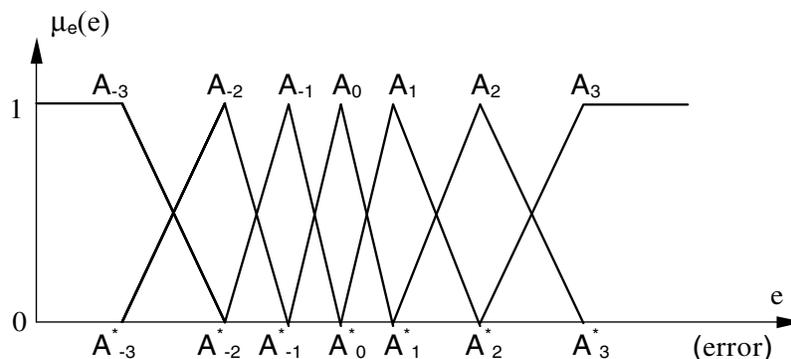
$$e = V_{\text{Referencia}} - V_{\text{Salida}} \quad (2)$$

$$e[k] = V_{\text{Referencia}} - V_{\text{Salida}}[k] \quad (3)$$

$$de[k] = e[k] - e[k - 1] \quad (4)$$

### Ciclo útil

Para un convertidor tipo *buck* en modo continuo, el ciclo útil es la relación D cuyo dominio se encuentra entre 0 y 1, y cuyo voltaje de salida nunca superará el voltaje de entrada (ecuación 1). Para ajustar el ciclo útil sin metodologías basadas en



**Figura 2.** Funciones de pertenencia generalizadas

**Fuente:** Elmas, Deperlioglu y Sayan (2009).

técnicas de control, se incorpora al circuito un modulador de ancho de pulso al interruptor conectado en serie a la fuente, el ciclo útil se ajusta con la frecuencia de conmutación del PWM (Patin, 2015; Siano y Citro, 2014).

Por otro lado, la relación lineal entre el voltaje de salida y el voltaje de entrada indica que ajustando adecuadamente el ciclo útil se puede lograr un control apropiado ante variaciones en el voltaje de salida cuando existe carga en el convertidor.

El ajuste del nuevo ciclo útil después de cuantificado el error, en forma discreta, está dada por la ecuación 5.

$$D[k] = D[k - 1] - du[k] \quad (5)$$

Diversos trabajos se han desarrollado en el área de convertidores y la implementación de algoritmos de *fuzzy logic* como estrategia de control no es algo nuevo.

Maussion y Hissel (1998) obtienen resultados preestablecidos de un control lógico difuso (sintonización) utilizando el criterio de AIE (*error de integral absoluto*) aplicado a un conversor DC-DC y un PMSM, asumiendo una carga lineal con lazo abierto. Las entradas de realimentación del *fuzzy logic* son la tensión de salida del convertidor y la derivada del error de tensión. En este trabajo se realiza una correlación entre un control PID a lazo abierto y un controlador *fuzzy logic* más PID. En general, este artículo presenta la información del estado inicial del conversor DC-DC con cargas lineales a lazo abierto.

Mattavelli, Rossetto, Spiazzi y Tenti (1997) muestran las potencialidades de implementar un controlador *fuzzy logic* en convertidores tipo *buck*, *boost* y *sepic*. Este trabajo menciona los modelos de control para convertidores, las variables a controlar y de cuáles variables se puede obtener información relevante para la sintonización control. Se debe recordar que la salida de tensión de un convertidor DC-DC depende de la tensión de entrada y del parámetro de ciclo útil definido en el PWM. Utilizan un controlador *fuzzy logic* con tres variables de control de entrada entre las que se destacan:

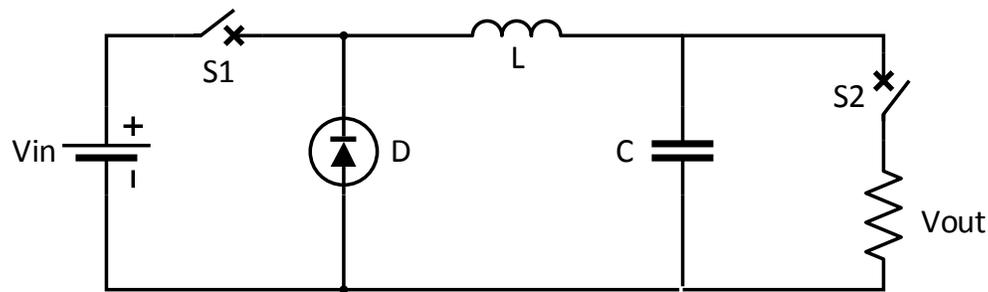
corriente en el elemento almacenador de energía, tensión de salida y derivada de la tensión de salida para una carga lineal resistiva. Este tipo de estrategias de control pueden ser implementadas en *hardware*, como Gupta, Boudreaux, Nelms y Hung (1997) que utilizan un microcontrolador de 8 bits para diseñar un controlador lógico difuso. Elmas, Deperlioglu y Sayan (2009) utilizan reglas sencillas y generales, para permitirles a las personas con bajo conocimiento en el funcionamiento de convertidores DC-DC modificarlos. Este artículo toma esas reglas lingüísticas sencillas para definir las funciones de pertenencia del controlador lógico difuso. Govindaraj y Rasila (2010) muestran dos modelos para hacer control de ciclo útil del controlador DC-DC mediante realimentación a la salida del controlador difuso; la otra opción es mediante la realimentación de la salida de la tensión de salida del convertidor.

Bajo esta descripción, las investigaciones son diversificadas y recientes (Siano y Citro, 2014), sin embargo, cada autor propone técnicas de control para cargas resistivas. El objetivo de este documento es presentar los resultados obtenidos ante variaciones de cargas no lineales utilizando lógica difusa como técnica de control.

## METODOLOGÍA

El presente documento utiliza como estudio de caso el conversor DC-DC *buck* y se modela la carga como una resistencia conmutada a alta frecuencia como se muestra en la figura 3 (Collin, 2013). El objetivo de la conmutación de la carga es introducir armónicos al sistema, aunque por ser un circuito basado en dispositivos semiconductores el conversor DC-DC es además una fuente de armónicos. La conmutación de la carga permite modelar una carga que sea no lineal y además al ser una carga de baja impedancia el circuito presenta variaciones en los niveles de tensión establecidos por el factor de conversión.

La tabla 1 muestra los valores nominales de diseño para el circuito equivalente de la figura 3.



**Figura 3.** Circuito equivalente convertidor *buck* con una carga resistiva conmutada a alta frecuencia

**Fuente:** elaboración propia.

**Tabla 1.** Características del circuito DC-DC *buck*

Tensión de entrada ( $V_{in}$ )	15 [V]
Tensión de salida ( $V_{out}$ )	5 [V]
Inductancia (L)	1 [mH]
Capacitancia (C)	100 [ $\mu$ F]
Carga resistiva (R)	4 [ $\Omega$ ]
Frecuencia Switch S1	20 [kHz]
Frecuencia Switch S2	20 [kHz]

**Fuente:** Elmas, Deperlioglu y Sayan (2009).

## Fuzzy logic

Con las reglas de pertenencia propuestas por Elmas, Deperlioglu y Sayan (2009) se plantea el control mediante el *Fuzzy Logic Toolbox* de *MATLAB*. Se utilizan dos entradas, las cuales son: el error, que se calcula restando la salida de tensión

del convertidor *buck* del valor de referencia de tensión que se desea controlar, y la derivada del error, que se calcula aplicando el operador derivada, con una salida que denota los límites en los cuales el control debe actuar, dadas las condiciones que se establecen en la entrada del controlador lógico difuso. Las proposiciones de entrada caracterizadas por Elmas, Deperlioglu y Sayan (2009) permiten establecer relaciones entre las dos entradas y la salida. Esta caracterización se muestra en la tabla 2.

Donde NB (*negative big*: muy negativo), NM (*negative médium*: negativo medio), NS (*negative small*: poco negativo), ZE (*zero*: error cero), PS (*positive small*: poco positivo), PM (*positive médium*: positivo medio), PB (*positive big*: muy positivo) son las variables lingüísticas que fueron caracterizadas para el error y la derivada del error. Los valores numéricos que se encuentran en la tabla 2 y que

**Tabla 2.** Reglas lingüísticas de entrada y su relación con la salida

		Error ( e )						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
Cambio en el error (de)	NB	-0.015	-0.015	-0.015	-0.015	-0.02	-0.002	0
	NM	-0.015	-0.015	-0.015	-0.02	-0.002	0	0.002
	NS	-0.015	-0.015	-0.02	-0.002	0	0.002	0.02
	ZE	-0.015	-0.02	-0.002	0	0.002	0.02	0.15
	PS	-0.02	-0.002	0	0.002	0.02	0.15	0.15
	PM	-0.002	0	0.002	0.02	0.15	0.15	0.15
	PB	0	0.002	0.02	0.15	0.15	0.15	0.15

**Fuente:** Elmas, Deperlioglu y Sayan (2009).

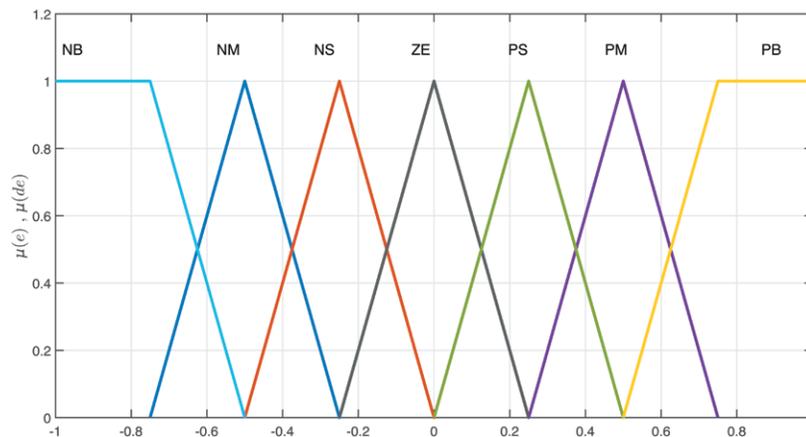
relacionan dos posibles estados de la entrada, dan cuenta de cómo debería ser la salida cuando estas dos condiciones mencionadas ocurren.

Por otro lado, las funciones de pertenencia definidas para cada una de las entradas, del error y la derivada del error, se muestran en la figura 4.

Ya que las variables lingüísticas fueron declaradas según intervalos numéricos, donde el error y la derivada del error pueden encontrarse (Elmas, Deperlioglu y Sayan, 2009), la ecuación 6 contiene los intervalos que se consideran las variables lingüísticas.

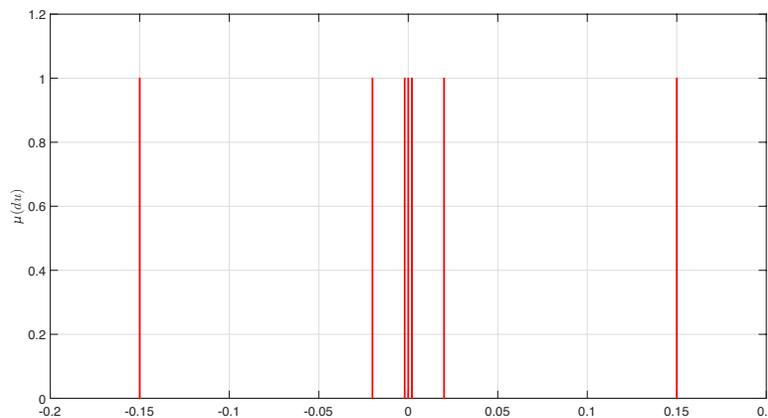
$$\mu(e), \mu(de) = \begin{cases} -\infty < e \leq -0.5 & NB \\ -0.75 < e \leq -0.25 & NM \\ -0.5 < e \leq 0 & NS \\ -0.25 < e \leq 0.25 & ZE \\ 0 < e \leq 0.5 & PS \\ 0.25 < e \leq 0.75 & PM \\ 0.5 < e \leq +\infty & PB \end{cases} \quad (6)$$

Para la función de pertenencia de salida se hallan los centroides en la intersección de las diferentes regiones formadas por las funciones de pertenencia de error y la derivada del error. La función de pertenencia de salida se muestra en la figura 5.



**Figura 4.** Funciones de pertenencia para el error y la derivada del error

**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 5.** Funciones de pertenencia para las condiciones de salida

**Fuente:** elaboración propia.

Con el modelo del caso de estudio y la parametrización de las funciones de pertenencia se diseñan los bloques adicionales que se requieren para el sistema de control.

## Sistema de control

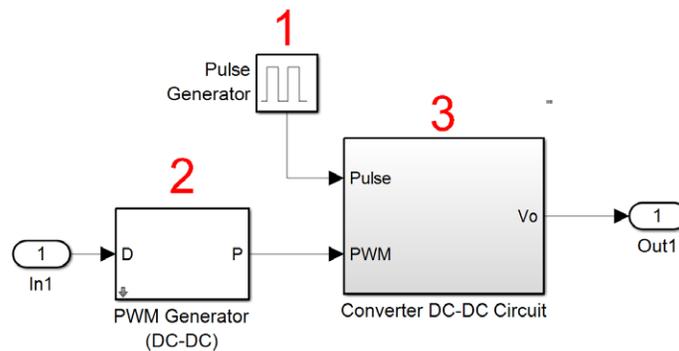
El control que se implementa mediante lógica difusa es de lazo cerrado, puesto que se toma la señal de salida para realimentar el controlador y así reajustar el ciclo útil, corrigiendo así la tensión de salida según la referencia deseada (Patin, 2015; Vindhya y Reddy, 2013). En la figura 6 se observa el convertidor DC-DC, compuesto por:

El bloque *pulse generator*, que sirve para simular la no linealidad de la carga que se colocó a la salida del convertidor *buck*.

1. El *PWM Generator*, que ajusta el parámetro de frecuencia de conmutación y adicionalmente se puede ajustar el ciclo útil según los parámetros que se requieran, en este caso, la variable a controlar.
2. La salida  $V_o$ , que se puede observar una rama que se utiliza para calcular el error.

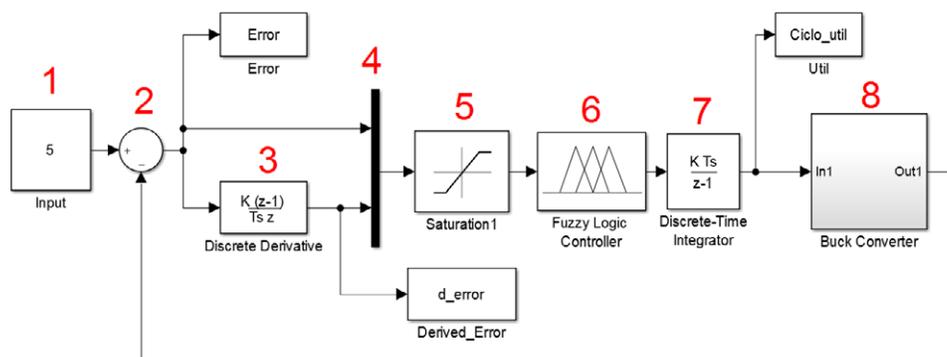
En la figura 7 se observa el sistema de control de lazo cerrado, y está compuesto por:

1. El bloque constante que representa el punto de operación el cual es la referencia ideal del convertidor *buck*.
2. El bloque de suma realiza la operación matemática para el cálculo del error.
3. El bloque de derivador discreto calcula la derivada del error que se requiere para la segunda entrada del bloque de lógica difusa.



**Figura 6.** Convertidor *buck*

Fuente: elaboración propia.



**Figura 7.** Control lógico difuso para convertidor *buck* DC-DC

4. El nodo de multiplexado que se usará para conmutar la única entrada que tiene el control de lógica difusa.
5. El bloque de saturación que se usará para definir los límites de las funciones de pertenencia.
6. El bloque de lógica difusa en el cual contiene las funciones de pertenencia.
7. Por último, como se obtiene la razón de cambio del ciclo útil se requiere realizar la integración correspondiente, la cual está en el bloque de integración discreta.

## RESULTADOS

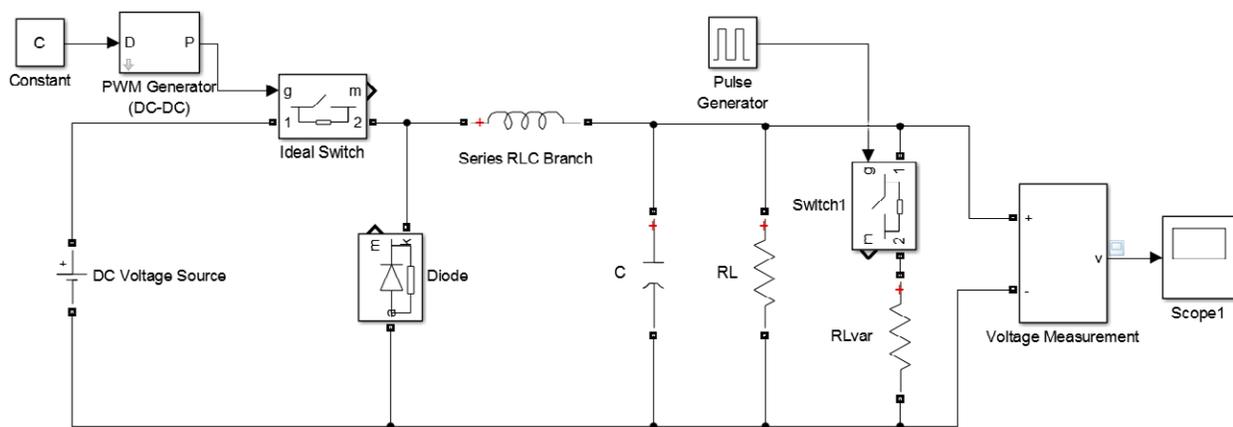
El circuito de potencia se implementa utilizando los bloques de SimuLink que permitan realizar la simulación de circuitos eléctricos, para el control *fuzzy logic* se utiliza el *toolbox* de *MATLAB* que además cuenta con un bloque en SimuLink.

### Convertor DC-DC Buck

El circuito del convertidor DC-DC Buck se muestra en la figura 8, cada uno de los elementos eléctricos es tomado de la librería SimRF y el *simple time* del bloque *Powergui* es ajustado para un  $T_s=1 \mu s$ . Los interruptores utilizan bloques de la librería de Power Electronics del Simscape.

Como se muestra en el circuito de la figura 6, el conversor caso de estudio cuenta con dos interruptores, el primero se conecta en serie a la fuente de tensión de entrada y el segundo se conecta en serie a la carga; ambos interruptores son controlados por señales de entrada, el primero por una señal de modulación de ancho de pulso (PWM), señal que será ajustada por el algoritmo de lógica difusa; el segundo se controla por un generador de pulsos con un ancho de pulso del 50 %.

En la figura 9 se muestra la forma de onda para la señal de entrada y salida del circuito de la figura 3; la tensión DC de entrada presenta un modelo ideal sin ningún tipo de interferencia, ajustada según las características del circuito DC-DC *buck* mostradas en la tabla 1. La tensión de salida muestra el efecto transitorio de carga y descarga de los elementos pasivos del circuito; la tensión corresponde a un valor cercano al valor esperado de salida de la tabla 1; su valor no coincide con exactitud a los 5 V ya que para el circuito de la figura 3 se tienen en cuenta factores reales como la resistencia de amortiguación de los interruptores, resistencia interna de los interruptores y la resistencia del diodo, elementos que permiten ser parametrizados por cada uno de los bloques de SimuLink y que corresponden a pérdidas en el sistema.



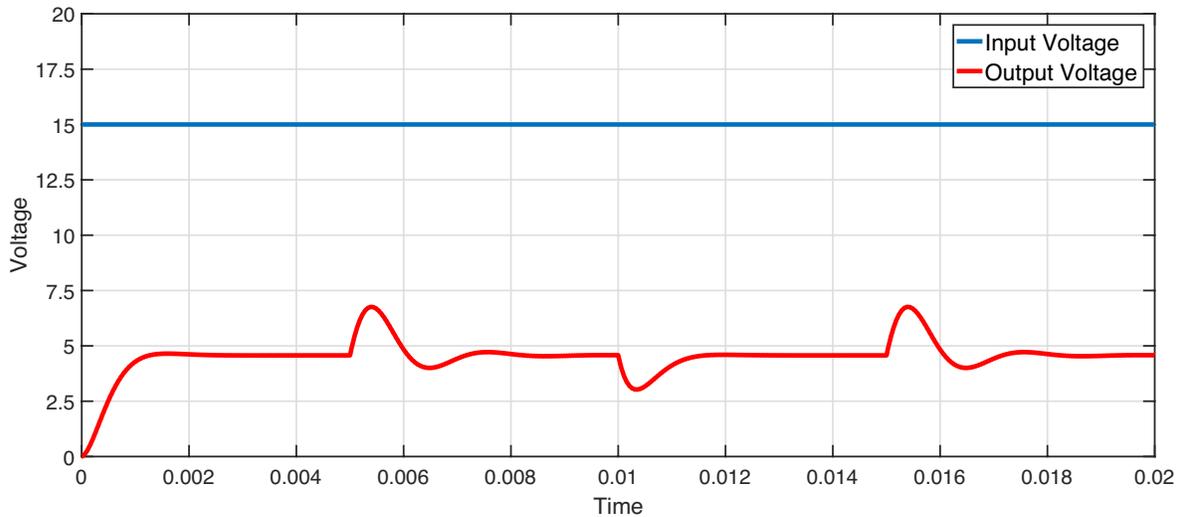
**Figura 8.** Convertor DC-DC *buck* implementado en SimuLink

**Fuente:** elaboración propia.

En la figura 10 se observan los resultados cuando se implementa el control mediante lógica difusa, usando las configuraciones que se mencionaron en las figuras 6 y 7.

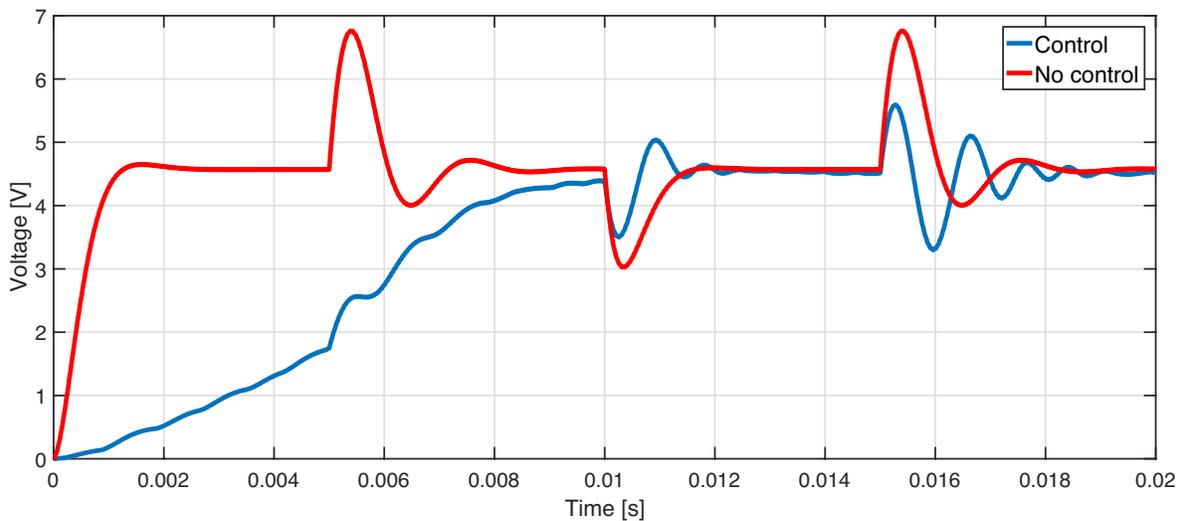
Para el modelo sin etapa de control, el circuito se sintoniza para un ciclo útil de 0.3. La figura 11 muestra el ciclo útil del sistema cuando se utiliza

*fuzzy logic* como técnica de control; el valor máximo corresponde al 0.35 y el valor mínimo evaluado en la zona de estabilidad corresponde al 0.28. La figura 12 presenta el comportamiento del error para el tiempo de simulación establecido, como se observa en la figura 11 para instantes de tiempo superior a los 15 ms el error oscila entre -1 y 1.



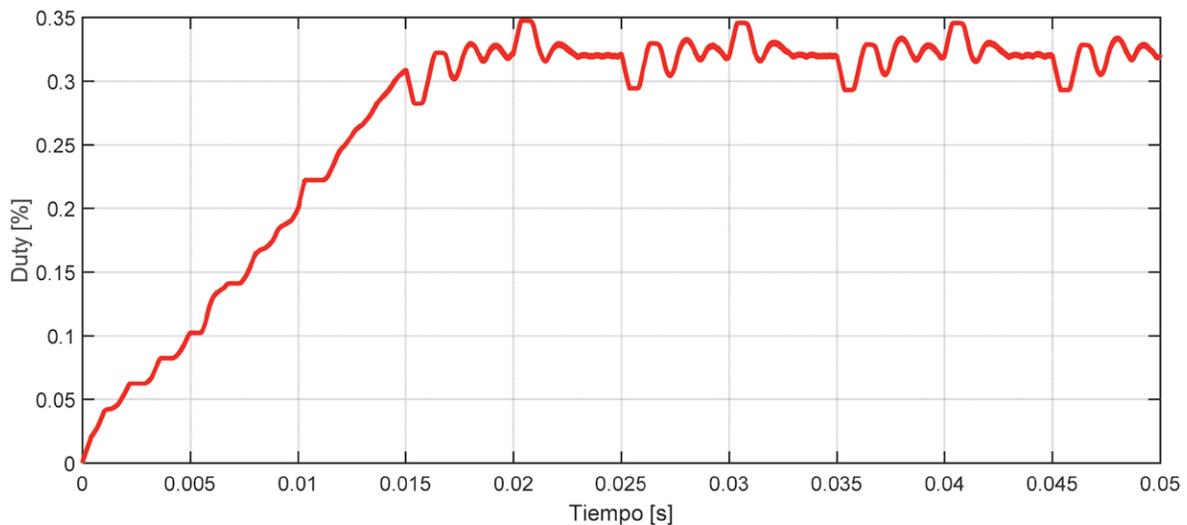
**Figura 9.** Voltaje de entrada y voltaje de salida de un convertidor *buck* sin control

**Fuente:** elaboración propia.



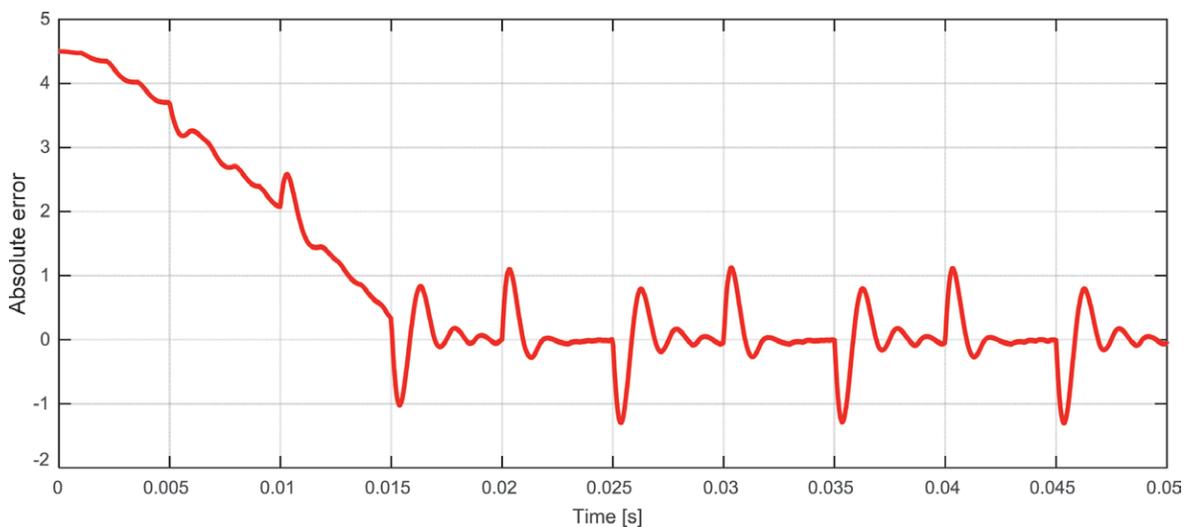
**Figura 10.** Voltaje de entrada y voltaje de salida de un convertidor *buck* utilizando el control lógico difuso

**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 11.** Ciclo útil convertidor DC-DC tipo *buck* con sistema de control basado en lógica difusa

Fuente: elaboración propia.



**Figura 12.** Error de sistema de control basado en lógica difusa para convertidor DC-DC tipo *buck*

Fuente: elaboración propia.

## CONCLUSIONES

Un convertidor tipo *buck* en modo continuo presenta una relación lineal entre la tensión de salida y la tensión de entrada mediante la constante de proporcionalidad llamada ciclo útil. Este parámetro permite realizar un control simple que permite llevar el error a cero; sin embargo, puede que

este no se acerque a cero dado la condición de cambio de energía de la inductancia. Podría plantearse una segunda salida de control utilizando la corriente de la inductancia para ajustar el ciclo útil de la misma forma, creando otra función de pertenencia en el controlador lógico difuso.

Para el modelo sin etapa de control, el circuito se sintoniza para una relación de ciclo útil de

0.3, esto indica que para una tensión de entrada de 15 V la salida correspondiente es de 5 V. La figura 11 muestra el ciclo útil del sistema cuando se utiliza lógica difusa como técnica de control, el valor máximo corresponde al 0.35 y el valor mínimo evaluado en la zona de estabilidad corresponde al 0.28, el valor esperado del ciclo útil para la relación 15V / 5V está contenido entre el valor mínimo y máximo del sistema con control, en términos de la variable de salida, indica que el convertidor con etapa de control tiene una salida entre 4.3 V y 4.6 V.

El error absoluto obtenido al restar la salida de tensión del convertidor *buck* con el valor de referencia de tensión que se desea controlar, para instantes de tiempo superior a los 15 ms oscila entre -1 y 1, esto sustenta el rango del ciclo útil obtenido.

## REFERENCIAS

- Asumadu, J.A. y Ho, E. (2004). *A Multivariable Fuzzy Logic Controller (MFLC) for a Buck DC-DC converter*. Power Electronics Specialists Conference. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual. Recuperado de: <http://doi.org/10.1109/PESC.2004.1355141>
- Collin, A.J. (2013). *Advanced load modelling for power system studies*.
- Dash, S.S. y Nayak, B. (s.f.). Control Analysis and Experimental Verification of a Practical DC-DC Boost Converter. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jesit.2015.08.001>
- Elmas, C.; Deperlioglu, O. y Sayan, H.H. (2009). Adaptive Fuzzy Logic Controller for DC-DC Converters. *Expert Systems with Applications*, 36(2), 1540–1548. Recuperado de: <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2007.11.029>
- Govindaraj, T. y Rasila, R. (2010). Development of Fuzzy Logic Controller for DC-DC Buck Converters. *International Journal of Engineering Techsci*, 2(2), 192–198.
- Gupta, T.; Boudreaux, R.R.; Nelms, R.M. y Hung, J.Y. (1997). Implementation of a Fuzzy Controller for DC-DC Converters Using an Inexpensive 8-b Microcontroller. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*. <http://doi.org/10.1109/41.633467>
- Mattavelli, P.; Rossetto, L.; Spiazzi, G. y Tenti, P. (1997). General-Purpose Fuzzy Controller for DC-DC Converters. *Power Electronics, IEEE Transactions on*. <http://doi.org/10.1109/63.554172>
- Maussion, P. y Hissel, D. (1998). Optimized Fuzzy Logic Controller Parameters for Open-Loop Stable or Evolutive Electromechanical Systems. *Industrial Electronics Society, 1998. IECON '98. Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE*. <http://doi.org/10.1109/IECON.1998.723938>
- Patin, N. (2015). 2-DC/AC Converters BT-Power Electronics Applied to Industrial Systems and Transports. Vol. 2 (pp. 35–100). Elsevier. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/B978-1-78548-001-0.50002-2>
- Ramot, D.; Friedman, M.; Langholz, G. y Kandel, A. (2003). Complex fuzzy logic. *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on*. <http://doi.org/10.1109/TFUZZ.2003.814832>
- Rashid, M.H.; González, M.H.R.V. y Fernández, P.A.S. (2004). *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones*. Pearson Educación.
- Siano, P. y Citro, C. (2014). Designing Fuzzy Logic Controllers for DC-DC Converters Using Multi-Objective Particle Swarm Optimization. *Electric Power Systems Research*, 112, 74–83. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2014.03.010>
- Vindhya, V. y Reddy, V. (2013). *PID-Fuzzy Logic Hybrid Controller for a Digitally Controlled DC-DC Converter*. Green Computing, Communication and Conservation of Energy (ICGCE), 2013 International Conference on. <http://doi.org/10.1109/ICGCE.2013.6823461>





## Implementación de algoritmos basados en máquinas de soporte vectorial (SVM) para sistemas eléctricos: revisión de tema

### Implementation of algorithms based on support vector machine (SVM) for electric systems: topic review

Jefferson Jara Estupiñan<sup>1</sup>, Diego Giral<sup>2</sup>, Fernando Martínez Santa<sup>3</sup>

**Fecha de recepción:** 10 de enero de 2016

**Fecha de aceptación:** 15 de febrero de 2016

**Cómo citar:** Jara Estupiñan, J., Giral, D., & Martínez Santa, F. (2016). Implementación de algoritmos basados en máquinas de soporte vectorial (SVM) para sistemas eléctricos: revisión de tema. *Revista Tecnura*, 20(48), 149-170. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.2.a11

#### Resumen

**Objetivo:** Realizar una revisión sobre la implementación de algoritmos basados en máquinas de soporte vectorial para sistemas eléctricos.

**Método:** Se realiza una búsqueda de artículos principalmente en Índices bibliográficos (IB) y Bases Bibliográficas con Comité de Selección (BBCS) acerca de las máquinas de soporte vectorial.

Este trabajo presenta una descripción cualitativa y/o cuantitativa acerca de los avances y aplicaciones en el entorno eléctrico, abordando temas como: predicción del mercado eléctrico, predicción de la demanda, pérdidas no técnicas de electricidad (hurto), energías alternativas, transformadores, entre otros; en cada trabajo se realiza la respectiva citación con el fin de garantizar los derechos de autor y permitirle al lector el movimiento dinámico entre lo consignado en este trabajo y los trabajos citados.

**Resultados:** Se realiza la revisión de una manera detallada, centrando la búsqueda en algoritmos

implementados en sistemas eléctricos y en áreas de aplicación novedosas.

**Conclusión:** Las máquinas de soporte vectorial tienen bastantes aplicaciones debido a sus múltiples beneficios, sin embargo en el área de energía eléctrica, estas no se han aplicado en su totalidad, esto permite identificar un área prometedora de trabajos de investigación.

**Palabras clave:** Algoritmos, aprendizaje de máquina, máquinas de soporte vectorial, electricidad.

#### Abstract

**Objective:** To perform a review of implementation of algorithms based on support vector machine applied to electric systems.

**Method:** A paper search is done mainly on Bibliographic Indexes (BI) and Bibliographic Bases with Selection Committee (BBSC) about support vector machine. This work shows a qualitative and/or quantitative description about advances and applications

1 Estudiante de tecnología en electricidad. Universidad Distrital Francisco José De Caldas, Bogotá, Colombia. Contacto: [jjarae@correo.udistrital.edu.co](mailto:jjarae@correo.udistrital.edu.co)

2 Ingeniero eléctrico, Magister en Ingeniería Eléctrica. Docente Universidad Distrital Francisco José De Caldas, Bogotá, Colombia. Contacto: [dagiralr@udistrital.edu.co](mailto:dagiralr@udistrital.edu.co)

3 Ingeniero electrónico, magíster en Ingeniería Electrónica y de Computadores. Docente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Contacto: [fmartinezs@udistrital.edu.co](mailto:fmartinezs@udistrital.edu.co).

in the electrical environment, approaching topics such as: electrical market prediction, demand prediction, non-technical losses (theft), alternative energy source and transformers, among others, in each work the respective citation is done in order to guarantee the copy right and allow to the reader a dynamic movement between the reading and the cited works.

**Results:** A detailed review is done, focused on the searching of implemented algorithms in electric systems and innovating application areas.

**Conclusion:** Support vector machines have a lot of applications due to their multiple benefits, however in the electric energy area; they have not been totally applied, this allow to identify a promising area of researching.

**Keywords:** Algorithms, machine learning, support vector machines, electricity.

## INTRODUCCIÓN

Actualmente la inteligencia artificial ha tomado una gran fuerza y aceptación a nivel tanto industrial como residencial, debido a que muchas de sus aplicaciones ayudan o apoyan al ser humano en sus actividades diarias tanto las cotidianas como laborales; algunas aplicaciones de la inteligencia artificial son : Lingüística computacional ,Minería de datos (Data Mining), Industriales, Medicina, Mundos virtuales, Procesamiento (Natural Language Processing), Robótica, Mecatrónica, Sistemas de apoyo a la decisión, Videojuegos, Prototipos informáticos y Análisis de sistemas dinámicos, entre otros.

Basada en algoritmos de computación , lógica y matemática ; es una herramienta tan densa y útil ,que ha sido clasificada en varios campos , en este artículo el de interés sera las machine learning o (máquinas de aprendizaje) las cuales son una rama de la inteligencia artificial , y tienen como objeto el desarrollo de técnicas y procesos que permitan que una computadora o un algoritmo computacional sea capaz de aprender ; dicho de otra manera que sea capaz de generalizar una idea a partir de ejemplos que le son suministrados ; y así lograr predecir , clasificar y pronosticar; el comportamiento de un sistema.

En 1959, Arthur L. Samuel define el aprendizaje de máquina como un “campo de estudio que da a

las computadoras la capacidad de aprender sin ser programada de forma explícita “; su entrenamiento con bases de datos y ejemplos adecuados, ayuda a la máquina de aprendizaje a ser más precisa y eficiente en su labor , son sumamente utilices debido a su capacidad de aprendizaje; lo cual genera que en ocasiones encuentre soluciones que no se habían programado en el sistema, es decir que el sistema de datos puede ser variable y aun así, si la máquina de aprendizaje tuvo un buen entrenamiento será capaz de analizar, predecir y solucionar el problema que se le presente.

Son tan variadas y versátiles sus aplicaciones que lo encontramos incluso en el simple hecho de ver una película online, como es el caso de la plataforma virtual Netflix la cual utiliza el aprendizaje automático para dar a sus usuarios sugerencias de las películas que posiblemente le interesen, basándose en las programadas anteriormente.

Otra de las aplicaciones más renombradas del aprendizaje automático, son los automóviles no tripulados de google, los cuales basan parte de su funcionamiento en esta rama de la inteligencia artificial.

Las máquinas de aprendizaje se clasifican según su enfoque, de la siguiente manera:

1. Árboles de decisiones
2. Reglas de asociación
3. Algoritmos genéticos
4. Redes neurales artificiales

5. Máquinas de vectores de soporte
6. Algoritmos de agrupamiento
7. Redes bayesianas

Algunas de las más utilizadas a nivel mundial serán descritas brevemente a continuación:

**Árboles de decisiones:** Son un modelo de predicción el cual a partir de una serie de datos puede categorizar y representar una serie de condiciones sucesivas, para la resolución de un problema en particular. Son herramientas excelentes para ayudar a realizar elecciones adecuadas entre muchas posibilidades. Su estructura permite seleccionar una y otra vez diferentes opciones para explorar las diferentes alternativas posibles de decisión.

Los árboles de decisión generalmente son binarios, es decir que cuentan con dos opciones, aunque esto no significa que no puedan existir árboles de tres o más opciones.

Su representación está dada en forma de árbol como su nombre lo indica seguido varios nodos cuadrados los cuales representan los puntos de decisión, de los cuales se emergen ramas las cuales representan las diferentes posibilidades o alternativas.

**Reglas de asociación:** Las reglas de asociación son utilizadas para predicción en procesos en los cuales una condición final depende de otras anteriores, es decir qué serie de cosas deben suceder para que una condición X se cumpla a cabalidad.

*'La ventaja de los algoritmos de reglas de asociación sobre los algoritmos más estándar de árboles de decisión (C5.0 y Árbol C&R) es que las asociaciones pueden existir entre cualquiera de los atributos. Un algoritmo de árbol de decisión generará reglas con una única conclusión, mientras que los algoritmos de asociación tratan de buscar muchas reglas, cada una de las cuales puede tener una conclusión diferente.'* ( IBM Knowledge Center)

Es bastante utilizada en el área de marketing en cuanto a las compras de los consumidores como por ejemplo la persona que compra el producto Y, tiene una alta probabilidad de adquirir de igual manera el producto Z; de esta manera el propietario

del establecimiento decide que productos deben estar a una distancia menor del otro, con el fin de aumentar sus ventas.

Es también utilizado en varios procesos industriales en los cuales se pretende predecir qué sucederá a partir de una serie de acciones anteriores.

**Redes neuronales artificiales:** Este sistema lo que busca es simular el cerebro humano, las redes neuronales cuentan con elementos que asemejan una neurona biológica, los cuales procesan la información y son capaces de aprender de la experiencia, generalizar de ejemplos previos a ejemplos nuevos y abstraer la información más importante de una base de datos; siendo así de gran utilidad en múltiples procesos en los cuales se tenga una serie de datos óptimos para la utilización en la red neuronal artificial.

Algunas de sus aplicaciones son:

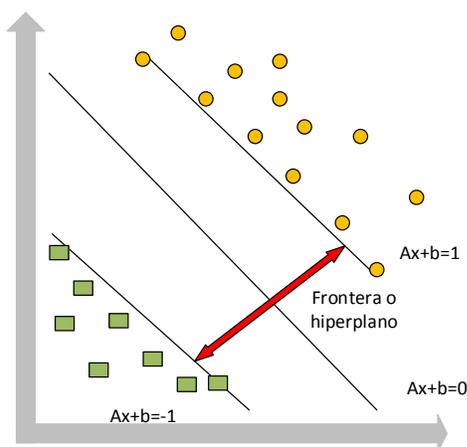
1. Reconocimiento de textos manuscritos
2. Reconocimiento del habla
3. Simulación de centrales de producción de energía
4. Detección de explosivos
5. Identificación de blancos de radares
6. En sistemas de energía eléctrica (varios campos).

Siendo de nuestro interés las máquinas de soporte vectorial del inglés support vector machine (SVM) pertenecientes a las máquinas de aprendizaje y contenidas en la inteligencia artificial, específicamente en el área de electricidad.

La energía eléctrica a través del tiempo se ha convertido en una parte muy importante de la vida cotidiana y día tras día aumenta dicha importancia, debido a que la mayoría del tiempo se interactúa directa o indirectamente con ella. Hoy la electricidad está presente tanto en un teléfono móvil como en las más altas tecnologías en el área de medicina; se ha hecho tan necesaria que es difícil el pensar en un solo día sin ella en nuestra vida moderna. Por esta razón, constantemente se utilizan nuevos métodos y tecnologías aplicadas a diferentes ramas de la energía, como mercado

eléctrico, calidad de potencia, análisis de pérdidas, entre otras, con el fin de mejorar u optimizar procesos o sistemas específicos. Muchos de estos métodos se basan en algoritmos bioinspirados o de inteligencia, como redes neuronales, algoritmos genéticos, filtros de Kalman y máquinas de soporte vectorial (SVM), entre otros. En el presente artículo se hace una recopilación de diferentes implementaciones de máquinas de soporte vectorial aplicadas a diferentes áreas de la electricidad.

La máquina de soporte vectorial, está basada en algoritmos que aprenden a partir de una serie de datos o muestras estocásticas de algún sistema a clasificar y en otras ocasiones, a predecir su comportamiento en un futuro, ya sea a corto, mediano o largo plazo (Betancour, 2005). Su alto nivel de clasificación traza un plano que divide (*frontera de decisión*, la cual debe ser lo más amplia posible) y clasifica los diferentes datos que se le han dado al algoritmo; si los datos no pueden ser clasificados de esta manera y en la frontera entre las clasificación quedan datos por clasificar, la SMV está en la capacidad de llevar los datos a un plano en  $R^n$  y buscar un hiperplano que divida y clasifique de manera correcta los datos. Este hiperplano crea una frontera lo más amplia posible entre los datos a clasificar (Betancour, 2005) como se ve en la figura 1.



**Figura 1.** Frontera o hiperplano entre los datos a clasificar

**Fuente:** Betancour (2005).

La SVM basa su funcionamiento en un espacio de hipótesis de funciones; el cambio de dimensión es inducido por un kernel que, básicamente, cumple la función de elevar a una mayor dimensión las características dadas (Resendiz, 2006), una de las maneras más comunes en que las SVM aprenden es mapeando las entradas  $X$  y pasándolas a un espacio de características, en el cual son mucho más sencillas de clasificar.

Para ampliar la información acerca de los principios matemáticos básicos de las SVM, se recomienda al lector direccionarse a los textos guías en el tema de este artículo como son: Betancour (2005); Resendiz (2006); Yucheng y Yubin (2010); Goddard, Gerardo, Silva y Ángel (2000); Luo, Hall, Goldgof y Remsen (2005); Qu, Oussar, Dreyfus y Xu (2009). Cabe aclarar que el procedimiento anteriormente descrito no es el único utilizado en las SVM; por el contrario, en cada una de las investigaciones el procedimiento y herramientas matemáticas para ello pueden cambiar parcial o totalmente.

De este poder de clasificación, de su facilidad de aprender y, por tanto, predecir acciones o sucesos, es que las SVM están siendo altamente utilizadas en los sistemas eléctricos, algunas aplicaciones serán mencionadas a continuación.

## PREDICCIÓN DEL MERCADO ELÉCTRICO

El mercado eléctrico es uno de los más variables ya que casi a diario el costo de la electricidad fluctúa, abriendo todo un campo de investigación con el fin de lograr predecir qué comportamiento tendrá el mercado, a corto, mediano o largo plazo, según se necesite.

En Italia (2007) se plantea que algunos de los factores que se estudian para la caracterización del mercado son: la carga, el tipo de día y la hora. Gao, Bompard, Napoli y Cheng (2007) los llaman los *insumos para el modelo flexible de previsión (RVS)*, y plantean que existen básicamente dos métodos para analizar el mercado eléctrico: un análisis completo y detallado, y otro que tiene su base

en modelos matemáticos como las SVM que tratan de asociar y determinar una relación entre las entradas que se le dan al sistema (conocidas) y el costo de la electricidad. Sugieren, además, una serie de acciones y ecuaciones con las cuales logran predecir el costo, minimizando el margen de error y apoyándose en las SVM. La predicción de precios a corto plazo es algo compleja, puesto los datos son muy cambiantes, y hay variaciones muy drásticas en el costo de la energía. En la figura 2 se expone esta diferencia en el mercado italiano, a diferentes niveles de carga partiendo de la carga máxima (F1) y terminando en la carga base (F4).

A largo plazo Gao, Bompard, Napoli y Cheng (2007) utilizan las variaciones de oferta y demanda y el índice de concentración del mercado; en su investigación plantean no hacer la predicción en un momento específico sino algo más general. Por último, comparan y analizan las divergencias entre los diferentes métodos matemáticos utilizados para la predicción de mercado dando como conclusión que las SVM son útiles en este proceso, pero generan un error más alto en comparación con otros métodos.

La predicción del mercado eléctrico es una de las aplicaciones más estudiadas y practicadas

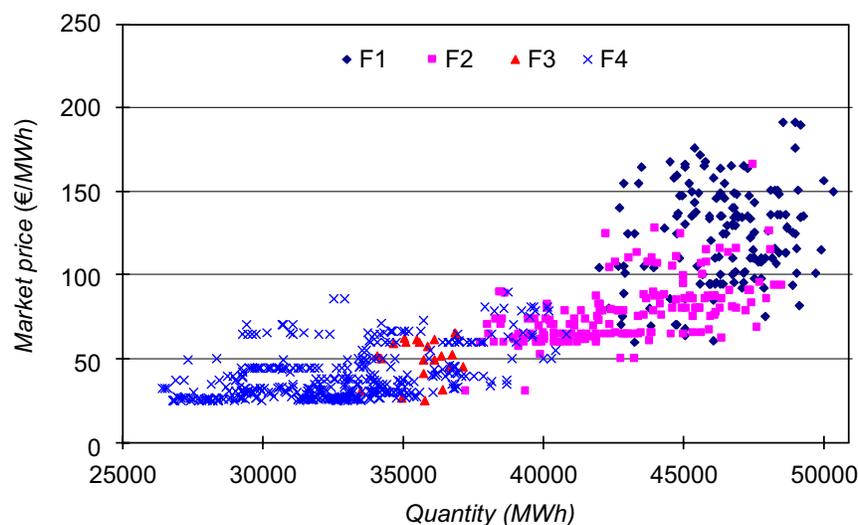
a partir de las SVM a nivel mundial, por ello en la tabla 1 se resumen los trabajos encontrados respecto al tema, con el fin de no incurrir en un tema tan estudiado y permitiéndole al lector redirigirse a estos trabajos si así lo desea.

## PREDICCIÓN DE LA DEMANDA Y CONSUMO DE ELECTRICIDAD

La demanda de electricidad es un tema bastante relevante, ya que con base en ella los generadores diseñan y planean su participación en el mercado; además de ser uno de los estudios que permite tener una mayor confiabilidad en el sistema eléctrico ayudando con uno de los principales retos del sistema: satisfacer de manera correcta y en su totalidad la demanda energética (Osman, Awad y Mahmoud, 2009).

Este es otro de los ámbitos en los cuales más se ha implementado el método de las SVM, por ende se representan en la tabla 2 los trabajos más relevantes encontrados en la investigación y recolección de información.

## CALIDAD DE POTENCIA ELÉCTRICA



**Figura 2.** Variación del precio de la energía en las diferentes clasificaciones en el mercado italiano

**Fuente:** Gao, Bompard, Napoli y Cheng (2007).

**Tabla 1.** Trabajos o investigaciones en el mercado eléctrico usando SVM

Fecha de publicación	Título del artículo o investigación	Nombre de los autores	Referencia bibliográfica
2009	Support vector machines (SVM) based short term electricity load-price forecasting	Swief, R. a. Hegazy, Y. G. Abdel-Salam, T. S. Bader, M.a	(Swief, Hegazy, Abdel-Salam, & Bader, 2009)
2009	Electricity Price Forecasting Based on Support Vector Machine Trained by Genetic Algorithm	Yan-Gao, Chen Yan-Gao Chen Guangwen, Ma Guangwen Ma	(Yan-Gao & Guangwen, 2009)
2010	Short-term electricity prices forecasting based on support vector regression and Auto-regressive integrated moving average modeling	Che, Jinxing Wang, Jianzhou	(Che & Wang, 2010)
2011	Day-ahead electricity price forecasting based on rolling time series and least square-support vector machine model	Zhang, Jianhua Han, Jian Wang, Rui Hou, Guolian	(Zhang, Han, Wang, & Hou, 2011)
2013	Mid-term Electricity Market Clearing Price Forecasting Using Multiple Support Vector Machine	Yan, Xing Chowdhury, Nurul A	(Yan & Chowdhury, 2013)
2014	Forecasting energy markets using support vector machines	Papadimitriou, Theophilos Gogas, Periklis Stathakis, Efthimios	(Papadimitriou, Gogas, & Stathakis, 2014)
2014	Prediction interval Estimation for Electricity Price and Demand using Support Vector Machines	Shrivastava, Nitin Anand Khosravi, Abbas Panigrahi, Bijaya Ketan Memeber, Senior	(Shrivastava, Khosravi, Panigrahi, & Memeber, 2014)
2015	Prediction Interval Estimation of Electricity Prices using PSO tuned Support Vector Machines	Shrivastava, Nitin Anand Khosravi, Abbas Panigrahi, Bijaya Ketan	(Shrivastava, Khosravi, & Panigrahi, 2015)
2015	Electricity Price Forecasting Using Support Vector Machines by Considering Oil and Natural Gas Price Impacts	Ali Shiriz, Mohammad Afsharx, Ashkan Rahimi-Kianz y Behrouz Mahamz	(Ali Shiriz, Mohammad Afsharx & zSNL/CIPCE, School of Electrical and Computer Engineering, 2015)
2016	Support Vector Machines for decision support in electricity markets' strategic bidding	Pinto, Tiago Sousa, Tiago M. Praca, Isabel Vale, Zita Morais, Hugo	(Pinto, Sousa, Pra??a, Vale, & Morais, 2016)

**Fuente:** elaboración propia

Uno de los factores más importantes es precisamente la calidad de energía, ya que las consecuencias de una mala calidad pueden ser: sobretensiones, inmersión (caída), distorsiones armónicas, interrupciones, el parpadeo, etc. Esto representa perturbaciones en el buen funcionamiento de los equipos del cliente o usuario final (Siahkali, 2008).

Dos de las técnicas más comunes en el procesamiento de las señales eléctricas, son la transformada de Fourier y de *wavelet*, utilizadas para filtrar ruidos. Zhu (2005), en su investigación plantea la unión de la transformada de *wavelet* y la SVM, en un solo sistema de detección y clasificación de perturbaciones en una red de energía eléctrica, los resultados son plasmados en la tabla 3.

**Tabla 2.** Trabajos o investigaciones en la predicción de la demanda y consumo de electricidad usando SVM

Fecha de publicación	Título del artículo o investigación	Nombre de los autores	Referencia bibliográfica
2006	Support Vector Machines with PSO Algorithm for Short-Term Load Forecasting	Sun, Changyin Gong, Dengcai	(Sun & Gong, 2006)
2007	Applying support vector machine method to forecast electricity consumption	Yang, Shu Xia Wang, Yi	(Yang & Wang, 2007)
2008	with Least Squares Support Vector Machines	Wang, Yi Yu, Songqing	(Wang & Yu, 2008)
2011	Modeling and prediction of Turkey's electricity consumption using Support Vector Regression	Kavaklioglu, Kadir	(Kavaklioglu, 2011)
2011	Electrical load forecasting using support vector machines	Turkay, B E Demren, D	(Turkay & Demren, 2011)
2013	Demand elasticity analysis by least squares support vector machine	Xie, Li Zheng, Hua	(Xie & Zheng, 2013)

**Tabla 3.** Resultados de la clasificación basada en *wavelets* y FSVM

Tipo de perturbaciones PQ	Numero de perturbaciones	Número de casos en que se identificó correctamente	Número de casos en que falló la identificación	Identificación correcta (%)
Caída	1000	984	16	
Elevación	1000	990	10	
Interrupción	1000	980	20	
Armónico	1000	996	4	
Transitorio	1000	991	9	
Impulso	1000	974	26	
Parpadeo	1000	967	33	
Muesca	1000	960	40	
Suma	8000	7842	158	98

Fuente: Zhu (2005)

En esta investigación inicialmente utilizaron las ondas *spline* trigonométricas para eliminar el ruido de las señales, con el propósito de poder clasificar las perturbaciones más comunes expuestas en la tabla anterior.

Zhang, Chen, Liu y Zhao (2008) plantean una estrategia global para el correcto análisis de la red, para lo cual se generó la tabla 4 en la que se establecen los índices, los valores entre los que pueden variar y su clasificación dependiendo el caso.

**Tabla 4.** PQ índices y clasificación uniforme

Desviación de la tensión (%)	La fluctuación de voltaje (%)	Severidad del parpadeo a corto plazo (%)	Severidad del parpadeo largo plazo (%)	Total de distorsión armónica THD (%)	Desequilibrio de tensión trifásica (%)	La desviación de frecuencia (Hz)	Resultados de la clasificación	Nivel de PQ
≤2	≤0.6	<0.16	≤0.12	<0.4	≤0.4	<0.04	1	excelente
(2,4]	(0.6,1.2]	(0.16,0.32]	(0.12,0.24]	(0.4,0.8]	(0.4,0.8]	(0.04,0.08]	0,9	mejor
(4,6]	(1.2,1.8]	(0.32,0.48]	(0.24,0.36]	(0.8,1.2]	(0.8,1.2]	(0.08,0.12]	0,8	bueno
(6,8]	(1.8,2.4]	(0.48,0.64]	(0.36,0.48]	(1.2,1.6]	(1.2,1.6]	(0.12,0.16]	0,7	inferior a la buena
(8,10]	(2.4,3]	(0.64,0.8]	(0.48,0.6]	(1.6,2]	(1.6,2]	(0.16,0.2]	0,6	media
(10,14]	(3,4.2]	(0.8,1.12]	(0.6,0.84]	(2,2.8]	(2,2.8]	(0.2,0.28]	0,5	moderadamente mala
(14,18]	(4.2,5.4]	(1.12,1.44]	(0.84,1.08]	(2.8,3.6]	(2.8,3.6]	(0.28,0.36]	0,4	malo
(18,22]	(5.4,6.6]	(1.44,1.76]	(1.08,1.32]	(3.6,4.4]	(3.6,4.4]	(0.36,0.44]	0,3	peor
≥22	≥6.6	≥1.76	≥1.32	≥4.4	≥4.4	≥0.44	0,2	peor

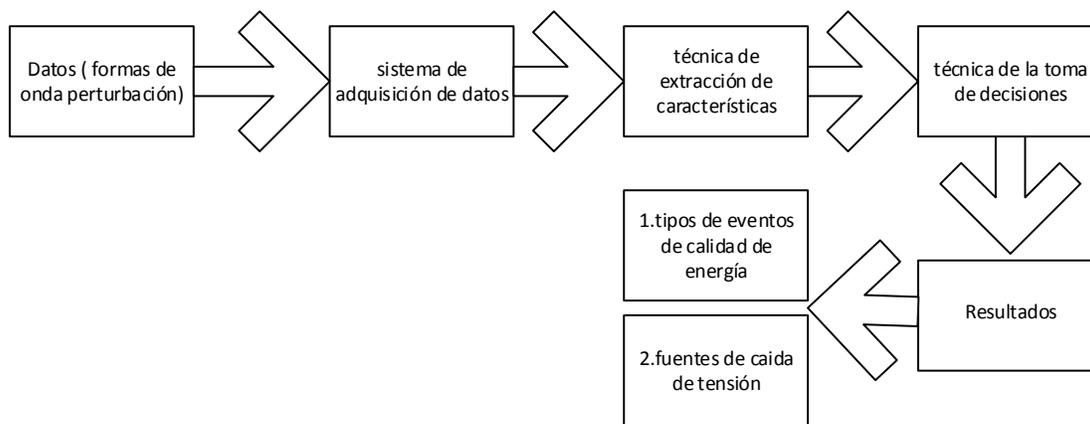
Fuente: Zhang *et al.* (2008)

El propósito de su trabajo es mostrar una estrategia de evaluación de calidad de potencia de sistemas eléctricos, basada en el método de lastre integrado y la SVM.

Un año más tarde, Susukh, Premrudeepreechacharn y Kasirawat (2009) desarrollan una investigación con el fin de utilizar las SVM para clasificar los tipos de perturbaciones eléctricas. Para ello hacen pruebas con las SVM, y los datos de una red de 22 KV de Tailandia Chiang Mai; utilizan un total de 450 señales de los diferentes tipos de perturbaciones, las cuales son pasadas a través de

la SVM ejecutada por medio de *MATLAB*, Lo que arroja como resultado que la SVM es capaz de clasificar las perturbaciones eléctricas las cuales en su trabajo sustentan son de cuatro tipos: interrupciones momentáneas, caídas de tensión, sobretensiones y muescas de tensión; con un 90 % de efectividad.

En Malasia se utilizaron las SVM con el fin de identificar las causas de las caídas de tensión en las redes de distribución (Faisal y Mohamed, 2009); la red está conectada a un sistema de monitorio continuo, con el fin de supervisarla continuamente.



**Figura 3.** Flujo de proceso para la nueva técnica

Fuente: Faisal y Mohamed (2009).

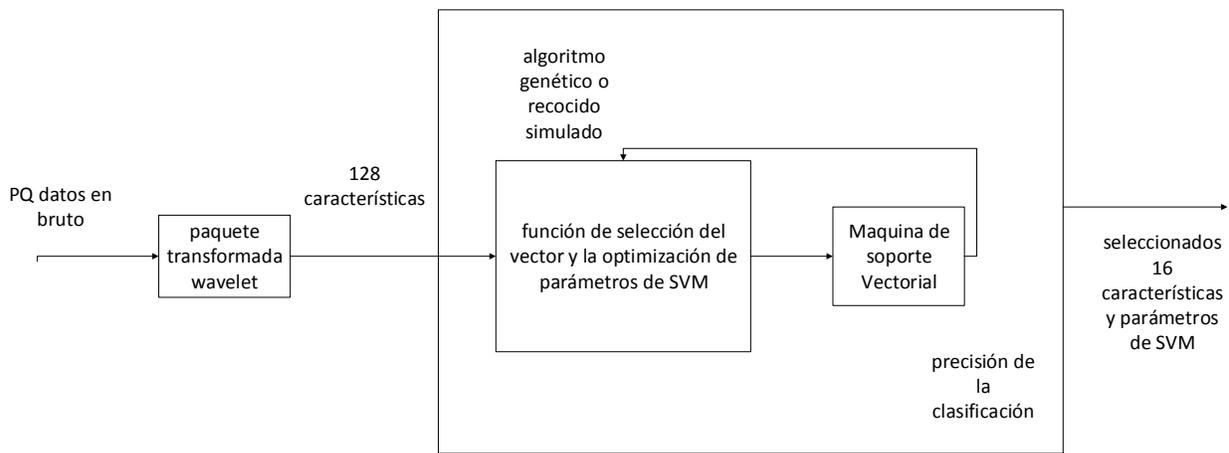
El sistema lleva el nombre de PQMS, y es acoplado a la SVM (figura 3).

Después de probar la SVM como medio para identificar las causas de las caídas de tensión, concluyen que el método es 100 % efectivo.

La transformada de *wavelet*, Manimala, Selvi y Ahila (2012), en su investigación, la combinan junto con una SVM, con el fin de mejorar la calidad de energía de un sistema (Manimala, Selvi y Ahila, 2012), el marco de su modelo está representado en la figura 4.

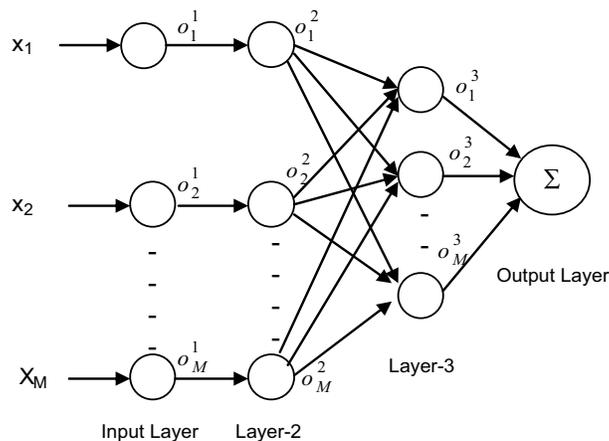
Al implementarlo y crear las fallas desde el sistema SimuLink de *MATLAB*, Manimala, Selvi y Ahila (2012) concluyen que la utilización la SVM mejora la precisión en la clasificación.

En 2013 Biswal, Biswal, Dash y Mishra publican una investigación, la cual tiene el objetivo de utilizar una SVM de cuatro etapas (figura 5), combinada con la *TT-transform* para detectar, localizar y clasificar perturbaciones en redes de energía eléctrica.



**Figura 4.** Marco del modelo propuesto

**Fuente:** (Manimala, Selvi y Ahila (2012)).



**Figura 5.** La red de soporte vectorial de cuatro capas (SVM)

**Fuente:** Biswal, Biswal, Dash y Mishra (2013).

## PÉRDIDAS NO TÉCNICAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA

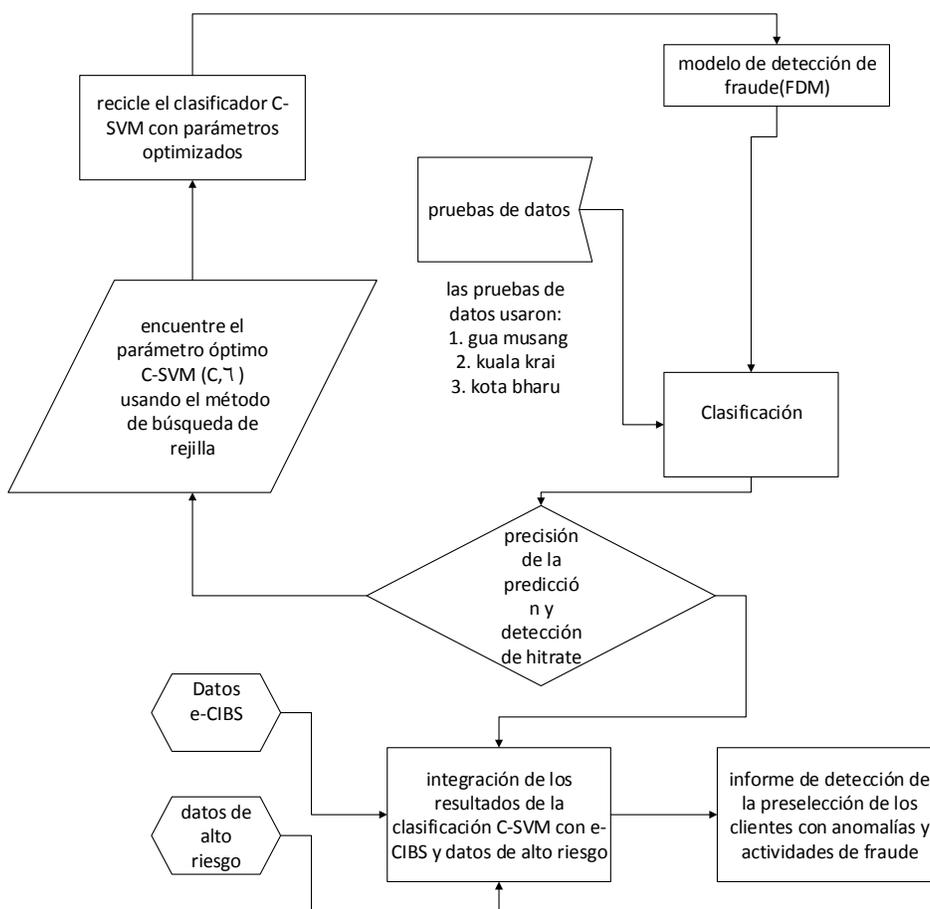
Nagi *et al.* (2010) plantean la utilización de SVM con el fin de minimizar las pérdidas no técnicas en Malasia, específicamente la empresa afectada es Tenaga Nasional Berhad (TNB) Sdn, puesto que las pérdidas por robo de energía y otros factores en 2004 ascendieron hasta US\$ 229 millones al año. Luego de clasificar los datos, dieron prioridad a aquellos que estaban más completos, y con mayor variación de consumo o con cambios fuertes en este.

La metodología que utilizaron para la detección de posibles clientes con fraude, se puede observar en la figura 6.

Un año más tarde, Shekara, Reddy, Wang y Devabhaktuni (2011) muestran que las pérdidas de energía en sus procesos de generación, transmisión y distribución son muy altos; el problema que plantean es que en generación se puede calcular de cuánto es la pérdida, pero en transmisión y distribución es más complejo.

Clasifican los clientes según su consumo mensual y su uso (residencial, comercial y agrícola), desarrollan su algoritmo de predicción con la SVM y concluyen que en una próxima investigación complementarán su modelo con un controlador inteligente.

Luego en 2015 en India utilizan una SVM acompañada de otros métodos de predicción y detección, para identificar posibles clientes fraudulentos,



**Figura 6.** Diagrama de flujo del motor de validación FDM para la detección de presuntos clientes (clientes con anomalías y actividades de fraude)

Fuente: Nagi *et al.* (2010).

la SVM es un apoyo al algoritmo general (Dangar y Joshi, 2015). Un año más tarde, Jokar, Arianpoo y Leung (2015) desarrollan un algoritmo donde se incluyen las SVM, cumpliendo estas una función de detectar anomalías en el perfil del cliente y es apoyo en el proceso general, que se basa en las pérdidas en el nivel de transformación.

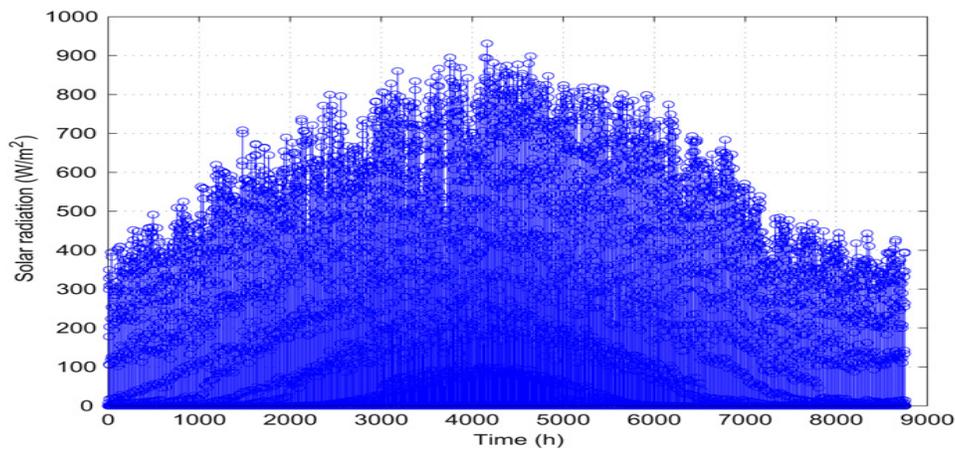
## ENERGÍAS ALTERNATIVAS

Actualmente las energías alternativas o limpias están tomando una gran fuerza debido al fenómeno

del calentamiento global provocado por gases que son derivados de procesos industriales, entre ellos la generación de energía por combustibles fósiles o derivados. Se ha trabajado directa o indirectamente en ellas con las SVM como se verá a continuación.

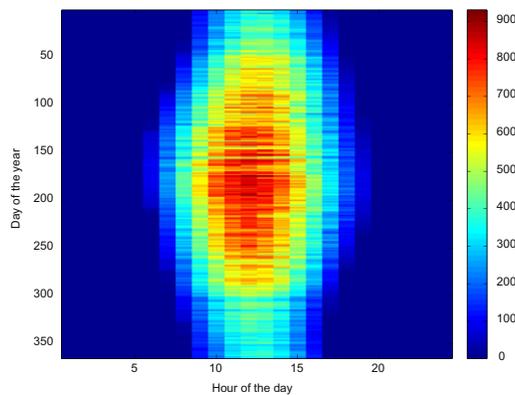
## Eólica

Pinto, Ramos, Sousa y Vale (2014), en su trabajo muestran la utilización de las SVM, para predecir la velocidad del viento a corto plazo, la información para ello fue tomada de la base de datos del



**Figura 7.** Datos de radiación solar por hora en un gráfico de tiempo 1D.

**Fuente:** Zeng y Qiao (2013).



**Figura 8.** Una vista de la imagen 2D de los datos de radiación solar

**Fuente:** Zeng y Qiao (2013).

Laboratorio Nacional de Energía Renovable ([http://www.nre1.gov/midc/nwtc\\_m2](http://www.nre1.gov/midc/nwtc_m2)). Luego de desarrollar su algoritmo utilizando *MATLAB* para este fin, logran comprobar que el rendimiento de la SVM es mucho mejor que otros métodos anteriormente usados para el mismo propósito, como las redes neuronales.

De igual manera, Kong, Liu, Shi y Lee (2015) desarrollan un algoritmo para predecir la velocidad del viento con una SVM de regresión de datos (RSVM), apoyada en métodos de selección de datos denominados PCA y PSO.

### Solar o fotovoltaica

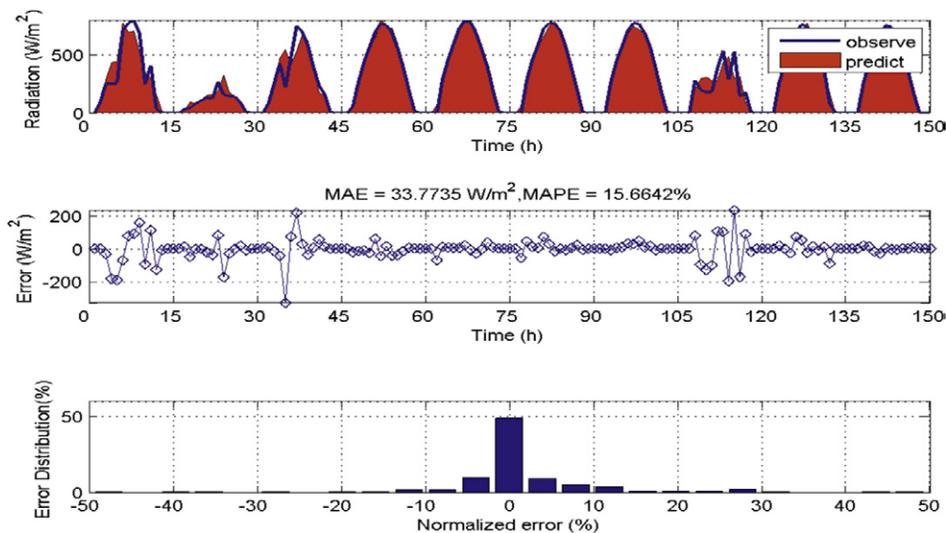
Es de vital importancia conocer el índice de radiación solar, para su aprovechamiento como energía, por esto Zeng y Qiao (2013) en su investigación plantean la implementación de SVM y la utilización de la base de datos de radiación solar (NSRDB) de Estados Unidos, la cual contiene datos desde 1991 a 2005 en diferentes regiones del país, los datos son tratados en una dimensión (figura 7) y en dos dimensiones (figura 8) con el fin de analizarlos mejor.

Luego de utilizar los datos descritos anteriormente Zeng y Qiao (2013) dan a conocer una serie de gráficos de las predicciones de la SVM en dos ciudades distintas: Denver y Seattle, una de ellas descrita en la figura 9.

Al comparar los resultados con la SVM con los de otros métodos utilizados para la misma tarea, Zeng y Qiao (2013) concluyen que la SVM tiene un rendimiento mucho mejor debido a su manejo especial de los datos.

Liu *et al.* (2012) realizan una investigación acerca de los colectores solares cilindro-parabólicos con el fin de utilizar una SVM para su modelamiento y optimización, tomando como datos para la investigación dos sistemas de 30 y 600 metros cuadrados de campo solar en China.

La SVM fue utilizada en la planta de 600 m<sup>2</sup>, en la que se emplearon datos de entrada como: flujo solar, temperatura de entrada y de salida. La eficiencia del colector fue la salida de la SVM. Liu *et al.* (2012) concluyen su trabajo diciendo que la SVM basándose en los resultados, es muy acertada en cuanto al modelo y a la optimización de los colectores cilindro-parabólicos, ya que son parte fundamental del sistema de generación solar.



**Figura 9.** La predicción de una hora en Denver utilizando SVM

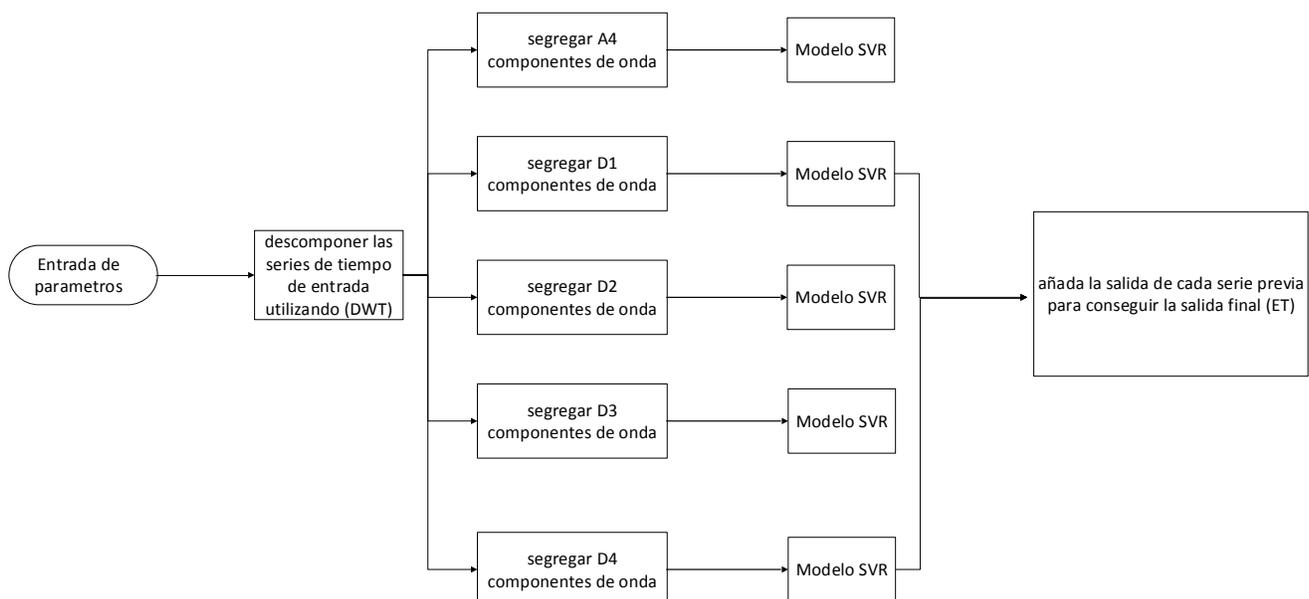
**Fuente:** Zeng y Qiao (2013).

Se estima que la capacidad instalada de generación fotovoltaica global es de alrededor de 138,9 GW, y lo más factible es que siga aumentando; por ello Antonanzas *et al.* (2015) en su investigación, plantean la utilización de SVM con el fin de estimar la irradiación solar globalmente, tomando como lugar de estudio España. Luego de las pruebas en 14 estaciones meteorológicas del país, el resultado fue que la SVM es sumamente eficiente y más precisa, ya que el error más alto generado en el estudio fue de 7,38 % en comparación con los otros métodos y modelos.

En otros trabajos se plantea una metodología combinada, en la cual se incluye tanto la SVM como la transformada de *wavelet* (WT) para predecir la radiación solar. Este método ha sido denominado como SVM-WT en la investigación de Mohammadi *et al.* (2015), su modelo está basado en que los datos utilizados son fácilmente medibles y, en general, están disponibles en todo lugar,

evitando así marginar a las zonas más atrasadas tecnológicamente; algunos de ellos son: latitud, altitud, temperatura ambiente, nubosidad, etc. Los datos utilizados pertenecen al puerto de Bandar Abass, en Irán, el método de clasificación de datos para la SVM se aprecia en la figura 10.

En su investigación, Mohammadi *et al.* (2015) hacen varios estudios, uno de ellos es la estimación global de la radiación diaria, para la cual hacen una comparación con otros métodos y modelos utilizados para ello como: “la red neuronal artificial (ANN), la programación genética (GP) y autorregresivo media móvil (ARMA)”. Y los índices de comparación son cinco: error medio porcentual absoluto (MAPE), media de error de desviación absoluto (MABE), error medio cuadrático (RMSE), la raíz cuadrada del anterior (RRMSE) y por último el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), arrojando como resultado lo consignado en la tabla 5.



**Figura 10.** Diagrama de flujo del método de determinación de parámetros basada en ondas propuesto para el clasificador SVM.

**Fuente:** Mohammadi *et al.* (2015).

**Tabla 5.** Parámetros estadísticos obtenidos para los modelos SVM-WT híbridos desarrollados, así como los modelos ANN, GP y ARMA para el análisis diario.

Modelo	MAPE	MABE	RMSE	RRMSE	R 2
SVM-WT (1)	155.954	21.150	26.475	147.692	0.6844
SVM-WT (2)	155.306	21.463	26.911	150.125	0.6880
SVM-WT (3)	69.996	0.8405	14.245	79.467	0.9086
ANN (1)	171.042	22.039	28.519	159.095	0.6339
ANN (2)	164.115	22.071	27.776	154.950	0.6527
ANN (3)	93.080	0.9395	18.415	102.729	0.8649
GP (1)	171.882	22.159	28.417	158.526	0.6364
GP (2)	163.904	22.073	27.811	155.145	0.6518
GP (3)	93.233	0.9473	18.494	103.170	0.8622
ARMA (1)	173.239	22.172	28.549	159.262	0.6341
ARMA (2)	161.091	22.294	27.975	156.060	0.6527
ARMA (3)	94.033	0.9668	18.804	104.899	0.8573

Fuente: Mohammadi *et al.* (2015).

De esta manera se comprueba que el modelo SVM-WT tiene un buen desempeño en comparación de los otros métodos y representa una herramienta útil y precisa para dicho estudio. Un año más tarde, Shamshirband *et al.* (2016) realizan una investigación con este mismo método en la ciudad de Kerman en el mismo país, para estimar la radiación solar difusa, obteniendo resultados similares en cuanto a la efectividad y utilidad del método.

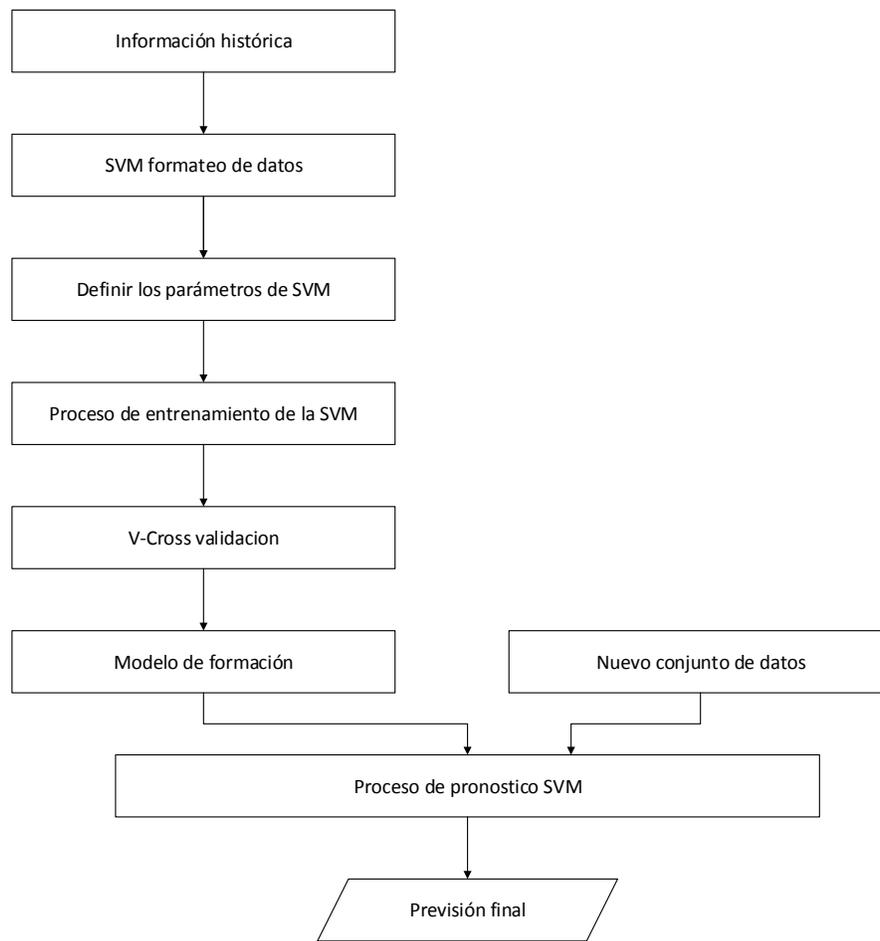
## PIEZOELÉCTRICOS

Ma, Zhang, Xu y Xie (2013) presentan un modelo combinando la SVM con el modelo de Preisach para representar la histéresis y los diferentes efectos dinámicos del piezoeléctrico, algo que con el modelo de Preisach era complicado, pues este necesitaba gran cantidad de datos que no eran de fácil adquisición. El actuador piezoeléctrico utilizado en esta investigación es un PTBS200 (de forma apilada), el cual tiene como límites de saturación -30V y +150V, la prueba es realizada inyectándole

una señal cuadrada con los límites ya mencionados y comparándola con resultados experimentales y calculados con el método de Preisach, lo cual arrojó como resultado el buen desempeño del modelo desarrollado en la investigación “La comparación entre la salida del modelo híbrido y los datos experimentales produjo un error medio FSR de 1,03% y un error máximo de 2,37%”.

## VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

La introducción de vehículos eléctricos en el mercado plantea una alternativa para la contaminación global actual, como también un reto para pronosticar la demanda de energía que se necesitará para satisfacer esta nueva tecnología, con el fin de minimizar problemas en la red de energía eléctrica. Por ello, Xydas *et al.* (2013) plantean un modelo basado en SVM con el fin de pronosticar esta demanda a corto plazo en el Reino Unido; el diagrama de flujo que describe este modelo se puede observar en la figura 11.



**Figura 11.** Flujo de operación del modelo SVM

**Fuente:** Xydas *et al.* (2013).

Luego de realizar las pruebas con la SVM, Xydas *et al.* (2013) comparan los resultados con el método Monte Carlo, los cuales son muy positivos para la SVM ya que tiene una mayor sensibilidad a los cambios y, por tanto, su error es menor.

Un elemento esencial en esta tecnología con la baterías almacenadoras de energía, por lo cual se hace necesario el predecir su funcionamiento y prevenir posibles fallos en las mismas. Klass, Behm y Lindbergh (2014) plantean la utilización de SVM en baterías de ion de litio; las características de estas son descritas en la tabla 6. Las pruebas son denominadas SOH (pruebas de rendimiento estándar), luego de realizar las pruebas y simulaciones virtuales se encuentra que la SVM es de gran

utilidad ya que sus salidas son bastante acertadas y no se necesita de equipo adicional para realizar el estudio.

**Tabla 6.** Especificaciones de las células de las baterías de iones de litio probadas

Capacidad nominal Q nom	17,5 Ah
Tensión máxima T max	4.1 V
Tensión mínima de U min	2,5 V
Corriente continua máxima I máx	35 A
electrodo positivo	óxido mixto
electrodo negativo	de carbono duro
Dimensiones	253 × 172 × 5,8 mm

**Fuente:** Klass, Behm y Lindbergh (2014).

## TRANSFORMADORES

El transformador es uno de los elementos más importantes y costoso en el proceso de distribución eléctrica; su buen funcionamiento es esencial para garantizar la prestación del servicio eléctrico a los usuarios conectados a él. Por lo general, el esfuerzo eléctrico y térmico al que está expuesto un transformador es la principal causa de daño o fallo en este; en algunos casos se deteriora el aislante, generando así la liberación de gases tóxicos a la atmósfera. Uno de los métodos para la predicción de fallos más utilizado se denomina método de análisis de gas disuelto (DGA). En su investigación, Zhu, Zhao, Zhai y Zhang (2007) plantean la utilización de SVM para analizar los datos del DGA, con el fin

de predecir comportamientos futuros del transformador; se toma como prueba uno de 110 kV en la provincia de Jiangsu de 1990 a 1995, asumiendo así los datos hasta 1993 como entrenamiento de la SVM y los de 1994-1995 de prueba de esta.

En las tablas 7 y 8 se pueden apreciar los datos utilizados y los resultados con los mismos respectivamente, obteniendo como conclusión que la SVM es útil en la predicción de comportamientos futuros de transformadores y sus resultados son mucho más eficientes que los obtenidos con otros métodos tradicionales. Más adelante, Mehta (2013) utiliza los datos DGA para pronosticar los fallos en los transformadores utilizando un algoritmo distinto pero obteniendo resultados semejantes en cuanto a su eficacia se refiere.

**Tabla 7.** La DGA datos del transformador de energía

Año	$H_2$	$CH_4$	$C_2H_6$	$C_2H_4$	$C_2H_2$	CO	CO <sub>2</sub>
1990	18.37	24.20	3.40	2.71	0	120.1	500
1991	19.42	24.70	3.80	2.89	0	154.3	678
1992	27.30	25.40	3.70	2.52	0	178.0	681
1993	22.40	22.30	3.50	2.64	0	220	750
1994	23.70	23.50	3.70	2.95	0	256	738
1995	24.80	23.80	3.64	2.70	0	2.86	788

Fuente: Zhu, Zhao, Zhai y Zhang (2007).

**Tabla 8.** Resultados experimentales utilizando el modelo SVM

Ítem	1995 Actual	1995 Prueba	Error $\delta$ (%)
$H_2$	24.80	24.21	2.38
$CH_4$	23.80	23.20	2.52
$C_2H_6$	3.64	3.62	0.55
$C_2H_4$	2.70	2.76	-2,22
$C_2H_2$	0	0	0
CO	286	284	0.70
CO <sub>2</sub>	788	778	1.27

Fuente: Zhu, Zhao, Zhai y Zhang (2007).

Loizos (2009) utiliza la SVM con el fin de predecir las pérdidas en los transformadores (por lo general en el núcleo y en el cobre) puesto que una reducción

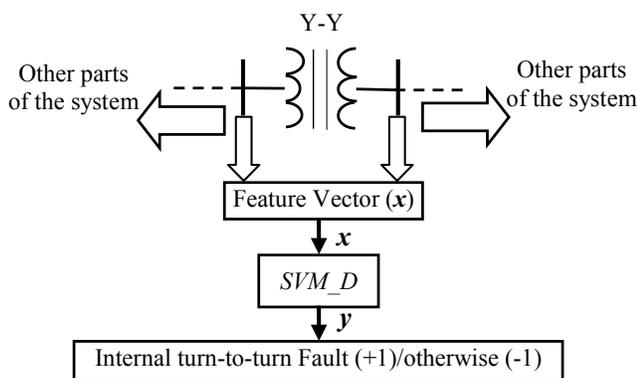
en ellas puede generar un gran beneficio económico para la empresa. En la tabla 9 se aprecian las variables de entrada y de salida del algoritmo.

**Tabla 9.** Las variables de entrada

Las variables de entrada	
Variable	Unidad
peso del núcleo	kg
Voltaje aplicado	kV
Las corrientes de fase (A, B, C)	UN
Fase de corriente media	UN
HiB o CGO	Sin unidades-1 o 0
Variables de salida	
Las pérdidas de potencia del núcleo	kW

Fuente: Loizos (2009).

Por otro lado, Elsamahy y Babiy (2012) utilizan SVM con el fin de ayudar a detectar fallas en el aislamiento interno del transformador en situaciones tan reducidas, como el daño entre una vuelta y otra del embobinado; estos fallos son detectables solo cuando hay comprometido (en cortocircuito) un 10 % del devanado. El esquema utilizado para la detección de fallos con la SVM se presenta en la figura 12, luego de realizar las pruebas encuentran que la SVM es capaz de predecir los fallos de una vuelta a otra, además de discriminar los fallos externos, teniendo un rendimiento del 96,2 %.



**Figura 12.** Diagrama de bloques del esquema basado en SVM

**Fuente:** Elsamahy y Babiy (2012).

La predicción es un papel importante, al igual que el conocer el estado de salud del aislamiento en el transformador. Por ello, Ashkezari, Ma, Saha y Ekanayake (2013) desarrollan una investigación con el fin de utilizar una SVM en este proceso, acoplándola con datos obtenidos de varias pruebas hechas a los transformadores, para así mejorar el diagnóstico de la salud del aislamiento (papel/aceite). Las pruebas se realizan con los datos de un estudio DGA en 181 transformadores en servicio, lo que arroja como resultado que el acoplamiento de la SVM en este proceso es de gran utilidad para mejorar el nivel del pronóstico de la salud en los transformadores en servicio.

## OTRAS APLICACIONES

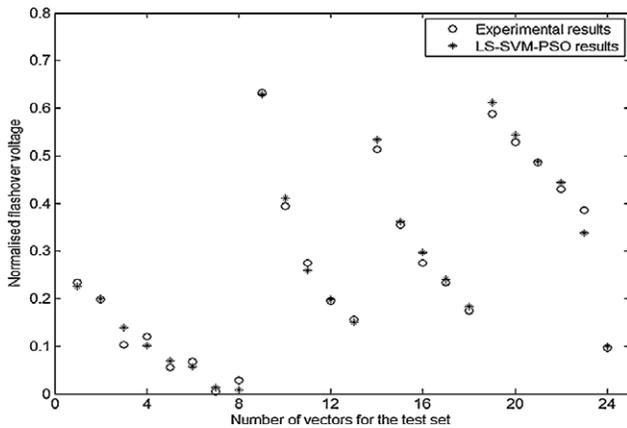
### Reles

La principal función de un relé inteligente es el de desconectar un equipo cuando las condiciones eléctricas para este no sean las apropiadas, pero en algunos casos muy especiales no se reconoce si se encuentra en medio de un fallo o de una condición normal del sistema. Para mejorar su precisión en la detección de fallos, Zhang, Ilic y Tonguz (2007) plantean la utilización de SVM, uno de los resultados es que esta es capaz de detectar la falla cuando esta se encuentra en medio de la red de transmisión, algo que el relé no era capaz de diferenciar. Realizaron simulaciones en *MATLAB* para la clasificación los datos; los *software* para las pruebas fueron *Matpower* y *LIBSVM*. Los autores concluyen que la utilización de SVM es viable para esta aplicación con base en los resultados obtenidos.

### Aisladores

Bessedik y Hadi (2013) sugieren el uso de SVM combinada con otros modelos (mínimos cuadrados y optimización de enjambre de partículas) para predecir la tensión de descarga de dichos modelos, en diferentes condiciones ambientales. Las pruebas para ello se realizaron en el Laboratorio de Alta Tensión de la Compañía Nacional de Electricidad.

Los resultados de las pruebas se pueden observar en la figura 13. Por otro lado, comparan los resultados entre los dos métodos planteados en este trabajo (LS-SVM-PSO y LS-SVM-GS) con otros métodos utilizados regularmente para lo mismo; plantean tres casos, los cuales se diferencian en la manera de adquirir los datos y procesarlos, y encuentran que su método es más preciso en la predicción del flameo de los aisladores.



**Figura 13.** La comparación entre los datos experimentales y los valores estimados para el conjunto de prueba

**Fuente:** Bessedik y Hadi (2013).

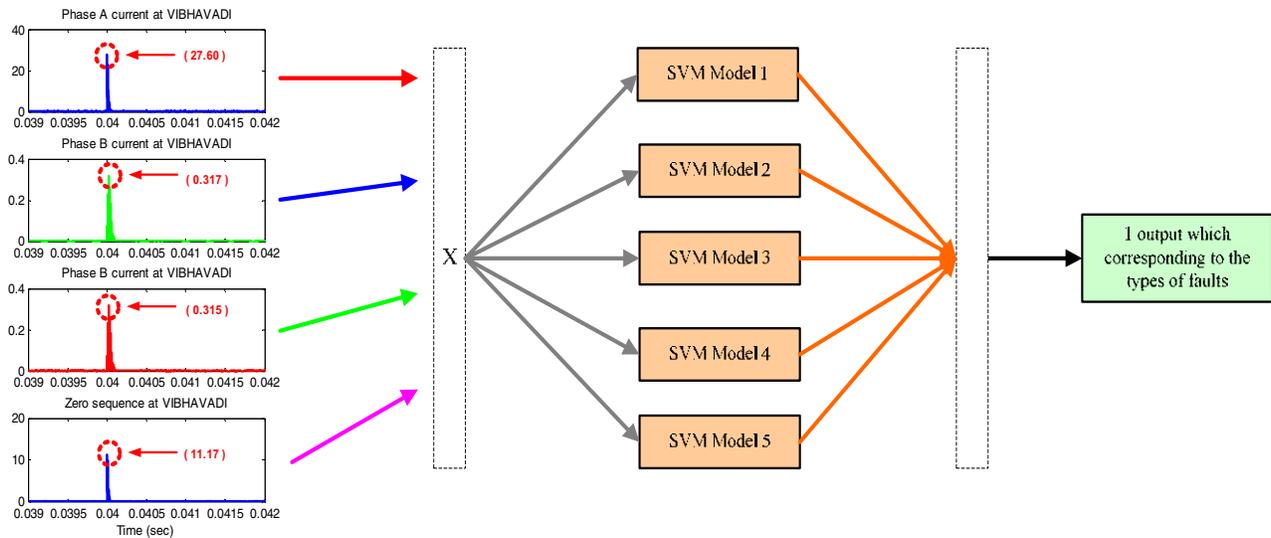
### Interruptores de alta tensión

En busca de predecir la vida mecánica de los aisladores en alta tensión y así evitar interrupciones en el sistema de energía eléctrica, Zhang, Huang y Yao (2015) plantean la utilización de SVM, para lo

cual tienen en cuenta dos variables principales: la curva de desplazamiento mecánico del aislador y la curva de la corriente de apertura de la bobina; en conclusión, la SVM es de gran utilidad puesto que los aisladores durante su vida útil solo trabajan unas pocas veces, lo cual reduce los datos relacionados a las fallas por las que trabajaron y la SVM generaliza muy bien los pocos datos que le son suministrados.

### Fallas en cables subterráneos

Ngaopitakkul, Pothisarn, Bunjongjit y Suechoey (2012) desarrollan un método basado en SVM y la transformada de wavelet (utilizada para descomponer las señales de las fallas a alta frecuencia) con el fin de clasificar los fallos en los cables de distribución subterránea. Para ello simulan señales de fallo a una velocidad de 200 kHz, suponen la resistencia de fallo como 10Ω. En la figura 14 se puede observar la estructura de la SVM para clasificar los tipos de fallo en este tipo de cables, obteniendo resultados muy buenos en cuanto a la detección de la falla.



**Figura 14.** Estructura de SVM para clasificar tipos de fallo

**Fuente:** Ngaopitakkul, Pothisarn, Bunjongjit y Suechoey (2012).

## CONCLUSIONES:

En este artículo se presentó una revisión de trabajos realizados con base en las SVM's, con el fin de generar un apoyo para futuros trabajos en el mismo campo.

Las SVM's son una herramienta que tomo una gran fuerza y participación en todos los campos de la ciencia, debido a: los buenos resultados obtenidos en estudios realizados; son de una gran versatilidad en sus aplicaciones y en la mayoría de los casos presentan una exactitud mayor en los resultados en contraste con otros métodos.

Una de las características más relevantes de las SVM's es que pueden ser utilizadas en cualquier ámbito sin necesidad de que tengan conocimientos previos del mismo, siempre y cuando se tengan datos con los cuales entrenarla.

Los algoritmos SVM's han sido y están siendo altamente utilizados en sistemas eléctricos más específicamente en la predicción de demanda, predicción de consumo, y en la predicción de hurto de energía; actualmente están siendo utilizadas en otros campos como las energías alternativas, planteando una posibilidad para futuros estudios en esta y otras ramas poco exploradas con las SVM's.

La SVM puede utilizarse para contemplar casos en los que: Existe ruido en las muestras de entrenamiento; Los datos tienen cierto grado de solapamiento entre clases, puede ser extendido al caso no lineal. Al ser una herramienta que no ha sido utilizada en varios temas a nivel eléctrico, se genera un nicho de investigación futura.

## REFERENCIAS

- Ali Shiriz, Mohammad Afsharx, A. R.-K. and B. M., & zSNL/CIPCE, School of Electrical and Computer Engineering, C. of E. (2015). Electricity Price Forecasting Using Support Vector Machines by Considering Oil and Natural Gas Price Impacts, 2–6.
- Antonanzas, F.; Urraca, R.; Antonanzas, J.; Fernandez, J. y Martinez-de-Pison, F.J. (2015). Generation of Daily Global Solar Irradiation with Support Vector Machines for Regression. *Energy Conversion and Management*, 96, 277–286. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.02.086>
- Ashkezari, A.D.; Ma, H.; Saha, T.K. y Ekanayake, C. (2013). Application of Fuzzy Support Vector Machine for Determining the Health Index of the Insulation System of In-Service Power Transformers. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 20(3), 965–973. <http://doi.org/10.1109/TDEI.2013.6518966>
- Bessedik, S.A. y Hadi, H. (2013). Prediction of Flashover Voltage of Insulators Using Least Squares Support Vector Machine with Particle Swarm Optimisation. *Electric Power Systems Research*, 104, 87–92. <http://doi.org/10.1016/j.epsr.2013.06.013>
- Betancour, G. (2005). Las máquinas de soporte vectorial (SVM). *Scientia Et Technica*, 27, 67–72.
- Biswal, B.; Biswal, M.K.; Dash, P.K. y Mishra, S. (2013). Power Quality Event Characterization Using Support Vector Machine and Optimization Using Advanced Immune Algorithm. *Neurocomputing*, 103, 75–86. <http://doi.org/10.1016/j.neucom.2012.08.031>
- Che, J. y Wang, J. (2010). Short-Term Electricity Prices Forecasting Based on Support Vector Regression and Auto-Regressive Integrated Moving Average Modeling. *Energy Conversion and Management*, 51(10), 1911–1917. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.02.023>
- Dangar, B. y Joshi, S.K. (2015). Electricity Theft Detection Techniques for Metered Power Consumer in Guvnl, Gujarat, India. *2015 Clemson University Power Systems Conference (PSC)* (pp. 1–6). Clemson. <http://doi.org/10.1109/PSC.2015.7101683>
- Elsamahy, M. y Babiy, M. (2012). An Intelligent Approach Using SVM to Enhance Turn-To-Turn Fault Detection in Power Transformers. *2012 IEEE Electrical Power and Energy Conference* (pp. 255-260). Londres. <http://doi.org/10.1109/EPEC.2012.6474961>
- Faisal, M.F. y Mohamed, A. (2009). Identification of Sources of Voltage Sags in the Malaysian Distribution Networks Using SVM Based S-Transform. *TENCON 2009–2009 IEEE Region 10 Conference*

- (pp. 1–6). Singapur. <http://doi.org/10.1109/TENCON.2009.5395940>
- Gao, C.; Bompard, E.; Napoli, R. y Cheng, H. (2007). Price Forecast in the Competitive Electricity Market by Support Vector Machine. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 382(1), 98–113. <http://doi.org/10.1016/j.physa.2007.03.050>
- Goddard, J.; Silva, G.; Pérez, R. y Ángel M. (2000). Un algoritmo para el entrenamiento de máquinas de vector soporte para regresión. *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones 2000*, 7(1-2), 107–116.
- Jokar, P.; Arianpoo, N. y Leung, V.C.M. (2015). Electricity Theft Detection in AMI Using Customers' Consumption Patterns. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(1), 216–226. <http://doi.org/10.1109/TSG.2015.2425222>
- Kavaklioglu, K. (2011). Modeling and Prediction of Turkey's Electricity Consumption Using Support Vector Regression. *Applied Energy*, 88(1), 368–375. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.07.021>
- Klass, V.; Behm, M. y Lindbergh, G. (2014). A Support Vector Machine-Based State-Of-Health Estimation Method for Lithium-Ion Batteries Under Electric Vehicle Operation. *Journal of Power Sources*, 270, 262–272. <http://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.07.116>
- Kong, X.; Liu, X.; Shi, R. y Lee, K.Y. (2015). Wind Speed Prediction Using Reduced Support Vector Machines with Feature Selection. *Neurocomputing*, 169, 449–456. <http://doi.org/10.1016/j.neucom.2014.09.090>
- Liu, Q.; Yang, M.; Lei, J.; Jin, H.; Gao, Z. y Wang, Y. (2012). Modeling and Optimizing Parabolic Trough Solar Collector Systems Using the Least Squares Support Vector Machine Method. *Solar Energy*, 86(7), 1973–1980. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2012.01.026>
- Loizos, G. y Passadis, K. (2009). Core Power Losses Estimation of Wound Core Distribution Transformers with Support Vector Machines. *16th International Conference on Systems, Signals and Image Processing* (pp. 1-4). Chalkida.
- Luo, T.; Hall, L.O.; Goldgof, D.B. y Remsen, A. (2005). Bit Reduction Support Vector Machine. *Proceedings—IEEE International Conference on Data Mining, ICDM*, 733–736. <http://doi.org/10.1109/ICDM.2005.36>
- Ma, Y.; Zhang, X.; Xu, M. y Xie, S. (2013). Hybrid Model Based on Preisach and Support Vector Machine for Novel Dual-Stack Piezoelectric Actuator. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 34(1-2), 156–172. <http://doi.org/10.1016/j.ymsp.2012.05.015>
- Manimala, K.; Selvi, K. y Ahila, R. (2012). Optimization Techniques for Improving Power Quality Data Mining Using Wavelet Packet Based Support Vector Machine. *Neurocomputing*, 77(1), 36–47. <http://doi.org/10.1016/j.neucom.2011.08.010>
- Mehta, A.K.; Sharma, R.N.; Chauhan, S. y Saho, S. (2013). Transformer Diagnostics under Dissolved Gas Analysis Using Support Vector Machine. *Power, Energy and Control (ICPEC), 2013 International Conference* (pp. 181–186). Dindigul.
- Mohammadi, K.; Shamsirband, S.; Tong, C.W.; Arif, M.; Petković, D. y Sudheer, C. (2015). A New Hybrid Support Vector Machine-Wavelet Transform Approach for Estimation of Horizontal Global Solar Radiation. *Energy Conversion and Management*, 92, 162–171. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.12.050>
- Nagi, J.; Yap, K.S.; Tiong, S.K.; Ahmed, S.K. y Mohamad, M. (2010). Nontechnical Loss Detection for Metered Customers in Power Utility Using Support Vector Machines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25(2), 1162–1171. <http://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2030890>
- Ngaopitakkul, A.; Pothisarn, C.; Bunjongjit, S. y Suechoey, B. (2012). An Application of Discrete Wavelet Transform and Support Vector Machines Algorithm for Classification of Fault Types on Underground Cable. *Proceedings—3rd International Conference on Innovations in Bio-Inspired Computing and Applications, IBICA 2012* (pp. 85–88). Kaohsiung. <http://doi.org/10.1109/IBICA.2012.21>
- Osman, Z.H.; Awad, M.L. y Mahmoud, T. K. (2009). Neural Network Based Approach for Short-Term Load Forecasting. *2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition* (pp. 1–8). Seattle. <http://doi.org/10.1109/PSCE.2009.4840035>

- Papadimitriou, T.; Gogas, P. y Stathakis, E. (2014). Forecasting Energy Markets Using Support Vector Machines. *Energy Economics* (pp. 135–142). <http://doi.org/10.1016/j.eneco.2014.03.017>
- Pinto, T.; Ramos, S.; Sousa, T.M. y Vale, Z. (2014). Short-Term Wind Speed Forecasting Using Support Vector Machines. *Computational Intelligence in Dynamic and Uncertain Environments (CIDUE), 2014 IEEE Symposium* (pp. 40–46). Orlando
- Pinto, T.; Sousa, T.M.; Praa, I.; Vale, Z. y Morais, H. (2016). Support Vector Machines for Decision Support in Electricity Markets' Strategic Bidding. *Neurocomputing*, 172, 438–445. <http://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.03.102>
- Qu, H.; Oussar, Y.; Dreyfus, G. y Xu, W. (2009). *Regularized Recurrent Least Squares Support Vector Machines*. 2009 International Joint Conference on Bioinformatics, Systems Biology and Intelligent Computing (pp. 508–511). Shanghai. <http://doi.org/10.1109/IJCBS.2009.58>
- Resendiz T., J.; Yu, W. y Li, X. (2006). Support Vector Machine for Nonlinear System On-line Identification. *2006 3rd International Conference on Electrical and Electronics Engineering* pp. 1–4. Veracruz.
- Shamshirband, S.; Mohammadi, K.; Khorasanizadeh, H.; Yee, P.L.; Lee, M.; Petković, D. y Zalnezhad, E. (2016). Estimating the Diffuse Solar Radiation Using a Coupled Support Vector Machine-Wavelet Transform Model. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 428–435. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.055>
- Shekara, S.; Reddy, S.; Wang, L. y Devabhaktuni, V. (2011). Support Vector Machine Based Data Classification for Detection of Electricity Theft. *IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition (PSCE)* (pp. 1–8). Phoenix
- Shrivastava, N.A.; Khosravi, A. y Panigrahi, B.K. (2015). Prediction Interval Estimation of Electricity Prices using PSO tuned Support Vector Machines. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 11(2), 1–1. <http://doi.org/10.1109/TII.2015.2389625>
- Shrivastava, N.A.; Khosravi, A.; Panigrahi, B.K. y Memeber, S. (2014). Prediction Interval Estimation for Electricity Price and Demand Using Support Vector Machines. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 11(2), 322–331.
- Siahkali, H. (2008). Power Quality Indexes for Continue and Discrete Disturbances in a Distribution Area. *PECon 2008–2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference*, (PECon 08) (pp. 678–683). Johor Bahru. <http://doi.org/10.1109/PECON.2008.4762561>
- Sun, C., & Gong, D. (2006). Support Vector Machines with PSO Algorithm for Short-Term Load Forecasting. *2006 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*, 676–680. <http://doi.org/10.1109/ICNSC.2006.1673227>
- Susukh, J., Premrudeepreechacharn, S., & Kasi-rawat, T. (2009). Power quality problem classification using support vector machine. *2009 6th International Conference on Electrical Engineering Electronics Computer Telecommunications and Information Technology*, 01, 2–5. <http://doi.org/10.1109/ECTICON.2009.5136965>
- Swief, R. a., Hegazy, Y. G., Abdel-Salam, T. S., & Bader, M. . (2009). Support vector machines (SVM) based short term electricity load-price forecasting. *2009 IEEE Bucharest PowerTech*, 1–5. <http://doi.org/10.1109/PTC.2009.5281886>
- Turkay, B. E., & Demren, D. (2011). Electrical load forecasting using support vector machines. *Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 2011 7th International Conference on*, 1–49–1–53.
- Wang, Y., & Yu, S. (2008). with Least Squares Support Vector Machines, (April), 714–719.
- Xie, L., & Zheng, H. (2013). Demand elasticity analysis by least squares support vector machine. *Proceedings of the 2013 6th International Congress on Image and Signal Processing, CISP 2013, 2(Cisp)*, 1085–1089. <http://doi.org/10.1109/CISP.2013.6745217>
- Xydas, E. S., Marmaras, C. E., Cipcigan, L. M., Hassan, A. S., & Jenkins, N. (2013). Forecasting Electric Vehicle charging demand using Support Vector Machines. *2013 48th International Universities' Power Engineering Conference (UPEC)*, 1–6. <http://doi.org/10.1109/UPEC.2013.6714942>
- Yan, X., & Chowdhury, N. A. (2013). Mid-term Electricity Market Clearing Price Forecasting Using Multiple

- Support Vector Machine. *2013 4th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)*, 1–5.
- Yang, S. X., & Wang, Y. (2007). Applying support vector machine method to forecast electricity consumption. *2006 International Conference on Computational Intelligence and Security, ICCIAS 2006, 1*, 929–932. <http://doi.org/10.1109/ICCIAS.2006.294275>
- Yan-Gao, C. Y.-G. C., & Guangwen, M. G. M. (2009). Electricity Price Forecasting Based on Support Vector Machine Trained by Genetic Algorithm. *2009 Third International Symposium on Intelligent Information Technology Application, 2*, 293–296. <http://doi.org/10.1109/IITA.2009.96>
- Yucheng, L. y Yubin, L. (2010). Incremental Learning Method of Least Squares Support Vector Machine. *2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, 1*, 529–532. Recuperado de: <http://doi.org/10.1109/ICICTA.2010.104>
- Zeng, J. y Qiao, W. (2013). Short-Term Solar Power Prediction Using a Support Vector Machine. *Renewable Energy, 52*, 118–127. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2012.10.009>
- Zhang, J., Han, J., Wang, R., & Hou, G. (2011). Day-ahead electricity price forecasting based on rolling time series and least square-support vector machine model. *2011 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, 1065–1070. <http://doi.org/10.1109/CCDC.2011.5968342>
- Zhang, X.; Huang, R.; Yao, S.; Li, G.; Zhong, L. y Wang, X. (2015). Mechanical Life Prognosis of High Voltage Circuit Breakers Based on Support Vector Machine. *Natural Computation (ICNC), 2015 11th International Conference* (pp. 749-753). Zhangjiajie
- Zhang, X. Z. X., Chen, X. C. X., Liu, H. L. H., & Zhao, B. Z. B. (2008). Application of integrated weight method and support vector machine in the comprehensive evaluation of power quality. *2008 Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, (20060294019)*, 2181–2186. <http://doi.org/10.1109/DRPT.2008.4523772>
- Zhang, Y.; Ilic, M. y Tonguz, O. (2007). Application of Support Vector Machine Classification to Enhanced Protection Relay Logic in Electric Power Grids. *Power Engineering, 2007 Large Engineering Systems Conference* (pp. 31-38). Recuperado de: [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=4437348](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4437348)
- Zhu, F. (2005). Classification of Power Quality Disturbances Using, (August), 18–21. <http://doi.org/10.3906/elk-1112-51>
- Guo-Sheng Hu, Jing Xie and Feng-Feng Zhu, “Classification of power quality disturbances using wavelet and fuzzy support vector machines,” *2005 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, Guangzhou, China, 2005, pp. 3981-3984 Vol. 7.
- Zhu, Y.-L.; Zhao, W.-Q.; Zhai, X.-M. y Zhang, X.-Q. (2007). A Fault Prediction Approach for Power Transformer Based on Support Vector Machine. *Wavelet Analysis and Pattern Recognition, 2007. ICWAPR '07. International Conference on, 4*, 1457–1461. <http://doi.org/10.1109/ICWAPR.2007.4421679>





## Techniques for modeling photovoltaic systems under partial shading

### Técnicas para modelar sistemas fotovoltaicos bajo sombreado parcial

Luz Adriana Trejos Grisales<sup>1</sup>, Carlos Andrés Ramos-Paja<sup>2</sup>, Andrés Julián Saavedra-Montes<sup>3</sup>

**Fecha de recepción:** 26 de agosto de 2015

**Fecha de aceptación:** 15 de febrero de 2016

**Cómo citar:** Trejos Grisales, L. A., Ramos Paja, C. A., & Saavedra Montes, A. J. (2016). Techniques for modeling photovoltaic systems under partial shading. *Revista Tecnura*, 20(48), 171-183. doi:10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.2.a12

#### Abstract

**Context:** The energy produced by photovoltaic (PV) systems operating under partial shading conditions depends on the connections between the modules and the shading pattern. Several mathematical models have been proposed to address this topic exhibiting different compromises between accuracy, calculation speed and PV model complexity. However, it is not evident how to choose a model for a given application to ensure reliable results.

**Method:** Several mathematical models of PV systems under shading conditions were analyzed to synthesize the characteristics, advantages and drawbacks of each one of them. Three main categories have been identified: analytical, simulation and experimental methods. Analytical and simulation methods require a basic PV model and mathematical analysis supported by computational tools; while experimental methods are based in data or measurements.

**Results:** From the analysis of the published solutions, three representative modeling techniques with different characteristics were selected to perform a practical comparison. Those techniques were implemented and contrasted in realistic

scenarios to identify the effects of the compromise between accuracy, calculation speed and PV model complexity.

**Conclusions:** To select a mathematical model it must be taken into account the connection scheme, model of the PV unit, model of the bypass and blocking diodes, size of the system, programming complexity and simulation time. This paper provides some guidelines to choose the right model for a particular application depending on those characteristics.

**Keywords:** Model, blocking diode, bypass diode, mismatching, photovoltaic.

#### Resumen

**Contexto:** La energía producida por un sistema fotovoltaico (PV) operando en condiciones de sombreado parcial depende de las conexiones entre sus módulos y del perfil de sombra. En la literatura existen reportados múltiples modelos matemáticos en este tópico, los cuales presentan diferentes compromisos entre precisión, velocidad de cálculo y complejidad. No obstante, no es evidente como seleccionar uno de esos modelos para obtener resultados confiables en una aplicación particular.

1 Electric Engineer, Master in Engineering, Student at doctorate in engineering in the area of automatics Universidad Nacional de Colombia. Professor at Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín, Colombia. Contact: [adrianatrejos@itm.edu.co](mailto:adrianatrejos@itm.edu.co)

2 Electronic Engineer, Master in Engineering–Automatics, Master in Electronic Engineering, Doctor in Electronic Engineering, Automatics and Communications. Associate Professor at Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Departamento de Energía Eléctrica y Automática. Medellín, Colombia. Contact: [caramosp@unal.edu.co](mailto:caramosp@unal.edu.co)

3 Electric Engineer, Master in Electric Engineering, Doctor in Electric Engineering. Associate Professor at Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Departamento de Energía Eléctrica y Automática. Medellín, Colombia. Contact: [ajsaaved@unal.edu.co](mailto:ajsaaved@unal.edu.co)

**Método:** Se analizaron múltiples modelos matemáticos de sistemas PV operando en condiciones de sombreado para sintetizar sus características, ventajas y desventajas. De ese análisis se detectaron tres categorías principales: métodos analíticos, de simulación y experimentales. Los métodos analíticos y de simulación requieren un modelo básico PV y análisis matemáticos soportados por herramientas de cómputo; en contraste los métodos experimentales se basan en datos y mediciones.

**Resultados:** A partir de los análisis de los modelos reportados, se seleccionaron tres técnicas de modelado representativas para realizar una comparación práctica. Esas técnicas se implementaron y

contrastaron en escenarios realistas para identificar los efectos del compromiso entre precisión, velocidad de cálculo y complejidad del modelo PV.

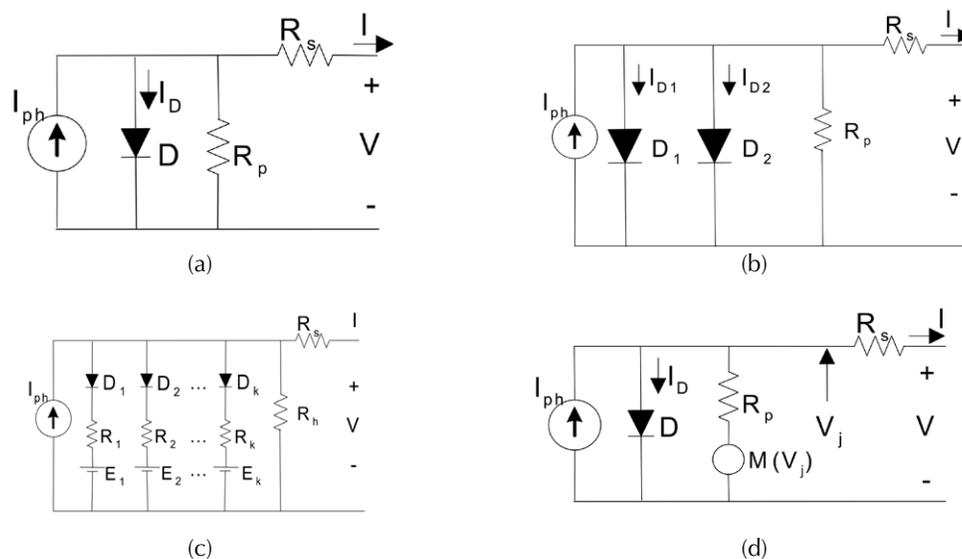
**Conclusiones:** Para seleccionar un modelo matemático se deben tener en cuenta el esquema de conexión, el modelo de la unidad PV, el modelo de los diodos de bloqueo y puente, el tamaño del sistema, la complejidad de programación y el tiempo de simulación. Este artículo provee algunas guías para seleccionar el modelo adecuado para una aplicación en particular dependiendo de esas características.

**Palabras clave:** Modelo, diodo de bloqueo, diodo puente, irregularidad, fotovoltaico.

## INTRODUCTION

Environment issues like global warming and the constant increasing prizes of fossil fuels have drawn more attention towards the usage of renewable energy sources, particularly on photovoltaic (PV) energy. Modeling PV systems is one of the most important research areas due to the need of obtaining

information about performance and energy yield prediction under different operating conditions. With the aim of represent the physical phenomenon that occurs in a PV cell, the most widely adopted approaches are the one diode model, the two diode model, the piecewise linear (PL) model, and the Bishop model (Zegaoui, Petit, & Aillerie, 2012), (Wang & Hsu, 2009a), (Bishop, 1988). Figure 1



**Figure 1.** Circuit diagrams of the most cited PV models. (a) One diode, (b) Two diode, (c) PL, (d) Bishop.

**Source:** self-authorship.

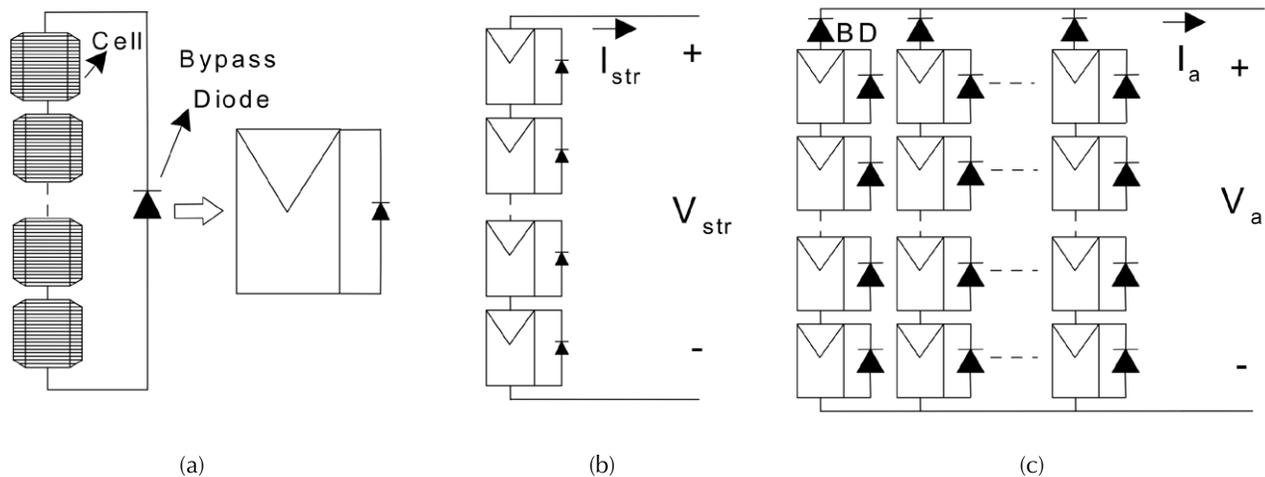
shows the circuit diagrams of such models, which have been also extended to represent PV modules, strings and arrays, it depending on the granularity of a PV system (Ji, Kim, Park, Kim, & Won, 2009), (Wang & Lin, 2011).

Figure 2 shows a graphical representation of the granularity concept. A PV module is defined as the series connection of several PV cells protected by an anti-parallel bypass diode; strings are defined as the connection of several modules in series and arrays are de-fined as the parallel connection of several strings, where each string is protected by a series blocking diode (BD in figure. 2(c)) (Said Samer, Ahmed, & Shehab, 2012), (Rathee, Khanna, & Das, 2013).

In addition to the basic photovoltaic phenomenon and the granularity of the system, the modeling of a PV array requires considering the effect of shadows on the PV system. Such a phenomenon, known as shading, is critical since the power produced by a PV system depends on the level of solar irradiance. The shadows can be produced by static objects in the neighborhood of the PV system, clouds, or inclusive by elements which fall on the PV system surface such as leaves. When series connected PV cells are under shading conditions,

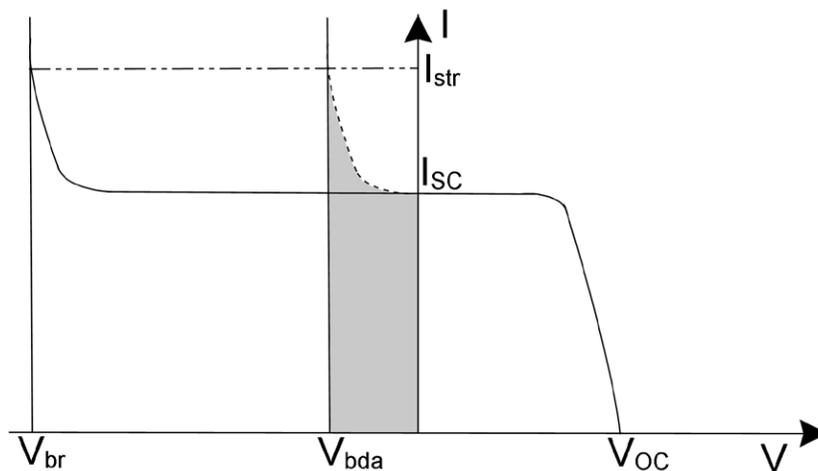
cells can experiment negative voltages due to the excess of current imposed by the cells with higher levels of irradiance, which forces the cell to consume power instead of produce it (Bishop, 1988), (Wang & Hsu, 2009b). Moreover, if the cell negative voltage increases due to the shading conditions, hot spots can appear causing aging effects on the cell; and if the cell negative voltage reaches the breakdown value, the cell can be damaged due to the fast increasing of the current (Zegaoui, et al., 2011). To avoid such detrimental effects, bypass diodes are connected in anti-parallel with a series-connection of PV cells. A bypass diode provides a path for the excess of current, but due to the diode operation, it imposes a small negative voltage to the cells. Such negative voltage is much lower than the breakdown voltage, but in any case it forces the cells to consume power. Figure 3 shows a typical current vs. voltage (I-V) curve of a PV cell where  $V_{br}$  is the breakdown voltage,  $V_{bda}$  is the diode activation voltage,  $V_{OC}$  is the open circuit voltage,  $I_{SC}$  is the short circuit current and  $I_{st}$  is the string current.

In figure 3, the gray area represents the power loss caused by the bypass diode activation, which is much lower than the power loss exhibited when



**Figure 2.** Granularity of PV system. (a) Module, (b) String, (c) Array.

**Source:** self-authorship.



**Figure 3.** I-V Characteristic of a PV cell.

**Source:** self-authorship

the cell reaches the breakdown voltage. In addition to the connection of bypass diodes, PV arrays are also protected by blocking diodes, which are connected in series with strings to block reverse current flows that may cause the PV modules behave as loads (Petrone, Spagnuolo, & Vitelli, 2007). The previous considerations increase the complexity of the modeling process. One of the most commonly adopted alternative is to use simulation packages; in such a way in (Ishaque K., Salam, Taheri, & Syafaruddin, 2011b) two ideas to evaluate the goodness of a simulation package are highlighted: (i) it should be fast but accurate in the prediction of the I-V characteristic curve, it including special conditions such as partial shading; and (ii) it should be a comprehensive tool to develop and validate the PV system design including the power converter and the maximum power point tracking control. However, simulations packages have some limitations: high cost, inaccurate, limited, bad representation of mismatching conditions, not supporting the interfacing of the PV arrays with power electronic systems, among others (Patel & Agarwal, 2008). The above considerations shows the need of appealing to different techniques, which in synergy with such simulation packages and programming

languages, provide suitable analysis of PV systems (I-V curves) with a suitable balance between accuracy, computational cost and complexity. In the PV systems research area, several topics have been studied through different literature reviews: in (Woyte, Nijs, & Belmans, 2003) a review on the effects of shading in the energy production is presented, analyzing also the effect of the array position. The work presented in (Fuentes, Nofuentes, Aguilera, Talavera, & Castro, 2007) highlights the importance of the calibration of PV modules to avoid errors in the analysis. In addition, five algebraic methods to correct from STC to any operation conditions are briefly described, while in (Ishaque & Salam, 2013) an analysis of the main characteristics of the most used Maximum Power Point Tracking (MPPT) techniques for mismatched conditions is presented. Similarly, in (Olalla, Clement, Rodriguez, & Maksimovic, 2013) and (Olalla, Deline, & Maksimovic, 2014) an analysis of the power interface is presented, it making emphasis on the advantages of using submodule-integrated dc-dc converters (SubMICs), instead of bypass diodes, to avoid the effects of partial shading. Moreover, a numerical model is used to predict the power produced using a Distributed Maximum Power Point Tracking (DMPPT) down to

the cell level. However, a review on techniques to model PV arrays under shading conditions is necessary. Hence, this paper analyzes the current developments in modeling techniques for PV systems under shading conditions and also provides a comparison between three modeling techniques to highlight the compromise between accuracy, calculation speed and complexity.

## MODELING TECHNIQUES

This work analyses the modeling techniques grouped depending on the adopted PV model: one diode model, two diode model and other models which include Bishop model, PL model, and others.

### Methods based on the one diode model

In (Karatepe, Boztepe, & Colak, 2007) the one diode model is used to design an artificial neural network (ANN) to model PV systems under different configurations as the series-parallel (SP), bridge-linked (BL) and total cross tied (TCT). Despite the use of an ANN to ensure less computational effort, the authors do not provide comparison with other methods. In (Petroni, Spagnuolo, & Vitelli, 2007) an analytical method based on an explicit relationship between the current of a string and its voltage is proposed, it using the Lambert-W function to define a set of nonlinear equations, including the bypass diodes, to simulate strings or arrays. The set of non-linear equations is solved using the Newton-Raphson method programmed in Matlab. This technique is improved in (Orozco-Gutierrez, Ramirez-Scarpetta, Spagnuolo, & Ramos-Paja, 2013), where authors propose the use of a mathematical tool known as the Schür complement, which allows to enhance the speed in the calculation of the Jacobian matrix of the system. Such an improvement is demonstrated using comparisons between the different algorithms. In (Patel & Agarwal, 2008), a Matlab-based simulator is used to analyze PV arrays taking into account temperature and irradiance variations, however, the

authors do not give any detail about the algorithm. An improvement to this work is presented in (Ramabadran, 2009), which modifies the equations that define the system. Another related work is presented in (Wang & Hsu, 2009a), where a string with certain number of modules is characterized in the first and second quadrants, while the bypass diodes are modeled by piecewise resistances. Taking advantage of the C language programmable blocks in PSIM, the authors of (Ji, Kim, Park, Kim, & Won, 2009) propose a strategy to simulate the effects of partial shading conditions for developing MPPT algorithms aimed to drive power conversion systems. A work focused in the energy yield analysis of PV systems is presented in (Di Dio, La Cascia, Miceli, & Rando, 2009), in which a PV model implemented in Simulink is used to analyze different PV array connections; the model used in this work allows predicting the maximum generated power of PV generators under unequally radiation conditions. In (Villalba, Gazoli, & Filho, 2009), a widely used approach was introduced. In such a work the authors propose a method to find the parameters of the nonlinear I-V equation by adjusting the curve at three points: open circuit, maximum power and short circuit, which results useful for the analysis of the characteristic curves. This method finds the best I-V equation for the single-diode model, this including the effect of the series and parallel resistances. In (Di Piazza & Vitale, 2010), a new strategy for the analysis of PV systems is presented, which mainly consist into develop a PV field emulator. This tool provides the I-V and P-V curves of a PV array under shading conditions taking into account temperature effects. The emulator is equipped with a power interface to analyze the performance of MPPT strategies and other controllers. Another work focused in obtaining the characteristic curves is presented in (Mäki, Valkealahti, & Leppäaho, 2011), where simulation results of series-connected PV modules under different shading conditions are presented. Such simulations are used to study the shading losses, the occurrence of multiple Maximum Power Points (MPP), and

the voltage behavior of the MPPs. In (Petroni & Ramos-Paja, 2011), a simplified one diode model is adopted, while the technique is based on the calculation of the voltages in which the bypass diodes become active. Such information is used to define the number of equations to be solved to obtain the I-V characteristic. In that work, the bypass diode is considered an ideal switch. An improvement to that method is presented in (Bastidas, Franco, Petrone, & Ramos-Paja, 2013), where the complete one diode model and a piecewise representation of the bypass and blocking diode are used. In (Tian, Zhao, Deng, He, & Han, 2011), a model for simulation in Matlab is presented. The influence of insolation and temperature in series-connected and parallel-connected modules is also analyzed. The authors of (Wang & Lin, 2011) present a comparison between the one diode and PL models applied to SP and TCT configurations. The solution based on the one diode model is represented through a set of equations solved by the Newton-Raphson method, while the solution based on the PL model is simulated in EMTP software. In (Wei, Ning, & Shaoyuan, 2012), a DE (Differential Evolution) algorithm is used to obtain the time-varying parameters of an array under shading conditions. The accuracy of the method is validated through an experimental test. In contrast, the method described in (Kadri, Andrei, Gaubert, Ivanovici, Champenois, & Andrei, 2012) is based on the classical circuit theory, it uses the admittance and conductance equations to describe the connection of the system in different configurations; the method is programmed in Matlab-Simulink using a sub-circuit for each module of the array. (Alonso-Garcia & Ruiz, 2006) and (Said Samer, Ahmed, & Shehab, 2012) present simulation works; in the former the behavior of the cell in the second quadrant is analyzed, while in the latter a suitable Simulink model is used taking into account parameters related to the temperature. In (Seyedmahmoudian, Mekhilef, Rahmani, Yusof, & Taslimi, 2013) the simulation of a PV system is performed by using analytical expressions. In addition, simulations with a power

interface are made to analyze the performance of the MPPT algorithm under shading conditions. A PV model based on the one diode model and the Lambert W-function, aimed to analyze PV strings down to the cell level, is presented in (Batzelis, Routsolias, & Papatthanassiou, 2014); in this work the bypass diode is represented in an exponential way and the model allows representing the PV behavior in the four quadrants. As it was said, the analysis of PV systems covers several topics including the design and control of the power interface, which is mainly composed by a DC/DC converter and its controller, where MPPT algorithms take place. In this way, the work reported in (Xiao, Edwin, Spagnuolo, & Jatskevich, 2013) provides a detailed parameterization procedure for a PV model. That procedure is aimed at studying power interfaces with and without IDCL (intermediate DC link). Another research topic in PV systems is the parameterization of PV modules, which is an important issue since the accuracy in the model parameters defines in certain level the efficiency of an analysis technique. In (Orioli & Di Gangi, 2014), a tabular data procedure to evaluate the parameters of the one diode model, for a single PV module, is presented. Simulations for several commercial PV panels are made with PVSyst and the results are compared with another procedure, named Saloux model, and with experimental measurements. Finally, interesting mathematical approaches are presented in (Lun, Du, Yang, Guo, Sang, & Li, 2013a) and (Lun, et al., 2013b); in the first one a Padé approximation method is proposed to express the exponential function of I-V characteristic equation, then an explicit analytical description of current is obtained for one cell; while in the latter one a Taylor's series expansion method is proposed with the same purpose, both works use the environment Engineering Equation Solver (EES).

### Methods based on the two diode model

This model has been used by (Ishaque, Salam, & Syafaruddin, 2011a) to provide improved accuracy.

The proposed method, programmed in Matlab, consists in (i) determination of shading and temperature patterns for a particular shaded group, (ii) calculation of the voltage and current for each group based on the two-diode model subjected to a known shading pattern and (iii) performing linear interpolation with extrapolation techniques to form the continuous I-V curves. In contrast, a detailed simulator for PV arrays under shading conditions based on Matlab, is presented in (Ishaque K. , Salam , Taheri , & Syafaruddin, 2011b). This work is oriented to study the characteristic curves and the performance of MPPT algorithms. In (Paraskevadaki & Papathanassiou, 2011) the two diode model is used to obtain mathematical expressions to calculate the power and voltage of the MPPs for a unique shading pattern in a panel with two modules, where simulations are executed in PSpice. In (Rathee , Khanna, & Das , 2013), a combined simulation in Pspice and Matlab is presented, while in (Zegaoui, et al., 2011) a Pspice simulation is also performed but taking into account the behavior of the cell in the second quadrant.

### Methods based on other models

The Bishop model was introduced in 1988. This model was used to present a new software tool (PVNet) for modeling and simulating PV systems with SP and TCT configurations under shading conditions, it considering also the behavior in the second quadrant. The PVNet software was programmed in Pascal language (Bishop, 1988). Several works have adopted this model: (Silvestre & Chouder, 2007) and (Silvestre, Boronat, & Chouder, 2009) present simulations based on Matlab and Pspice, respectively. In the former, a single module is analyzed, while in the latter an array is addressed. Both works consider the behavior in the first quadrant only. In (Liu, Nguang, & Partridge, 2011), the system is modeled through a set of nonlinear equations that are solved by a robust damped Newton method, where the convergence is guaranteed. SP, TCT, and BL configurations

under shading conditions are analyzed from the point of view of the power losses and energy yield in (Ramaprabha & Mathur, 2012) by using the Bishop model. On the other hand, the PL model is used in (Wang & Hsu, 2009a) and in (Azab, 2009), both works oriented to simulate in the first quadrant. Such simulations were carried out in EMPT and in Matlab, respectively. Some works are not based in a circuital model, instead they are based in mathematical expression extracted from geometrical characteristics which is the case of the work presented in (Narvarte & Lorenzo, 2008), where an analysis of the use of tracking strategies as an option to avoid the effects of partial shading is presented. Another work based on geometrical and theoretical definitions is the one presented in (Makrides, Zinsser, Schubert, & Georghiou, 2011), which provides a comparison of the errors in annual DC energy yield prediction obtained by four different theoretical methods; results are contrasted against outdoor measurements for different grid-connected PV systems. (Hachem, Athienitis, & Fazio, 2011) analyses the impact of the geometry of a two-story single family housing in the integration of a solar generator. A particular analysis of self-shading and power losses is presented in (Brecl & Topic, 2011), where a detailed analysis of the effect of self-shading in fixed free-standing PV arrays is presented. The analysis takes into account the geometry of module and the orientation of the array, as well as the parameters of the array configuration, e.g. space between modules. Finally, in (Sánchez, Milone, & Buitrago, 2013), a neural model is used: a multilayer perceptron was adopted, where the input layer consists of two neurons whose linear entries are radiation and cell temperature. The hidden layer consists of nine neurons with sigmoid transfer functions, and the output layer has 40 nodes with linear activation functions.

Table 1 summarizes the characteristics of the modeling methods previously analyzed. Several modeling techniques were reported, where 25 of them are based on the one diode model.

**Table 1.** Summary of the modeling methods (App. stands for application, Gran. for granularity, Q. for quadrants, N.D for not defined and N.A for not applicable)

Reference	Gran.	Q.	Model	Software
(Alonso-Garcia & Ruiz, 2006)	Cell	2		N.D
(Karatepe, Boztepe, & Colak, 2007)	Module	1		N.D
(Petrone, Spagnuolo, & Vitelli, 2007)	Module	1		Matlab
(Orozco-Gutierrez, Ramirez-Scarpetta, Spagnuolo, & Ramos-Paja, 2013)	Module	1		Matlab
(Patel & Agarwal, 2008)	Module	1		Matlab
(Wang & Hsu, 2009a)	Cell	2		N.D
(Ramabadran, 2009)	Module	1		Matlab
(Ji, Kim, Park, Kim, & Won, 2009)	Cell	1		PSIM
(Di Dio, La Cascia, Miceli, & Rando, 2009)	Module	1		Matlab
(Villalba, Gazoli, & Filho, 2009)	Cell	1		N.D
(Di Piazza & Vitale, 2010)	Cell	1		N.D
(Mäki, Valkealahti, & Leppäaho, 2011)	Module	1		Matlab
(Petrone & Ramos-Paja, 2011)	Module	1	One diode	Matlab
(Tian, Zhao, Deng, He, & Han, 2011)	Cell	1		Matlab
(Wang & Lin, 2011)	Module	1		EMTP
(Wei, Ning, & Shaoyuan, 2012)	Cell	1		N.D
(Said Samer, Ahmed, & Shehab, 2012)	Cell	1		Matlab
(Kadri, Andrei, Gaubert, Ivanovici, Champenois, & Andrei, 2012)	Cell	1		Labview – Matlab
(Bastidas, Franco, Petrone, & Ramos-Paja, 2013)	Module	1		Matlab
(Batzelis, Routsolias, & Papathanassiou, 2014)	Cell	4		N.D
(Seyedmahmoudian, Mekhilef, Rahmani, Yusof, & Taslimi, 2013)	Module	1		N.D
(Xiao, Edwin, Spagnuolo, & Jatskevich, 2013)	Cell	1		Matlab
(Orioli & Di Gangi, 2014)	N.A	N.A		PVSystem
(Lun, Du, Yang, Guo, Sang, & Li, 2013a)	Cell	N.A		EES
(Lun, et al., 2013b)	Cell	N.A		EES
(Zegaoui, Petit, & Aillerie, 2012)	Cell	2		Pspice
(Ishaque, Salam, & Syafaruddin, 2011a)	Cell	1		Matlab
(Ishaque K. , Salam , Taheri , & Syafaruddin, 2011b)	Module	1	Two diode	Matlab
(Paraskevadaki & Papathanassiou, 2011)	Module	1		Pspice
(Rathee , Khanna, & Das , 2013)	Module	1		Pspice – Matlab
(Bishop, 1988)	Cell	3		Pascal
(Silvestre & Chouder, 2007)	Cell	1		Matlab
(Silvestre, Boronat, & Chouder, 2009)	Cell	1	Bishop	Pspice
(Liu, Nguang, & Partridge, 2011)	Cell	1		Matlab
(Ramaprabha & Mathur, 2012)	Module	2		Matlab
(Wang & Hsu, 2009a)	Cell	1		EMTP
(Azab, 2009)	Cell	1	PL	Matlab
(Wang & Lin, 2011)	Module	1		EMTP
(Narvarte & Lorenzo, 2008)	N.A	N.A		N.D
(Makrides, Zinsser, Schubert, & Georghiou, 2011)	N.A	N.A	Other	N.D
(Hachem, Athienitis, & Fazio, 2011)	N.A	N.A		Energy Plus
(Brecl & Topic, 2011)	N.A	N.A		Sun Irradiance
(Sánchez, Milone, & Buitrago, 2013)	Module	1	Neural	N.D

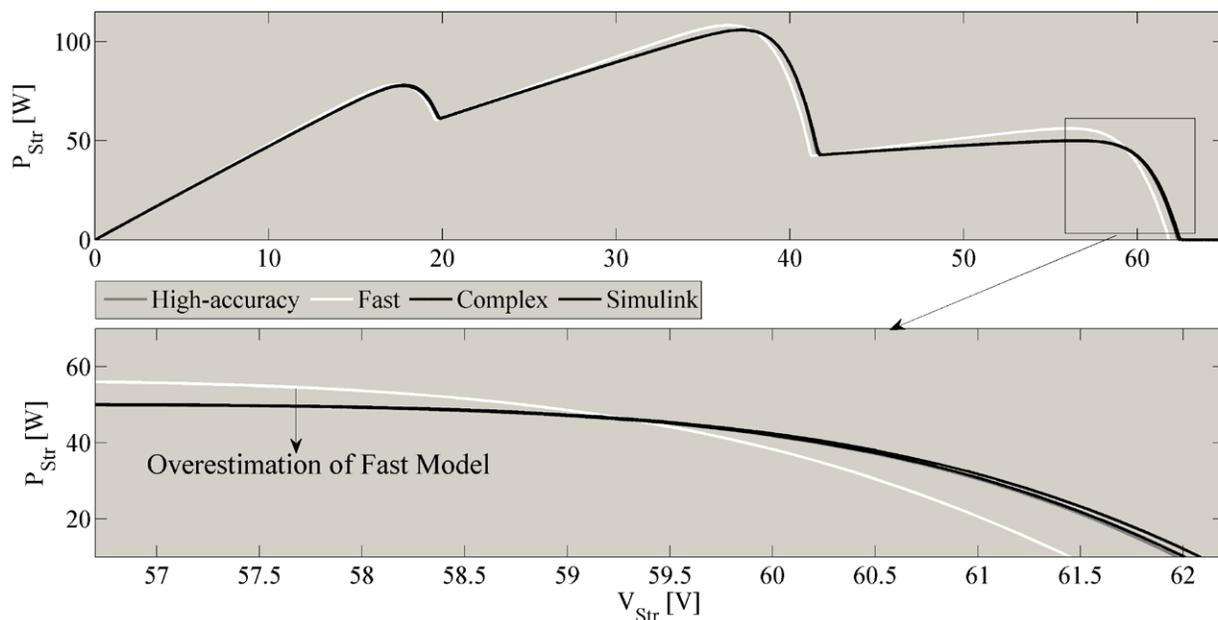
Source: self-authorship

Six works considered the behavior of the system in the second quadrant; however 3 of the works based on the Bishop model did not present any analysis about this matter. Other approaches were based on the two diode model, the PL model, a neural model and models based on theoretical concepts (no-circuitual models). A preference to use Matlab and PSpice was identified; however in 11 references the software used is not described explicitly.

## RESULTS

A comparison between three of the reported methods was performed with the aim of illustrate the compromise between accuracy, complexity and calculation speed. The methods selected for the comparison were reported in (Petrone, Spagnuolo, & Vitelli, 2007), which is named High-accuracy model; in (Petrone & Ramos-Paja, 2011), which is

named Fast model; and in (Bastidas, Franco, Petrone, & Ramos-Paja, 2013), which is named Complex model. Such models were selected because they provide different characteristics as is described by the authors: High-accuracy model is very accurate but takes long calculation times; Fast model is less accurate but provides short calculation times, while the Complex model provides a balance between the previous. The methods were implemented in Matlab and contrasted with a Simulink circuitual simulation. The PV system used for the simulation consists of a single string of three modules with 36 cells each. The parameters of the PV modules used in the simulation are:  $V_{OC} = 21.78$  V,  $I_{SC} = 5.13$  A,  $I_{ph1} = 0.94 \cdot I_{SC}$  A,  $I_{ph2} = 0.6 \cdot I_{SC}$  A,  $I_{ph3} = 0.2 \cdot I_{SC}$  A. Figure 4 shows the P-V curve comparison between the models and the Simulink circuitual simulation. The results show the good approach obtained with the High-accuracy model, however its simulation time was 83.860 s. The Fast model requires a short



**Figure 4.** Comparison between the models and the Simulink circuitual simulation.

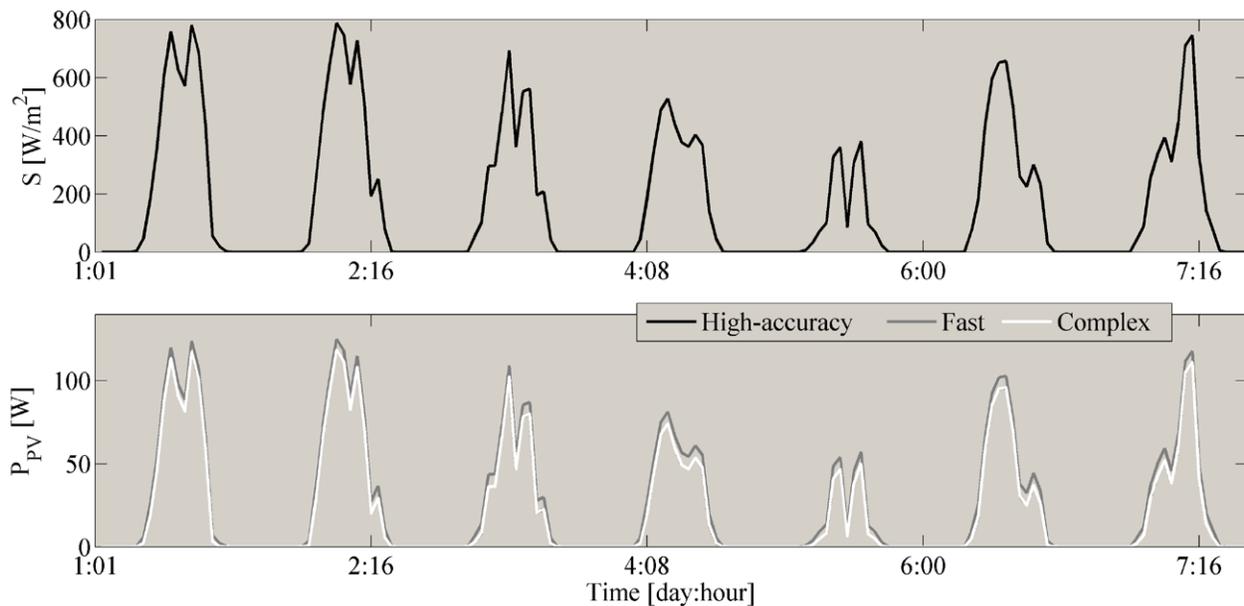
**Source:** self-authorship.

simulation time equal to 1.369 s, but it introduces some overestimation in power compared to the circuital simulation. Finally, the Complex model provides a similar behavior to the High-accuracy approach with a simulation time equal to 51.42 s, but its equations change dynamically, which increases the implementation complexity.

It is evident that the Fast method predicts higher power values that can lead to errors in planning of PV systems, however it could be useful to carry on simulations aimed at contrasting different PV fields, e.g. SP, TCT, BL. The relative mean errors of the three studied methods for the power prediction, with respect to the Simulink circuital simulation, are: 2.93% for the High-accuracy, 13.04%

for the Fast and 8.39% for the Complex. The upper part of figure 5 shows an irradiance profile of the center of Colombia for 7 days with samples taken hour by hour, while the lower part shows the predicted power provided by the three methods for a 3x2 PV field (2 strings with 3 modules each) with a shading pattern of 95%, 50% and 20% for the first string and 70%, 40% and 10% for the second one.

It is observed that the prediction provided by the Fast method is higher than the prediction provided by the other two methods, which put in evidence an overestimation effect. In any case, the Fast method requires only 2.02 % of the simulation time, hence it is useful for comparing different PV systems under similar conditions.



**Figure 5.** Energy prediction for 1 week of summer (Center of Colombia).

**Source:** self-authorship.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the Universidad Nacional de Colombia, the Instituto Tecnológico Metropolitano and Colciencias (Fondo nacional de financiamiento para ciencia, la tecnología y la innovación Francisco José de Caldas) under the projects MicroRENIZ-25439 (Code 1118-669-46197) and MICRO-RED-26861 and the doctoral scholarships 34065242 and 095-2005.

## FINANCING

This work was supported by the Universidad Nacional de Colombia, the Instituto Tecnológico Metropolitano and Colciencias (Fondo nacional de financiamiento para ciencia, la tecnología y la innovación Francisco José de Caldas) under the projects MicroRENIZ-25439 (Code 1118-669-46197) and MICRO-RED-26861 and the doctoral scholarships 34065242 and 095-2005.

## CONCLUSIONS

The modeling techniques for PV systems under partial shading conditions have been analyzed. The key concepts concerning the modeling of PV systems were highlighted to contextualize the problem of the analysis of PV systems by means of analytical and simulation methods. The works reported in (Petrone, Spagnuolo, & Vitelli, 2007), (Petrone & Ramos-Paja, 2011) and (Bastidas, Franco, Petrone, & Ramos-Paja, 2013) were compared through simulation. The results show that accurate results can be obtained with relatively simple implementations but requiring long simulation times, while other approaches provide very short simulation times but introducing errors. In contrast, it is possible to obtain a balance between accuracy and calculation speed by increasing significantly the model complexity, which in turn increases the implementation time. Hence, the selection of a method for analyzing a PV system must consider

the size of the system, the required hardware to execute the simulation, the programming complexity and the tolerance error to obtain a suitable solution for each particular case.

## AGRADECIMIENTOS:

Este trabajo fue soportado por la Universidad Nacional de Colombia, el Instituto Tecnológico Metropolitano y Colciencias (Fondo nacional de financiamiento para ciencia, la tecnología y la innovación Francisco José de Caldas) bajo los proyectos MicroRENIZ-25439 (Code 1118-669-46197) y MICRO-RED-26861 y las becas doctorales 34065242 y 095-2005.

## REFERENCES

- Alonso-Garcia, M., & Ruiz, J. (2006). Analysis and modelling the reverse characteristic of photovoltaic cells. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, *90*, 1105–1120.
- Alonso-Garcia, M., Ruiz, J., & Herrmann, W. (2006). Computer simulation of shading effects in photovoltaic arrays. *Renewable Energy*, *31*, 1986–1993.
- Azab, M. (2009). Improved Circuit Model of Photovoltaic Array. *International J. of Power and Energy Systems and Engineering*, *2*(3), 185-188.
- Bastidas, J., Franco, E., Petrone, G., & Ramos-Paja, C. (2013). A model of photovoltaic fields in mismatching conditions featuring an improved calculation speed. *Electric Power Systems Research*, *96*, 81-90.
- Batzelis, E., Routsolias, I., & Papathanassiou, S. (2014). An explicit PV string model based on the Lambert W function and simplified MPP expressions for operation under partial shading. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, *5*(1), 301-312.
- Bishop, J. (1988). Computer Simulation Of The Effects Of Electrical Mismatches In Photovoltaic Cell Interconnection Circuits. *Solar Cells*, *25*, 73-89.

- Brecl, K., & Topic, M. (2011). Self-shading losses of fixed free-standing PV arrays. *Renewable Energy*, 36(11), 3211-3216.
- Di Dio, V., La Cascia, D., Miceli, R., & Rando, C. (2009). A mathematical model to determine the electrical energy production in photovoltaic fields under. *Clean Electrical Power International Conference* (pp. 46-51). Capri: IEEE.
- Di Piazza, M., & Vitale, G. (2010). Photovoltaic field emulation including dynamic and partial shadow conditions. *Applied Energy*, 87(3), 814-823.
- Fuentes, M., Nofuentes, G., Aguilera, J., Talavera, D., & Castro, M. (2007). Application and validation of algebraic methods to predict the behaviour of crystalline silicon PV modules in Mediterranean climates. *Solar Energy*, 81(11), 1396-1408.
- Hachem, C., Athienitis, A., & Fazio, P. (2011). Parametric investigation of geometric form effects on solar potential of housing units. *Solar Energy*, 85(9), 1864-1877.
- Ishaque, K., & Salam, Z. (2013). A review of maximum power point tracking techniques of PV system for uniform insolation and partial shading condition. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 475-488.
- Ishaque, K., Salam, Z., Taheri, H., & Syafaruddin. (2011b). Modeling and simulation of photovoltaic (PV) system during partial shading based on a two-diode model. (Elsevier, Ed.) *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19(7), 1613-1626.
- Ishaque, K., Salam, Z., & Syafaruddin. (2011a). A comprehensive MATLAB Simulink PV system simulator with partial shading capability based on two-diode model. *Solar Energy*, 85, 2217-2227.
- Ji, Y.-H., Kim, J.-G., Park, S.-H., Kim, J.-H., & Won, C.-Y. (2009). C-language based pv array simulation technique considering effects of partial shading. *Industrial Technology, 2009. ICIT 2009. IEEE International Conference on* (pp. 1-6). IEEE.
- Kadri, R., Andrei, H., Gaubert, J., Ivanovici, T., Champenois, G., & Andrei, P. (2012). Modeling of the photovoltaic cell circuit parameters for optimum connection model and real-time emulator. *Energy*, 42(1), 57-67.
- Karatepe, E., Boztepe, M., & Colak, M. (2007). Development of a suitable model for characterizing photovoltaic arrays with shaded solar cells. *Solar Energy*, 81(8), 977-992.
- Liu, G., Nguang, S., & Partridge, A. (2011). A general modeling method for I-V characteristics of geometrically and electrically configured photovoltaic arrays. *Energy Conversion and Management*, 52, 3439-3445.
- Lun, S., Du, C., Yang, G., Guo, T., Sang, J., & Li, J. (2013a). A new explicit I-V model of a solar cell based on Taylor's series expansion. *Solar Energy*, 94, 221-232.
- Lun, S., Du, C., Yang, G., Wang, S., Guo, T., Sang, J., et al. (2013b). An explicit approximate I-V characteristic model of a solar cell based on padé approximants. *Solar Energy*, 92, 147-159.
- Mäki, A., Valkealahti, S., & Leppäaho, J. (2011). Operation of series-connected silicon-based photovoltaic modules under partial shading conditions. *Progress in photovoltaics: research and applications*, 20(3), 298-309.
- Makrides, G., Zinsser, B., Schubert, M., & Georghiou, G. (2011). Energy yield prediction errors and uncertainties of different photovoltaic models. *Progress in photovoltaics: research and applications*, 21(4), 500-516.
- Martinez-Moreno, F., Muñoz, J., & Lorenzo, E. (2011). Experimental model to estimate shading losses on PV arrays. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 94(12), 2298-2303.
- Narvarte, L., & Lorenzo, E. (2008). Tracking and Ground Cover Ratio. *Progress in photovoltaics: research and applications*, 16, 703-714.

- Olalla, C., Clement, D., Rodriguez, M., & Maksimovic, D. (2013). Architectures and Control of Submodule Integrated DC–DC Converters for Photovoltaic Applications. *IEEE Transactions On Power Electronics*, 28(6), 2980–2997.
- Olalla, C., Deline, C., & Maksimovic, D. (2014). Performance of Mis-matched PV Systems With Submodule Integrated Converters. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 4(1), 396–404.
- Orioli, A., & Di Gangi, A. (2014). Review of the energy and economic parameters involved in the effectiveness of grid-connected PV systems installed in multi-storey buildings. *Applied Energy*, 113, 955–969.
- Orozco-Gutierrez, M. L., Ramirez-Scarpetta, J. M., Spagnuolo, G., & Ramos-Paja, C. A. (2013). A technique for mismatched PV array simulation. *Renewable Energy*, 55, 417–427.
- Paraskevadaki, V., & Papathanassiou, A. (2011). Evaluation of MPP Voltage and Power of mc-Si PV Modules in Partial Shading Conditions. *IEEE Transactions On Energy Conversion*, 26(3), 923–932.
- Patel, H., & Agarwal, V. (2008). MATLAB-Based Modeling to Study the Effects of Partial Shading on PV Array Characteristics. *IEEE Transactions On Energy Conversion*, 23(1), 302–310.
- Petrone, G., & Ramos-Paja, C. (2011). Modeling of photovoltaic fields in mismatched conditions for energy yield evaluations. *Electric Power Systems Research*, 81, 1003–1013.
- Petrone, G., Spagnuolo, G., & Vitelli, M. (2007). Analytical model of mismatched photovoltaic fields by means of Lambert W function. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 91, 1652–1657.
- Ramabadran, R. (2009). MATLAB Based Modelling and Performance Study of Series Connected SPVA under Partial Shaded Conditions. *J. of Sustainable Development*, 2(3), 85–94.
- Ramaprabha, R., & Mathur, B. (2012). A Comprehensive Review and Analysis of Solar Photovoltaic Array Configurations under Partial Shaded Conditions. *International Journal of Photoenergy*, 2012, 1–16.
- Rathee, R., Khanna, V., & Das, B. (2013). Comparative Analysis To Study The Effects Of Partial Shading On PV Array With Lt-Spice And Matlab/Simulink Environment. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2(5), 1501–1508.
- Said Samer, B. M., Ahmed, M., & Shehab, A. (2012). A matlab/simulink-based photovoltaic array model employing simpowersystems toolbox. *Journal of Energy and Power Engineering*, 6(12), 1965–1975.
- Sánchez, C., Milone, D., & Buitrago, R. (2013). Simulation of photovoltaic centrals with dynamic shading. *Applied Energy*, 103, 278–289.
- Seyedmahmoudian, S., Mekhilef, S., Rahmani, R., Yusof, R., & Taslimi, E. (2013). Analytical Modeling of Partially Shaded Photovoltaic Systems. *Energies*, 6(1), 128–144.
- Silvestre, S., & Chouder, A. (2007). Effects of Shadowing on Photovoltaic Module Performance. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 16, 141–149.
- Silvestre, S., Boronat, A., & Chouder, A. (2009). Study of bypass diodes configuration on PV modules. *Applied Energy*, 86, 1632–1640.
- Tian, Q., Zhao, Z., Deng, Y., He, F., & Han, X. (2011). Modeling and analysing to the forward PV cells for large-scale PV array. *International Conference on Electrical Machines and Systems* (pp. 1–7). Beijing: IEEE.
- Villalba, M., Gazoli, J., & Filho, E. (2009). Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(5), 1198–1208.
- Wang, Y.-J., & Lin, S.-S. (2011). Analysis of a partially shaded PV array considering different module connection schemes and effects of bypass diodes. *Utility Exhibition on Power and Energy Systems: Issues*

- & *Prospects for Asia (ICUE), 2011 International Conference and* (pp. 1-7). IEEE.
- Wang, Y., & Hsu, P. (2009a). Analysis of Partially Shaded PV Modules Using Piecewise Linear Parallel Branches Model. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 60(2), 783–789.
- Wang, Y., & Hsu, P. (2009b). Analytical modelling of partial shading and different orientation of photovoltaic modules. *IET Renewable Power Generation*, 4(3), 272–282.
- Wei, W., Ning, L., & Shaoyuan, L. (2012). A Real-time Modeling of Photovoltaic Array. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 20(6), 1154–1160.
- Woyte, A., Nijs, J., & Belmans, R. (2003). Partial shading of photovoltaic arrays with different system configurations: literature review and field test results. *Solar Energy*, 74(3), 217–233.
- Xiao, W., Edwin, F., Spagnuolo, G., & Jatskevich, J. (2013). Efficient Approaches for Modeling and Simulating Photovoltaic Power Systems. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 3(1), 500-508.
- Zegaoui, A., Petit, P., & Aillerie, M. (2012). Experimental Validation of Photovoltaic Direct and Reverse Mode Model: Influence of Partial Shading. *Energy Procedia*, 8, 1247–1253.
- Zegaoui, A., Petit, P., Aillerie, M., Sawicki, J., Belarbi, A., Krachai, M., et al. (2011). Photovoltaic Cell/ Panel/Array Characterizations and Modeling Considering Both Reverse and Direct Modes. *Energy Procedia*, 6, 695–703.





UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

## INSTRUCCIONES PARA LOS AUTORES

Revista *TECNURA*  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Facultad Tecnológica

### CONTENIDO

- Alcance y política editorial de la revista
- Tipos de artículos aceptados
- Formato del artículo
- Envío de artículos
- Procedimiento para la publicación
- Arbitraje de artículos
- Contacto

### 1. ALCANCE Y POLÍTICA EDITORIAL DE LA REVISTA

La revista *Tecnura* es una publicación institucional de la Facultad Tecnológica de la Universidad Francisco José de Caldas, de carácter científico-tecnológico con periodicidad trimestral, que se publica los meses de enero, abril, julio y octubre. Su primer número apareció en el segundo semestre del año 1997 y hasta la fecha ha mantenido su regularidad.

Las áreas temáticas de interés de la revista *Tecnura* están enfocadas a todos los campos de la ingeniería, como la electrónica, telecomunicaciones, electricidad, sistemas, industrial, mecánica, catastral, civil, ambiental, entre otras. Sin embargo, no se restringe únicamente a estas, también tienen cabida los temas de educación y salud, siempre y cuando estén relacionados con la ingeniería. La revista publica únicamente artículos de investigación científica y tecnológica, de reflexión y de revisión. En consecuencia, durante la fase de evaluación editorial inicial se rechazarán los artículos cortos y reportes de caso.

La revista *Tecnura* está dirigida a docentes, investigadores, estudiantes y profesionales

interesados en la actualización permanente de sus conocimientos y el seguimiento de los procesos de investigación científico-tecnológica, en el campo de las ingenierías. Tiene como misión divulgar resultados de proyectos de investigación realizados en el área de las ingenierías, a través de la publicación de artículos originales e inéditos, realizados por académicos y profesionales pertenecientes a instituciones nacionales o extranjeras del orden público o privado. Los artículos presentados deben ser trabajos inéditos escritos en español o inglés; sin embargo, tendrán preferencia los artículos que muestren conceptos innovadores de gran interés, que traten sobre asuntos relacionados con el objetivo y cobertura temática de la revista.

*Tecnura* es una publicación de carácter académico indexada en el Índice Bibliográfico Nacional Publindex (IBN) de Colciencias (Colombia) en la categoría A2, en los Índices Regionales Scielo Colombia (Colombia) y Redalyc (México), además de las siguientes bases bibliográficas: INSPEC del Institution of Engineering and Technology (Inglaterra), Fuente Académica Premier de EBSCO (Estados Unidos), CABI (Inglaterra), Index Copernicus (Polonia), Informe Académico de Gale Cengage Learning (México), Periódica de la Universidad Nacional Autónoma de México (México), Oceanet (España) y Dialnet de la Universidad de la Rioja (España). También hace parte de los siguientes directorios: Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal Latindex (México), Índice Bibliográfico Actualidad Iberoamericana (Chile), e-Revistas (España), DOAJ (Suecia), Ulrich de Proquest (Estados Unidos).

*Tecnura* es una revista arbitrada mediante un proceso de revisión entre pares de doble ciego. La periodicidad de la conformación de sus comités Científico y Editorial está sujeta a la publicación de artículos en revistas indexadas internacionalmente por parte de sus respectivos miembros.

La Universidad Distrital Francisco José de Caldas, sus directivas, el Editor, el Comité Editorial y Científico no son responsables por la opinión y criterios expresados en el contenido de los artículos y estos se publican bajo la exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento del Comité Editorial.

Además de la versión impresa, la revista *Tecnura* tiene también una versión digital disponible en su página web: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>

## 2. TIPOS DE ARTÍCULOS ACEPTADOS

De acuerdo con la clasificación del Índice Nacional de Publicaciones Científicas y Tecnológicas (Publindex-Colciencias), la revista *Tecnura* recibe postulaciones de artículos inéditos de los siguientes tipos:

**Artículos de investigación científica y tecnológica:** documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos de investigación. La estructura generalmente utilizada contiene cuatro apartes importantes: introducción, metodología, resultados y conclusiones.

**Artículos de reflexión:** documento que presenta resultados de investigación desde una perspectiva analítica, interpretativa o crítica del autor, sobre un tema específico y recurriendo a fuentes originales.

**Artículo de revisión:** documento resultado de una investigación donde se analizan, sistematizan e integran los resultados de las investigaciones publicadas o no publicadas, sobre un campo en ciencia o tecnología, con el fin de dar cuenta de los avances y las tendencias de desarrollo. Se caracteriza por presentar una cuidadosa revisión bibliográfica de al menos 50 referencias.

## 3. FORMATO DEL ARTÍCULO

### 3.1 Del lenguaje y estilo apropiado para la redacción de artículos

- Deben emplearse estructuras de oraciones simples, evitando las que sean demasiado largas o complejas.
- El vocabulario empleado debe ser básico y común. Los términos técnicos deben explicarse brevemente; asimismo, el significado de las siglas debe presentarse la primera vez que estas aparecen en el texto.
- Los autores son responsables de que su trabajo sea conducido de una manera profesional y ética.

### 3.2 De la extensión de los documentos

Los artículos no deben tener una extensión de más de 25 páginas en tamaño carta y a doble espacio, con márgenes simétricas de 3 cm. Solo en el caso de los artículos de revisión las 25 páginas no incluyen las referencias bibliográficas.

### 3.3 Del formato de presentación

Los artículos presentados deben ser trabajos inéditos escritos en español o inglés y deben digitarse en Microsoft Word (2003 en adelante), cumpliendo con las siguientes indicaciones:

Letra *Times New Román* de 12 puntos (a excepción de que se requiera lo contrario para algunos apartados).

- Una columna a doble espacio.
- Todas las márgenes de 3 cm.
- Los párrafos se justifican, y no debe haber espacio entre los consecutivos.
- No incluir saltos de página o finales de sección.
- Si se desea resaltar palabras o frases del texto, no usar letra negrita sino letra cursiva.
- Los decimales se deben señalar con coma (,) y no con un punto.

- Los millares y millones se deben señalar con un espacio fino.
- Evitar las notas de pie de página.
- Se debe utilizar nomenclatura arábica hasta el tercer nivel únicamente.

### 3.4 De la estructura del documento

Los trabajos deben tener la siguiente estructura y cumplir con los siguientes requisitos:

#### *Composición de un artículo*

Todos los artículos remitidos para su evaluación y posible publicación por parte de la revista *Tecnura* deben tener por lo menos los siguientes componentes:

- Título en español e inglés.
- Información de los autores.
- Resumen en español e inglés.
- Palabras clave en español e inglés.
- Introducción.
- Conclusiones.
- Trabajo futuro (opcional).
- Agradecimientos (opcional).
- Referencias bibliográficas.

Si el artículo es de investigación científica y tecnológica deben tener, además de lo anterior, los siguientes componentes:

- Metodología.
- Resultados.
- Financiamiento.

#### *Título*

El título del artículo deberá ser corto o dividido en título y subtítulo, atractivo para el lector potencial y escrito en mayúscula sostenida. Este debe aparecer centrado entre las márgenes, escrito con letra *Times New Roman*, en negrita, tamaño de fuente 18. El título del artículo debe ir en español e inglés separado por un espacio doble. Máximo 20 palabras.

#### *Autores*

Después del título debe escribirse el (los) nombre(s) completo(s) del (los) autor(es), acompañado de los datos biográficos básicos: título de pregrado, título de posgrado, ocupación o cargo, afiliación institucional (institución donde labora), dependencia, ciudad, país y correo electrónico. La información anterior debe ir inmediatamente debajo del nombre del autor.

#### *Resumen*

Debe establecer el objetivo y alcance del trabajo, una descripción clara y concisa de la metodología, los resultados y las conclusiones obtenidas. Máximo 250 palabras.

#### *Palabras clave*

Debe escogerse entre tres y diez palabras clave, escritas en español con letra *Times New Roman*, en negrita y cursiva.

Las palabras clave deben estar escritas en orden alfabético y ser de uso estandarizado, para lo cual se sugiere utilizar bases de datos internacionales según el área del conocimiento. Por ejemplo, en el área de Eléctrica y Electrónica se sugiere utilizar el tesoro de la UNESCO que se pueden encontrar en la página: <http://databases.unesco.org/thessp>.

#### *Abstract*

Debe ser una traducción correcta y precisa al idioma inglés del texto que aparece en el resumen en español.

#### *Keywords*

Debe ser una traducción correcta y precisa al idioma inglés de la lista de palabras clave en español.

Las *keywords* deben estar escritas en el orden de las palabras clave y ser de uso estandarizado, para lo cual se sugiere utilizar bases de datos internacionales según el área del conocimiento. Por ejemplo, en el área de Eléctrica y Electrónica se sugiere utilizar los Tesoros de la IEEE y/o World Bank que se pueden encontrar en las siguientes páginas respectivamente: [http://www.ieee.org/documents/2009Taxonomy\\_v101.pdf](http://www.ieee.org/documents/2009Taxonomy_v101.pdf), <http://multites.net/mtsql/wb/site/default.asp>

### *Introducción*

Debe describir el planteamiento general del trabajo, así como contexto, antecedentes, estado de arte de la temática abordada, objetivo y posible alcance del trabajo.

### *Metodología*

La redacción de este apartado debe permitir a cualquier profesional especializado en el tema replicar la investigación.

### *Resultados*

Explicación e interpretación de los hallazgos. Si es necesario, se puede presentar una discusión breve y enfocada a la interpretación de los resultados.

### *Conclusiones*

Implicación de los resultados y su relación con el objetivo propuesto.

### *Financiamiento*

Mencionar la investigación asociada de la cual se derivó el artículo y la entidad que avaló y financió dicha investigación.

### *Agradecimientos*

Preferiblemente deben ser breves y deben incluir los aportes esenciales para el desarrollo del trabajo.

### *Ecuaciones*

Deben aparecer centradas con respecto al texto principal. Las ecuaciones deben ser referenciadas con números consecutivos (escritos entre paréntesis cerca al margen derecho). Las ecuaciones se citan en el texto principal empleando la palabra ecuación y seguida del número entre paréntesis. Las ecuaciones deben ser elaboradas en un editor de ecuaciones apropiado y compatible con el paquete de software InDesign, por ejemplo, el editor de ecuaciones de Windows.

### *Tablas*

Para el caso de realización de tablas se recomienda que estas no sean insertadas como imágenes,

considerando que en este formato no pueden ser modificadas. El encabezado de cada tabla debe incluir la palabra Tabla (en negrita) seguida del número consecutivo correspondiente y de un breve nombre de la tabla. El encabezado debe estar escrito con letra Times New Roman, en cursiva y tamaño de fuente 9.

No se presentan cuadros sino tablas y estas se deben levantar automáticamente desde el procesador de textos. Las tablas deben ir nombradas y referenciadas en el artículo, en estricto orden. Toda tabla debe tener en su parte inferior la fuente de la que fue tomada, o mencionar que es autoría de los autores si es el caso.

### *Figuras*

Todas las figuras o fotografías deben enviarse en formato PNG o TIFF con una resolución mínima de 300 DPI, adaptadas a escala de grises.

El pie o rótulo de cada figura debe incluir la palabra Figura (en negrita) seguida del número consecutivo correspondiente y de una breve descripción del contenido de la figura. El pie de figura debe estar escrito con letra Times New Roman, en cursiva y tamaño de fuente 9. Las figuras deben ir nombradas y referenciadas en el artículo, en estricto orden. Toda figura debe tener también la fuente de la que fue tomada, o mencionar que es autoría de los autores si es el caso.

### *Símbolos*

Los símbolos de las constantes, variables y funciones en letras latinas o griegas –incluidos en las ecuaciones– deben ir en cursiva; los símbolos matemáticos y los números no van en cursiva. Se deben identificar los símbolos inmediatamente después de la ecuación. Se deben utilizar las unidades, dimensiones y símbolos del sistema internacional.

Cuando se empleen siglas o abreviaturas, se debe anotar primero la equivalencia completa, seguida de la sigla o abreviatura correspondiente entre paréntesis y en lo subsecuente se escribe solo la sigla o abreviatura respectiva.

### Referencias bibliográficas

El estilo de citación de referencias adoptado por la revista **Tecnura** es APA sexta edición. Las citas, referencias bibliográficas e infografía se incluyen al final del artículo. Las referencias bibliográficas deben ordenarse alfabéticamente de acuerdo con el primer apellido del primer autor, sin numeración.

Solo deben aparecer las referencias que fueron citadas en el texto principal del trabajo, en las tablas o en las figuras. Es decir, en la lista no deben aparecer otras referencias aunque hayan sido consultadas por los autores para la preparación del trabajo. Sugerimos utilizar herramientas como: *Citas y bibliografía* de Microsoft Word (para APA sexta edición versión 2013 o superior), *Zotero*, *Mendeley*, entre otras.

El llamado de una referencia bibliográfica se inserta en el texto, en el punto pertinente, bajo ciertas características:

- Si la oración incluye el apellido del autor, solo se debe escribir la fecha dentro de un paréntesis, ejemplo:  
Cuando Vasco (2012), analizó el problema de presentado en ....
- Cuando no se incluye el autor en la oración, debe ir entre el paréntesis el apellido y la fecha.  
La investigación de materiales dio una visión en el área (Martínez, 2012).
- Si el documento u obra tiene más de dos autores, se debe citar la primera vez con todos los apellidos.  
1990. (Fernández Morales, Villa Krieg & Caro de Villa, 2008) ....
- En las menciones siguientes, solo se debe escribir el primer apellido del autor, seguido de un "et al".  
En cuanto al estudio de las aguas, Fernández Morales et al. (2008) encontraron que ...
- Cuando el documento u obra tiene más de seis autores, se debe utilizar desde la primera mención el "et al".

A continuación se describen una serie de ejemplos de las referencias más utilizadas, según

el estilo de referencias adoptado por la revista *Tecnura*:

### Publicaciones Periódicas:

#### Forma Básica

Apellidos, A. A., Apellidos, B. B. & Apellidos, C. C. (Fecha). Título del artículo. *Título de la publicación*, volumen (número), pp. xx-xx. doi: xx.xxxxxxx

#### Artículo básico

Guevara López, P., Valdez Martínez, J., Agudelo González, J., & Delgado Reyes, G. (2014). Aproximación numérica del modelo epidemiológico SI para la propagación de gusanos informáticos, simulación y análisis de su error. *Revista Tecnura*, 18(42), 12 -23. doi:<http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.4.a01>

#### Artículo web

Rodríguez Páez, S., Fajardo Jaimes, A., & Páez Rueda, C. (2014). Híbrido rat-race miniaturizado para la banda ISM 2,4 GHZ. *Revista Tecnura*, 18(42), 38-52. Recuperado de <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/article/view/8059/9675>

### Libros:

#### Forma Básica

Apellidos, A. A. (Año). *Título*. Ciudad: Editorial.  
Apellidos, A. A. (Año). *Título*. Recuperado de <http://www.xxxxxx.xxx>  
Apellidos, A. A. (Año). *Título*. doi: xx.xxxxxxx  
Apellidos, A. A. (Ed.). (Año). *Título*. Ciudad: Editorial.

#### Libro con autor

Goleman, D. (2000). *La inteligencia emocional: Por qué es más importante que el cociente intelectual*. México: Ediciones B.

#### Libro con editor:

Castillo Ortiz, A. M. (Ed.). (2000). *Administración educativa: Técnicas, estrategias y prácticas gerenciales*. San Juan: Publicaciones Puertorriqueñas

### **Libro versión electrónica:**

Montero, M. & Sonn, C. C. (Eds.). (2009). *Psychology of Liberation: Theory and applications*. [Versión de Springer]. doi: 10.1007/978-0-387-85784-8

### **Informe técnico:**

Forma Básica

Apellidos, A. A. (Año). *Título*. (Informe Núm. xxx). Ciudad: Editorial

### **Informe con autores**

Weaver, P. L., & Schwagerl, J. J. (2009). U. S. *Fish and Wildlife Service refuges and other nearby reserves in Southwestern Puerto Rico*. (General Technical Report IITF-40). San Juan: International Institute of Tropical Forestry.

### **Informe de una agencia del gobierno**

Federal Interagency Forum on Child and Family Statistics. *America's Children: Key National Indicators of Well-Being, 2009*. Washington, DC: U.S. Government Printing Office. Recuperado de <http://www.childstats.gov/pubs/index.asp>

### **Tesis**

Forma Básica

Apellidos, A. A. (Año). *Título*. (Tesis inédita de maestría o doctorado). Nombre de la institución, Localización.

### **Tesis inédita, impresa**

Muñoz Castillo, L. (2004). *Determinación del conocimiento sobre inteligencia emocional que poseen los maestros y la importancia que le adscriben al concepto en el aprovechamiento de los estudiantes*. (Tesis inédita de maestría). Universidad Metropolitana, San Juan, PR.

### **Tesis de base de datos comercial**

Santini Rivera, M. (1998). *The effects of various types of verbal feedback on the performance of selected motor development skills of adolescent males with Down syndrome*. (Tesis doctoral). Disponible

en la base de datos ProQuest Dissertations and Theses. (AAT 9832765).

### **Tesis web**

Aquino Ríos, A. (2008). *Análisis en el desarrollo de los temas transversales en los currículos de español, matemáticas, ciencias y estudios sociales del Departamento de Educación*. (Tesis de maestría, Universidad Metropolitana). Recuperado de [http://suagm.edu/umet/biblioteca/UMTESIS/Tesis\\_Educacion/ARAquinoRios1512.pdf](http://suagm.edu/umet/biblioteca/UMTESIS/Tesis_Educacion/ARAquinoRios1512.pdf)

### **Estándares o patentes**

Forma Básica

Apellidos, A. A. Título de la patente. País y número de la patente. Clasificación de la patente, fecha de concesión oficial. Número y fecha de solicitud de la patente, paginación.

Hernández Suárez, C. A., Gómez Saavedra, V. A., & Peña Lote, R. A. Equipo medidor de indicadores de calidad del servicio de energía eléctrica para usuario residencial. Colombia., 655. G4F 10/0, 15 de Marzo 2013. 27 de Octubre 2011, 147

## **4. ENVÍO DE ARTÍCULOS**

Los autores deben enviar sus artículos a través de la aplicación para tal fin del Open Journal System en formato digital, adjuntando la carta de presentación y el formato de información artículo-autores.

### **4.1 Carta de presentación**

El artículo debe ir acompañado de una carta de presentación dirigida al director y editor de la revista, Ing. Cesar Augusto García Ubaque, donde incluya:

- Solicitud expresa de considerar su artículo para publicarlo en la revista Tecnura.
- Título completo del trabajo.
- Nombres completos de todos los autores del trabajo.
- Certificación de la originalidad y el carácter inédito del trabajo.

- Exclusividad de su remisión a la revista *Tecnura*.
- Confirmación de la autoría con la firma de todos los autores.

Esta carta deberá estar firmada por todos los autores, escanearse y enviarse junto con los demás documentos solicitados.

#### 4.2 Formato de información artículo-autores

El artículo además debe ir acompañado de un formato de información sobre el artículo y sus autores, el cual se puede descargar de la página web de la revista *Tecnura*: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>, en la sección "Formatos y Documentos". Es importante completar todos los campos de información solicitados, algunos de ellos tienen comentarios para aclarar mejor lo que se está solicitando. El formato no debe escanearse.

#### 4.3 Artículo

Artículo en formato digital (Word 2003 en adelante) que cumpla con todas las normas de presentación descritas en el capítulo 3, "Formato del artículo", de la presente en las instrucciones a los autores.

### 5. PROCEDIMIENTO PARA LA PUBLICACIÓN

El procedimiento que sigue la revista *Tecnura* para la evaluación y posible publicación de los trabajos enviados por los autores es el siguiente en orden cronológico:

1. Envío del artículo acompañado de la carta de presentación y el formato de información por parte de los autores.
2. Notificación al autor de correspondencia de la recepción del artículo.
3. Verificación del tema del artículo con respecto a las áreas de interés de la revista.
4. Verificación de las normas de presentación por parte del monitor de la revista.
5. Notificación al autor de correspondencia de la evaluación de las normas de presentación.

6. Envío de las correcciones realizadas por los autores con respecto a la evaluación de las normas de presentación.
7. Envío del artículo a los árbitros seleccionados.
8. Notificación del inicio del proceso de arbitraje del artículo.
9. Notificación a los autores de la decisión tomada por el Comité Editorial y de las evaluaciones hechas por los árbitros.
10. Envío de las correcciones realizadas por los autores con respecto a las evaluaciones de los árbitros.
11. Estudio de la versión final del artículo y de las evaluaciones de los árbitros por parte del Comité Editorial.
12. Envío por parte de los autores de la carta de cesión de derechos al editor de la revista.
13. Envío de la versión con corrección de estilo y diagramada a los autores.
14. Verificación de errores y aprobación final de la versión con corrección de estilo y diagramada por parte de los autores.
15. Publicación del artículo en el número correspondiente de la revista *Tecnura*.
16. Notificación a los autores de la publicación del número de interés.
17. Envío de un ejemplar de la revista a cada autor del artículo publicado.

### 6. PROCESO DE ARBITRAJE DE ARTÍCULOS

Considerando la periodicidad trimestral de la revista, el Comité Editorial realiza cuatro convocatorias anuales para la recepción de artículos, aproximadamente en los meses de febrero, mayo, agosto y noviembre. Los artículos serán recibidos hasta la fecha máxima establecida en cada convocatoria.

Una vez recibidos los artículos el monitor de la revista realizará una primera evaluación de forma para verificar que cumplan con todos los elementos mencionados en esta guía de instrucciones a los autores. Luego de recibir nuevamente el artículo con las correcciones de forma solicitadas por el

monitor de la revista, este será sometido a evaluación por tres pares académicos (paulatinamente se espera incorporar un mayor número de pares externos que participen en el proceso).

Cada artículo remitido a la revista *Tecnura* es revisado por dos pares académicos externos a la institución de los autores, mediante un proceso de "revisión entre pares" (*Peer-review*) de doble-ciego, garantizando el anonimato de los autores y evaluadores; se considera confidencial todo trabajo recibido y así se le exige a sus evaluadores.

Las posibles conclusiones de los resultados de la evaluación por parte de los árbitros son únicamente tres: publicar el artículo sin modificaciones, publicar el artículo con modificaciones o no publicar el artículo.

Posteriormente, el Comité Editorial toma la decisión de publicar o no los artículos, con base en los resultados de las evaluaciones realizadas por los árbitros asignados. En caso de existir contradicciones en las evaluaciones con respecto a la publicación de un artículo, el Comité Editorial enviará el artículo a un tercer árbitro y se inclinará por las dos evaluaciones que tengan el mismo concepto respecto a la publicación del artículo.

En cada convocatoria el autor de correspondencia debe sugerir al menos cuatro posibles evaluadores externos a su institución laboral, los cuales deben ser especialistas en el tema específico del artículo remitido, tener al menos maestría y por lo menos dos deben ser internacionales. Los posibles evaluadores pueden pertenecer a una universidad o industria, pública o privada; de estos se debe proporcionar el nombre completo, su formación académica más alta, su afiliación institucional y su correo electrónico. Estos cuatro potenciales

evaluadores serán analizados por el Comité Editorial a fin de ampliar la base de datos de los árbitros de la revista *Tecnura*.

El Comité Editorial de la revista *Tecnura* se reserva los derechos de impresión, reproducción total o parcial del artículo, así como el de aceptarlo o rechazarlo. Igualmente, se reserva el derecho de hacer cualquier modificación editorial que estime conveniente; en tal caso el autor recibirá por escrito recomendaciones de los evaluadores. Si las acepta, deberá entregar el artículo con los ajustes sugeridos dentro de las fechas fijadas por la revista para garantizar su publicación dentro del número programado.

## 6. CONTACTO

Para cualquier solicitud de información adicional puede comunicarse a través del correo electrónico de la revista *Tecnura*: [tecnura@udistrital.edu.co](mailto:tecnura@udistrital.edu.co), [tecnura@gmail.com](mailto:tecnura@gmail.com), o por mensajería con el Ing. Cesar Augusto García Ubaque, Director y Editor de la revista *Tecnura*, a la dirección:

Revista Tecnura  
Sala de Revistas, Bloque 5, Oficina 305.  
Facultad Tecnológica  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Transversal 70 B N. 73 a 35 sur  
Teléfono: 571 – 3238400 Extensión: 5003  
Celular: 57–3153614852  
Bogotá D.C., Colombia  
Email: [tecnura@udistrital.edu.co](mailto:tecnura@udistrital.edu.co), [tecnura@gmail.com](mailto:tecnura@gmail.com)  
Página web: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>



UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

## INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

### *Tecnura journal* District francisco José de caldas university Faculty of technology

#### CONTENT

- **Scope and editorial policy of the journal**
- **Type of accepted articles**
- **Article format**
- **Article submission**
- **Publication procedure**
- **Article arbitration**
- **Contact**

#### SCOPE AND EDITORIAL POLICY OF THE JOURNAL

*Tecnura journal* is an institutional publication of the Faculty of Technology from University Francisco José de Caldas. It is a scientific and technological publication with quarterly periodicity, which is published in January, April, July and October. The first issue appeared in the second semester of 1997 and up to now it has maintained its regularity.

The areas of interest of *Tecnura journal* are focused on all engineering fields such as electronics, telecommunications, electricity, systems, industrial, mechanics, cadastral, civil, environmental, among others. However, it is not restricted to those; it also has room for education and health issues, as long as they are related to engineering. The journal will only publish concerning scientific and technological research, reflection and revision. In consequence, during the initial editorial evaluation, short articles and case reports will be rejected.

*Tecnura Journal* is addressed for professors, researchers, students and professionals interested in permanent update of their knowledge and follow-up of scientific-technologic processes in the field of engineering. *Tecnura Journal* has as mission to disseminate results of research projects in

the areas of engineering, through the publication of original and unpublished articles, conducted by academics and professionals accredited by public or private national or foreign institutions. Articles submitted to *Tecnura journal* must be unpublished works written in Spanish or English; nevertheless, preference will be given to articles that show innovative concepts of great interest, related to the objective and scope of the journal.

*Tecnura* is an academic publication indexed in the Índice Bibliográfico Nacional Publindex (IBN) from Colciencias (Colombia) at the category A2, in the Regional Index Scielo Colombia (Colombia) and Redalyc (México); as well as of the following bibliographic databases: INSPEC of the Institution of Engineering and Technology (England), Fuente Académica Premier of EBSCO (United States), CABI (England), Index Copernicus (Poland), Informe Académico of Gale Cengage Learning (México), Periódica from the Universidad Nacional Autónoma de México (México), Oceanet (Spain) and Dialnet from the Universidad de la Rioja (Spain). It is also part of the following directories: Online Regional Information System for Scientific journals from Latin America, Caribbean, Spain and Portugal Latindex (México), Bibliographic Index Actualidad Iberoamericana (Chile), e-Revistas (Spain), DOAJ (Sweden) and Ulrich of Proquest (United States).

*Tecnura* is a journal arbitrated by a revision process among double blind peers. The schedule of the conformation of its scientific and editorial committee is subject to the publication of articles in internationally indexed journals by their members.

District University Francisco José de Caldas, its directors, the editor, the editorial and scientific committee are not responsible for the opinions and the criteria expressed in the content of the articles

and they are published under the exclusive responsibility of the authors and do not necessarily reflect the ideas of the editorial committee.

In addition to the printed version, Tecnura journal also has a digital version available in its web page: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/index>

## TYPE OF ARTICLES ACCEPTED

According to the classification of the Scientific and Technological Publications National Index (Publindex-Colciencias), *Tecnura* journal receives nominations of unpublished articles on the following topics:

- ***Scientific and technological research articles:*** document that presents, in a detailed manner, the original results of research projects. The generally used structure contains four main parts: introduction, methodology, results and conclusions.
- ***Reflection articles:*** document that presents research results from an analytic, interpretative or critic perspective from the author, dealing with a specific topic and adopting original sources.
- ***Review article:*** document that results from a research where the results of published or unpublished research on a science or technology field are analyzed, systematized and integrated, in order to state the advances and tendencies in development. It is characterized for presenting a careful bibliographical review of at least 50 references.

## ARTICLE FORMAT

### About the appropriate language and style for articles writing

- Authors must use simple sentence structures, avoiding those too long or complex.
- The vocabulary used must be basic and common. Technical language must be briefly explained; also, the meaning of the acronyms must be given the first time they appear in the text.
- The authors are responsible for their work to be conducted in a professional and ethic manner.

### About the length of articles

The articles should not exceed 25 pages in letter size and double space, with symmetric margins of 3 cm. Only in the case of review articles, these 25 pages do not include references.

### About the presentation format

Submitted articles must be unpublished works written in Spanish or English, and must be typed in Microsoft Word (2003 and beyond), complying with the following indications:

- *Times New Roman* letter, 12 point (except it is required for some sections).
- One column, double-spaced.
- All the margins 3 cm.
- Paragraphs should be justified without spaces between consecutives and without cutting words.
- Do not include page breaks or section finals.
- If you want to emphasize words or phrases from the text, do not use bold letters but italic.
- Decimals should be pointed with comma (,) and not with period (.).
- Thousands and millions should be pointed with a fine space.
- Avoid footnotes.
- Arabic nomenclature must be used only until the third level.

### About the article structure

The papers must have the following structure and comply with the following requirements:

### Composition of an article

All the articles submitted for evaluation and possible publication by the Tecnura Journal must have at least the following components:

- Title in Spanish and English.
- Information about the authors.
- Abstract in Spanish and English.

- Key words in Spanish and English.
- Introduction.
- Conclusions.
- Future work (optional).
- Acknowledgements (optional).
- Bibliographical references.

If the article is related to scientific and technological research must have, in addition to the above, the following components:

- Methodology.
- Results.
- Financing.

### *Title*

The title of the article must be short or divided in title and subtitle, attractive for the potential reader and written in capital letters. It should appear centered between the margins, written in *Times New Roman* letter, in bold, font size 18. The title of the article has to be in Spanish and English separated by double space. Maximum 20 words.

### *Authors*

After the title the complete name(s) of the author(s) must be written, with their basic biographical data: undergraduate degree, graduate degree, occupation or position, institutional affiliation (institution where they work), dependency, city, country and e-mail. The above information must be immediately below the author's name.

### *Abstract*

The scope and purpose of the work must be established giving a clear and concise description of the methodology, results presented and the conclusions obtained. Maximum of 250 words.

### *Keywords*

Between three and ten keywords must be chosen, written in English with *Times New Roman* letter in bold and italic.

Key words must be written in alphabetic order and must be as standard as possible, for which it is suggested the use of international databases according to the area of knowledge. For example, in the area of Electrics and Electronics it is suggested to use the IEEE thesaurus and World Bank thesaurus that can be accessed at the following web pages respectively:

[http://www.ieee.org/documents/2009Taxonomy\\_v101.pdf](http://www.ieee.org/documents/2009Taxonomy_v101.pdf)

<http://multites.net/mtsql/wb/site/default.asp>

### *Abstract in Spanish*

Translation to the Spanish language of the text that appears in the abstract, it must be correct and precise.

### *Keywords in Spanish*

Translation to the English language of the keywords in Spanish, they must be correct and precise.

Keywords must be written in the order of the English version and must be as standard as possible, for which it is suggested the use of international databases according to the area of knowledge. For example, in the area of Electrics and Electronics it is suggested to use the UNESCO thesaurus that can be found at the following web pages:

<http://databases.unesco.org/thessp>

### *Introduction*

The general idea of the work must be described, its context, backgrounds, state of the art of the topic, objectives and possible scope of the work.

### *Methodology*

The writing of this part must allow any specialized professional in the topic to replicate the research.

### *Results*

Explanation and interpretation of the findings. If necessary, a brief discussion focused on the interpretation of the results can be presented.

### *Conclusions*

Implication of the results and their relation to the proposed objective.

### *Financing*

Mention the associated research from which the article was derived and the entity that endorsed and financed the research.

### *Acknowledgments*

They should preferably be brief and include the essential contributions for the development of the paper.

### *Equations*

Equations must appear centered with respect to the main text. They must be referenced with consecutive numbers (written in parenthesis close to the right margin). Equations are cited in the main text employing the word equation, and followed by the number in parenthesis. Equations must be made in an appropriate equation editor and compatible with "InDesign" software, as for example the equation editor of Windows.

### *Tables*

In the case of implementation of tables, it is recommended that these are not inserted as images, considering that in that format they cannot be modified. The title of each table must include the word table (in italic) followed by the corresponding consecutive number and a brief name of the table. The heading must be written in TNR letter, italic and font size 9.

Charts are not presented but tables and they should be automatically raised from the text processor. Tables should be named and referenced in the article, in strict order. Every table must have at the bottom the source from which it was taken, or to mention self-authorship if it is the case.

### *Figures*

All the figures or pictures have to be sent in JPG or PNG format with a minimum resolution of 300 DPI, adapted to gray scale.

The footnote or name of each figure must include the word figure (in italic) followed by the corresponding consecutive number and a brief description of the content of the figure. The footnote of the figure must be written in *Times New Roman* letter, italic and font size 9. Figures must be named and referenced in the article, in strict order. Every figure must have at the bottom the source from which it was taken, or to mention self-authorship if it is the case.

### *Symbols*

The symbols of the constants, variables and functions in Latin or Greek letters –included in the equations- must be in italic; the mathematical symbols and the numbers do not go in italic. The symbols must be identified immediately after the equation. Units, dimensions and symbols of the international system must be used

When using acronyms or abbreviations, the complete equivalence should be written first, followed by the corresponding acronym or abbreviation in parenthesis and from there it is only written the respective acronym or abbreviation.

### *Bibliographic references*

The adopted reference citation style by *Tecnura* journal is APA sixth edition. The cites, bibliographic references and infography are included in the last part of the article. The bibliographic references must be alphabetically ordered according to the author's first surname, without numbering.

There should only appear the cited references in the main body of the work, in tables or in figures. It means, in the list there should not appear other references although they have been consulted by the authors for the work preparation. We suggest using tools such as: Cites and bibliography from Microsoft Word (for APA sixth edition version 2013 or superior), Zotero, Mendeley, among others.

The call for a bibliographic reference is inserted in the text, at the pertinent point, under certain characteristics:

- If the sentence includes the author's surname, it should only be written the date into a parenthesis, for instance:

Cuando Vasco (2012), analizó el problema de presentado en ....

- When the author is not included in the sentence, surname and date must be into a parenthesis.

La investigación de materiales dio una visión en el área (Martínez, 2012).

- If the document or work has more than two authors, the first cite must include all the surnames.

1990. (Fernández Morales, Villa Krieg & Caro de Villa, 2008) ....

- In the following mentions, it must only be written the author's first surname, followed by "et al.".

En cuanto al estudio de las aguas, Fernández Morales et al. (2008) encontraron que ...

- When the document or work has more than six authors, it must be used from the first mention "et al.".

Next it is described a series of examples of the more used references, according to the reference style adopted by *Tecnura* journal:

### **Periodical Publications:**

#### Basic Form

Surnames, A. A., Surnames, B. B. & Surnames, C. C. (Date). Article's title. *Title of the publication*, volume (number), pp. xx-xx. doi: xx.xxxxxxx

#### Basic article

Guevara López, P., Valdez Martínez, J., Agudelo González, J., & Delgado Reyes, G. (2014). Aproximación numérica del modelo epidemiológico SI para la propagación de gusanos informáticos, simulación y análisis de su error. *Revista Tecnura*, 18(42), 12 -23. doi:http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.4.a01

#### Web article

Rodríguez Páez, S., Fajardo Jaimes, A., & Páez Rueda, C. (2014). Híbrido rat-race miniaturizado para la banda ISM 2,4 GHz. *Revista Tecnura*, 18(42),

38-52. Recuperado de <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/article/view/8059/9675>

### **Books:**

#### Basic Form

Surnames, A. A. (Year). *Title*. City: Editorial.

Surnames, A. A. (Year). *Title*. Recovered from <http://www.xxxxxx.xxx>

Surnames, A. A. (Year). *Title*. doi: xx.xxxxxxxx

Surnames, A. A. (Ed.). (Year). *Title*. City: Editorial.

#### Book with author

Goleman, D. (2000). *La inteligencia emocional: Por qué es más importante que el cociente intelectual*. México: Ediciones B.

#### Book with editor:

Castillo Ortiz, A. M. (Ed.). (2000). *Administración educativa: Técnicas, estrategias y prácticas gerenciales*. San Juan: Publicaciones Puertorriqueñas

#### Book electronic version:

Montero, M. & Sonn, C. C. (Eds.). (2009). *Psychology of Liberation: Theory and applications*. [Versión de Springer]. doi: 10.1007/ 978-0-387-85784-8

### **Technical report:**

#### Basic Form

Surnames, A. A. (Year). *Title*. (Report No. xxx). City: Editorial

#### Report with authors

Weaver, P. L., & Schwagerl, J. J. (2009). *U. S. Fish and Wildlife Service refuges and other nearby reserves in Southwestern Puerto Rico*. (General Technical Report IITF-40). San Juan: International Institute of Tropical Forestry.

#### Report from a Government agency

Federal Interagency Forum on Child and Family Statistics. *America's Children: Key National Indicators of Well-Being, 2009*. Washington, DC: U.S. Government Printing Office. Recuperado de <http://www.childstats.gov/pubs/index.asp>

**Thesis****Basic form**

Surnames, A. A. (Year). Title. (Unpublished master or doctorate thesis). Institution name, Location.

**Unpublished thesis, printed**

Muñoz Castillo, L. (2004). *Determinación del conocimiento sobre inteligencia emocional que poseen los maestros y la importancia que le adscriben al concepto en el aprovechamiento de los estudiantes*. (Tesis inédita de maestría). Universidad Metropolitana, San Juan, PR.

**Commercial database thesis**

Santini Rivera, M. (1998). *The effects of various types of verbal feedback on the performance of selected motor development skills of adolescent males with Down syndrome*. (Tesis doctoral). Disponible en la base de datos ProQuest Dissertations and Theses. (AAT 9832765).

**Web thesis**

Aquino Ríos, A. (2008). *Análisis en el desarrollo de los temas transversales en los currículos de español, matemáticas, ciencias y estudios sociales del Departamento de Educación*. (Tesis de maestría, Universidad Metropolitana). Recuperado de [http://suagm.edu/umet/biblioteca/UMTESIS/Tesis\\_Educacion/ARAquinoRios1512.pdf](http://suagm.edu/umet/biblioteca/UMTESIS/Tesis_Educacion/ARAquinoRios1512.pdf)

**Standards or patents****Basic form**

Surnames, A. A. Title of the patent. Country and number of the patente. Classification of the patent, date of official license. Number and date of patent request, pagination.

Hernández Suárez, C. A., Gómez Saavedra, V. A., & Peña Lote, R. A. Equipo medidor de indicadores de calidad del servicio de energía eléctrica para usuario residencial. Colombia., 655. G4F 10/0, 15 de Marzo 2013. 27 de Octubre 2011, 147

**ARTICLE SUBMISSION**

Authors must submit their articles through the application Open Journal System in digital format, attaching the cover letter and the article-authors format.

**Cover letter**

The article must be submitted with a cover letter addressed to the director and editor of the journal, Engineer Cesar Augusto Garcia Ubaque, including:

- Specific request to consider your article to be published in Tecnura journal.
- Full title of the article.
- Full names of all the authors of the paper.
- Certification of the originality and unpublished character of the paper.
- Exclusivity of submission to Tecnura journal.
- Authoring confirmation with signature of all the authors.

This letter must be signed by all the authors, scanned and sent with the remaining requested documents.

**Article-authors information format**

The article has to be submitted with an information format about the article and its authors which can be downloaded from the web page of Tecnura journal <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/index>, in the section "Forms and Documents". It is important to complete all the fields of information requested, some of them have comments to clarify better what is being requested. The format must not be scanned.

**Article**

Article in digital format (Word 2003 and later editions) that complies with all the presentation rules described in chapter three, "Article structure", of this guide of instructions for authors.

## PUBLICATION PROCEDURE

The procedure to be followed by Tecnura journal for the evaluation and possible publication of the papers sent by the authors is the following in chronological order:

1. Delivery of the article with the cover letter and the information format by the authors.
2. Notification to the author about the reception of the article.
3. Verification of the presentation rules by the monitor of the journal.
4. Notification to the author about the evaluation of the presentation rules.
5. Submission of corrections made by the authors related to the evaluation of presentation rules.
6. Submission of the articles to the selected arbitrators.
7. Notification of the beginning of the arbitration process of the article.
8. Notification to the authors about the decision made by the editorial committee, and about the evaluations made by the arbitrators.
9. Delivery of the corrections made by the authors with respect to the evaluations made by the arbitrators.
10. Study of the final version of the article and the evaluations of the arbitrators by the editorial committee.
11. Delivery by the authors of the letter that surrenders right to the editor of the journal.
12. Submission of the version with style corrections and diagrammed to the authors.
13. Verification of errors and final approval of the version with style corrections and diagrammed by the authors.
14. Publication of the article in the corresponding number of Tecnura journal.
15. Notification to the authors of the number of interest.
16. Delivery of a copy of the journal to each one of the authors of the published article.

## ARTICLE ARBITRATION PROCESS

Considering the quarterly periodicity of the journal, the Editorial Committee makes four calls every year for the submission of articles, approximately in the months of February, May, August and November. The articles will be received until the date established in the call.

Once received the articles, the monitor of the journal will make an initial form evaluation to verify the completion of the elements mentioned in this guide of instructions to authors. After receiving again the article with the requested corrections by the journal's monitor, the paper will be submitted to evaluation by three academic peers (through time it is expected to include more external peers to participate in the process).

Each article sent to Tecnura journal is checked by two expert academic peers external to the institution of the authors, by a process of "Peer-review" of double blind, guaranteeing the anonymity of authors and evaluators; every paper sent is considered confidential and so it is demanded to evaluators.

Possible conclusions of the result of the evaluation by the judges are only three: publish the article without modifications, publish the article with modifications and not publish the article.

Subsequently, the Editorial Committee takes the decision to publish or not the articles, based on the results of the evaluations made by the assigned arbitrators. In case of contradictions in the evaluations with respect to the publication of an article, the editorial committee will send the article to a third peer and will be inclined for the two evaluations that have the same concept with respect to the publication of the article.

In each call the main author must suggest at least four possible external arbitrators to his work institution evaluators, who must be specialists in the specific topic of the article sent and must have at least Masters level, and at least two must to be international. Potential evaluators can belong to a university or industry, public or private; their

complete names must be provided, highest academic formation, institutional affiliation and e-mail. The editorial committee will analyze these four potential evaluators in order to enrich the database of arbitrators of *Tecnura* journal.

The Editorial Committee of *Tecnura* journal reserves the right to print, reproduce total or partially the article, as the right to accept or reject it. In the same way, it has the right to make any editorial modification that considers necessary; in this case the author will receive written recommendations from the evaluators. If accepted, authors must deliver the article with the suggested adjustments within the dates given by the journal to guarantee its publication in the programmed number.

## CONTACT

For any additional information request, please send an e-mail to *Tecnura* journal [tecnura@udistrital.edu.co](mailto:tecnura@udistrital.edu.co), [tecnura@gmail.com](mailto:tecnura@gmail.com) or by mail to Cesar Augusto Garcia Ubaque, Director and Publisher of *Tecnura* Journal, to the following address:

*Tecnura* Journal

Journals Room, Block 5, Office 305.

Faculty of Technology

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Transversal 70 B N. 73 a 35 sur

Phone: 571-3238400 Extension: 5003

Mobile: 57-3153614852

Bogotá D.C., Colombia

Email:

[tecnura@udistrital.edu.co](mailto:tecnura@udistrital.edu.co), [tecnura@gmail.com](mailto:tecnura@gmail.com)

Web page:

[http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/](http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/index)

[Tecnura/index](http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/index)



UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

## SUSCRIPCIÓN

### Revista *Tecnura*

Nombre completo: \_\_\_\_\_  
Institución u organización: \_\_\_\_\_  
Factura a nombre de: \_\_\_\_\_  
Dirección de envío: \_\_\_\_\_  
Ciudad: \_\_\_\_\_ Departamento, Estado o provincia: \_\_\_\_\_  
Código postal: \_\_\_\_\_ Apartado aéreo / P.O. Box: \_\_\_\_\_  
País: \_\_\_\_\_ Correo electrónico: \_\_\_\_\_  
Teléfono: \_\_\_\_\_ Fax: \_\_\_\_\_ Firma: \_\_\_\_\_

Tabla de costos de suscripción:

Región	1 Año	2 Años
Bogotá	40 000 COP	70 000 COP
Colombia	45 000 COP	80 000 COP
América Latina y el Caribe	40 USD	70 USD
Estados Unidos y Canadá	40 USD	70 USD
Otras regiones	60 USD	100 USD

**Nota:** los precios tanto en dólares como en pesos incluyen el valor del envío.

Diligenciar el formato de suscripción y enviarlo por correo junto con la copia del recibo de consignación a la dirección postal que aparece en el parte inferior de esta página o escaneado a los correos electrónicos [tecnura@udistrital.edu.co](mailto:tecnura@udistrital.edu.co) y [tecnura@gmail.com](mailto:tecnura@gmail.com). La consignación nacional se realiza en el Banco de Occidente a nombre de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas en la cuenta de ahorros número 230-81461-8.

#### Canje y suscripciones

Enviar a Ing. César Augusto García Ubaque, PhD.  
Director y Editor Revista *Tecnura*

#### Biblioteca

Facultad Tecnológica  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Transversal 70B No. 73A - 35 sur  
Teléfono: +57 - 1 - 7311542  
Celular: +57 - 3153614852  
Bogotá, D.C., Colombia  
Correo electrónico: [tecnura@udistrital.edu.co](mailto:tecnura@udistrital.edu.co) [tecnura@gmail.com](mailto:tecnura@gmail.com)  
Tecnura en internet: <http://tecnura.udistrital.edu.co>



UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

## SIGN UP

### *Tecnura journal*

Full name: \_\_\_\_\_  
Institution or organization: \_\_\_\_\_  
Invoice name: \_\_\_\_\_  
Mailing address/address: \_\_\_\_\_  
City: \_\_\_\_\_ Department, state or province: \_\_\_\_\_  
Zip code: \_\_\_\_\_ P.O. Box: \_\_\_\_\_  
Country: \_\_\_\_\_ E-mail: \_\_\_\_\_  
Phone number: \_\_\_\_\_ Fax: \_\_\_\_\_ Signature: \_\_\_\_\_

Table of subscription costs:

Región	1 year	2 year
Bogotá	23 USD	40 USD
Colombia	26 USD	46USD
Latin America and The Caribbean	40 USD	70 USD
The United States of America and Canada	40 USD	70 USD
Other regions	60 USD	100 USD

**Note:** prices in both dollars and pesos include the value of the shipment.

Fill out the subscription form and mail it along with a copy of the receipt of consignment to the e-mail address that appears in the bottom of this page or scanned to the following E-mails: [tecnura@udistrital.edu.co](mailto:tecnura@udistrital.edu.co) and [tecnura@gmail.com](mailto:tecnura@gmail.com). The national bank deposit is done in Banco de Occidente in the name of Universidad Distrital Francisco José de Caldas in the savings account number 230-81461-8.

#### **Exchange and Subscription**

Send Ing Cesar Augusto Garcia Ubaque PhD.  
Editor and Publisher Tecnura Journal

#### **Library**

Technology Faculty  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Transversal 73A No. 70B-35 Sur  
Phone: +57 - 1 - 7311542  
Mobile: +57-3153614852  
E-mail: [tecnura@udistrital.edu.co](mailto:tecnura@udistrital.edu.co), [tecnura@gmail.com](mailto:tecnura@gmail.com)