

<b>EDITORIAL</b> CÉSAR AUGUSTO GARCÍA UBAQUE	10	<b>REVISIÓN</b> Aplicación de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red: estado del arte Grid-connected photovoltaic systems application: state of the art	157
<b>INVESTIGACIÓN</b> Problema de tomografía local usando wavelets B-spline cúbicos Local tomography problem using cubic B-spline wavelets	13	JOHANN ALEXANDER HERNÁNDEZ MORA, ANDRÉS FELIPE CORTÉS BORRAY DANIEL ALBERTO BALAGUERA CAÑOLA, MAURICIO ALEXANDER URUEÑA SAAVEDRA	
Resistencia bajo carga monotónica de mezclas de concreto asfáltico modificadas con gilsonita por vía seca Monotonic loading strength of hot asphalt mixtures modified with gilsonite by dry-way	31	<b>ESTUDIO DE CASO</b> Diseño y construcción de un fotogoniómetro para el laboratorio de iluminación de la Universidad Distrital, Sede tecnológica Design and construction of a goniophotometer for the lighting laboratory at District University, faculty of technology	173
HUGO ALEXANDER RONDÓN QUINTANA, EDGAR HUMBERTO SÁNCHEZ COTTE, JESÚS ORLANDO CASTAÑO TABARES		JOSÉ DAVID CORTÉS TORRES, WILSON FERNANDO RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ, HUGO ARMANDO CÁRDENAS FRANCO	
Cuantificación de existencias de compuestos bifenilos policlorados (PCB) en Colombia Stocks quantification of polychlorinated biphenyl compounds (PCB) in Colombia	39	<b>Aplicación al control de procesos batch</b> Application to batch process control	189
MARTHA LUCÍA VACA BOHÓRQUEZ, CÉSAR AUGUSTO GARCÍA UBAQUE, JUAN CARLOS GARCÍA UBAQUE		ENRIQUE YAMIL GARZÓN GONZÁLEZ, CARLOS EDUARDO COTRINO BADILLO	
Ánalisis del modelo eléctrico del mecanismo de hurto de energía eléctrica más utilizado en el sector industrial de Bogotá Analysis of the electrical model for the electric power theft mechanism widely used in the industrial sector in Bogotá	45	<b>Prototipo de sistema experto en diagnóstico médico basado en síntomas de los pacientes. Caso de estudio: esclerosis múltiple</b> Expert system prototype on medical diagnosis based on patients' symptoms. Case study: multiple sclerosis	205
YAOQUELINE GARZÓN RODRÍGUEZ, CÉSAR ANDRÉS DONCEL DÍAZ		JUAN GUILLERMO RIVERA BERRÍO, HÉCTOR ANÍBAL TABARES OSPINA	
Modelo para identificación de cargas perturbadoras de la calidad de potencia eléctrica en cuanto al fenómeno armónico en una s/e Model for identifying disturbing loads of electric power quality in terms of the harmonic phenomenon in s/e	55	<b>Prototipo de emulación de movimiento humano mediante una plataforma bípeda humanoide</b> Prototype for human movement emulation by means of a bipedal humanoid platform	217
JULIO CÉSAR MORENO CAÑÓN, CHARLES AGUIRRE BUITRAGO, LUIS ANTONIO NOGUERA VEGA		MILTON VICENTE CALDERÓN COY, CÉSAR AUGUSTO CORONEL SEGRERA ESPERANZA CAMARGO CASALLAS	
Using the delaunay triangulation and voronoi diagrams for navigation in observable environments Uso de la triangulación de delaunay y los diagramas de voronoi para navegación en ambientes observables	81	<b>Sistema de alta disponibilidad basado en plataforma de virtualización para pequeñas y medianas empresas</b> High availability system based on virtualization platform for small & medium businesses	231
FERNANDO MARTÍNEZ SANTA, FREDY HERNÁN MARTÍNEZ SARMIENTO, EDWAR JACINTO GÓMEZ		LUIS FELIPE WANUMEN SILVA, DARIN JAIRO MOSQUERA PALACIOS	
Identificación de lesiones cerebrales de esclerosis múltiple en imágenes de resonancia magnética mediante análisis de textura Identification of multiple sclerosis brain lesions in magnetic resonance imaging using texture analysis	89	<b>REFLEXIÓN</b> Accesibilidad territorial: instrumento de planificación urbana y regional Territorial accessibility: instrument for urban and regional planning	241
CÉSAR AUGUSTO ALDANA RAMÍREZ, NELSON FABIÁN OROZCO HIGUERA, SAMUEL BARRETO MELO		DIEGO ALEXANDER ESCOBAR GARCÍA, CARLOS FELIPE URAZÁN BONELLS	
Metodología de evaluación de usabilidad de interfaces humano-máquina Usability evaluation methodology of human-machine interfaces	103	<b>La formación lingüística en la educación superior</b> Linguistic education in higher education	255
LUINI LEONARDO HURTADO CORTÉS, JHON ALEJANDRO FORERO CASALLAS		NEVIS BALANTA CASTILLA, DAVID NAVARRO MEJÍA	
Refrigeración de gabinetes de transmisión de datos por tubos de calor Refrigeration of data transmission boxes by heat pipe systems	115	<b>La responsabilidad por culpa patronal en el accidente o enfermedad laboral</b> Employer's liability on work accidents or disease	263
JORGE ANDRÉS GAITÁN TRIANA, CAMILO ANDRÉS ARIAS HENAO		GUILLERMO EDUARDO ALFONSO GUTIÉRREZ	
Evaluación de los protocolos MAC IEEE 802.11 y MMAC-CR en una red MANET Evaluation of MAC IEEE 802.11 and MMAC-CR protocols within a MANET	125	<b>DIVULGACIÓN</b> Comunidad científica y tecnológica, ha llegado la oficina que te acompañará en la transferencia de tu conocimiento Scientific and technological community, The office that will accompany you in knowledge transfer has come	273
JUDY C. GUEVARA, LUIS FERNANDO PEDRAZA MARTÍNEZ, CÉSAR AUGUSTO HERNÁNDEZ SUÁREZ		277	
Simulación y análisis del comportamiento del BER y Throughput en capa física de WIMAX IEEE 802.16-2004 en ambientes con presencia de AWGN y Rayleigh Fading Simulation and analysis of BER and throughput performance in WIMAX physical layer IEEE 802.16-2004 in the presence of AWGN and Rayleigh Fading	135	Check out project emprendetronika DORIS MARLENE OLEA, PABLO EMILIO GARZÓN, HENRY MONTAÑA	
ELIZABETH OCHOA TORRES, MANUEL IGNACIO CASTRO OLAYA, ERNESTO GÓMEZ VARGAS		<b>Instrucciones para los autores</b> Instructions for authors	281
		<b>Suscripción</b> Sign Up	288
			295
			296

Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Facultad Tecnológica

ISSN 0123-921X  
Edición Especial 2014

Tecnura

Revista Tecnura • Edición Especial • Septiembre 2014  
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

Using the delaunay triangulation and voronoi diagrams for navigation in observable environments

Simulación y análisis del comportamiento del BER y Throughput en capa física de WIMAX IEEE 802.16-2004 en ambientes con presencia de AWGN y Rayleigh Fading

Aplicación de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red: estado del arte



UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

ISSN 0123-921001  
9770123921001

# **Tecnura**

Tecnología y cultura, afirmando el conocimiento

Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Facultad Tecnológica

Edición Especial  
Septiembre 2014  
p-ISSN: 0123-921X  
e-ISSN: 2248-7638



UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

## 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. 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

## 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 Martírena  
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. Angela Zona Ortiz  
Universidad Sergio Arboleda, Colombia

Ph.D. (c) Carlos Gregorio Pastran Beltrán  
Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, Colombia

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

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

Msc. Ana Cecilia Villa Parra  
Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador

M.Sc. Carlos Alfredo Vásquez Rodríguez  
Universidad INCCA de Colombia, Colombia

M.Sc. César Leonardo Trujillo Rodríguez  
Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, Colombia

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

M.Sc. Henry Montaña Quintero  
Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, Colombia

M.Sc. Javier Enrique Arévalo Peña  
Fundación Universidad Autónoma de Colombia, Colombia

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

M.Sc. John Alejandro Forero Casallas  
Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, Colombia

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

M.Sc. William Vallejo Quintero  
Institución Universitaria Pascual Bravo, Colombia

## ASISTENTES DE LA REVISTA TECNURA

Ing. Hans Raúl Márquez Ramos  
Ing. Diego Armando Giral Ramírez

## COORDINACIÓN EDITORIAL

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

# Tecnura

Edición Especial  
Septiembre 2014

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) y CABI (Reino Unido).

## 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 - 3239300, extensión: 5003  
Celular: 57 - 3153614852  
Bogotá, D.C., Colombia

Correo electrónico:  
tecnura@udistrital.edu.co  
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

Hernando García Bustos

## CORRECCIÓN DE ESTILO PARA INGLES

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

## EDITOR

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

## EDITORIAL COMMITTEE

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 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. (c) Carlos Gregorio Pastran Beltrán  
Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, Colombia

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

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

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

Msc. Ana Cecilia Villa Parra  
Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador

M.Sc. Carlos Alfredo Vásquez Rodríguez  
Universidad INCCA de Colombia, Colombia

M.Sc. César Leonardo Trujillo Rodríguez  
Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, Colombia

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

M.Sc. Henry Montaña Quintero  
Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, Colombia

M.Sc. Javier Enrique Arévalo Peña  
Fundación Universidad Autónoma de Colombia, Colombia

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

M.Sc. John Alejandro Forero Casallas  
Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, Colombia

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

M.Sc. William Vallejo Quintero  
Institución Universitaria Pascual Bravo, Colombia

## TECNURA JOURNAL ASSISTANTS

Ing. Hans Raúl Márquez Ramos  
Ing. Diego Armando Giral Ramírez

## EDITORIAL COORDINATION

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

# Tecnura

Edición Especial  
Septiembre 2014

**Tecnura Journal** is an institutional publication scientific-technological of the Technological Faculty of the District Francisco José de Caldas University, checked by means of an evaluation process between double-blind peer. The periodicity of team up its Scientific and Editorial committees is attached to the publication of articles in indexed magazines internationally by its own members.

## PERIODICITY

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

## THEMATIC COVERAGE

The interested thematic areas of **Tecnura journal** are focused on all fields of engineering such as electronical, telecommunications, electrical, computer, industrial, mechanical, cadastral, civil, environmental, etc, however, these ones are not restricted only, topics about education and health topics as well, if they are related to engineering. The journal will only publish scientific and technological articles of researching, reflection and revision.

## MISSION

**Tecnura journal** has as mission to publish research projects scores done in engineering by means of original and unpublished articles achieved by academics and professionals from national or international public or private institutions.

## TARGET AUDIENCE

**Tecnura journal** is directed to teachers, researchers, students and professionals interested in permanent update of their knowledge and the monitoring of the scientific-technological researching process, in engineering field.

## INDEXING

**Tecnura** is an academic publication indexed in the Índice Bibliográfico Nacional Publindex (IBN) de Colciencias (Colombia) in the category A2, in the Regional Index Scielo Colombia (Colombia) and Redalyc (México); besides 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 of the Universidad Nacional Autónoma de México (México), Oceanet (Spain) and Dialnet of the Universidad de la Rioja (Spain); also part of the following directories: regional information system for scholarly journals online 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) and CABI (United Kingdom).

## 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 the value of the shipment). The annual sign up is 28 USD for Colombia; 40 USD in Latin America the Caribbean; 60 USD in other regions (the price include the value of the shipment). 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 not necessarily shown the thought of the editorial committee of the journal.

## POSTAL ADDRESS

Send to Ing. Cesar Augusto García Ubaque Ph.D. Director and Editor Revista **Tecnura**  
Sala de Revistas, Bloque 5, Oficina 305.  
Technological Faculty  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Transversal 70B No. 73A - 35 sur  
Telephone Number: 571 - 3239300, 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

Hernando García Bustos

## STYLE CORRECTION IN ENGLISH

Francisco Suárez Díaz

## ELECTRÓNICA LAYOUT AND TITLE PAGE DISEÑO

Julián Hernández - Taller de Diseño

## PRINTED BY

Press Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas  
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 confluyan 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

CÉSAR AUGUSTO GARCÍA UBAQUE

DIRECTOR

## INVESTIGACIÓN

### Problema de tomografía local usando wavelets B-spline cúbicos

Local tomography problem using cubic B-spline wavelets

WILMAR ALBERTO DÍAZ OSSA, HAROLD VACCA GONZÁLEZ

### Resistencia bajo carga monotónica de mezclas de concreto asfáltico modificadas con gilsonita por vía seca

Monotonic loading strength of hot asphalt mixtures modified with gilsonite by dry-way

HUGO ALEXANDER RONDÓN QUINTANA, EDGAR HUMBERTO SÁNCHEZ COTTE, JESÚS ORLANDO CASTAÑO TABARES

### Cuantificación de existencias de compuestos bifenilos policlorados (PCB) en Colombia

Stocks quantification of polychlorinated biphenyl compounds (PCB) in Colombia

MARTHA LUCÍA VACA BOHÓRQUEZ, CÉSAR AUGUSTO GARCÍA UBAQUE, JUAN CARLOS GARCÍA UBAQUE

### Análisis del modelo eléctrico del mecanismo de hurto de energía eléctrica más utilizado en el sector industrial de Bogotá

Analysis of the electrical model for the electric power theft mechanism widely used in the industrial sector in Bogotá

YAQUELINE GARZÓN RODRÍGUEZ, CÉSAR ANDRÉS DONCEL DÍAZ

### Modelo para identificación de cargas perturbadoras de la calidad de potencia eléctrica en cuanto al fenómeno armónico en una s/e

Model for identifying disturbing loads of electric power quality in terms of the harmonic phenomenon in s/e

JULIO CÉSAR MORENO CAÑÓN, CHARLES AGUIRRE BUITRAGO, LUIS ANTONIO NOGUERA VEGA

10

### Using the delaunay triangulation and voronoi diagrams for navigation in observable environments

Uso de la triangulación de delaunay y los diagramas de voronoi para navegación en ambientes observables

FERNANDO MARTÍNEZ SANTA, FREDY HERNÁN MARTÍNEZ SARMIENTO, EDWAR JACINTO GÓMEZ

13

### Identificación de lesiones cerebrales de esclerosis múltiple en imágenes de resonancia magnética mediante análisis de textura

Identification of multiple sclerosis brain lesions in magnetic resonance imaging using texture analysis

CÉSAR AUGUSTO ALDANA RAMÍREZ, NELSON FABIÁN OROZCO HIGUERA, SAMUEL BARRETO MELO

31

### Metodología de evaluación de usabilidad de interfaces humano-máquina

103  
Usability evaluation methodology of human-machine interfaces

LUINI LEONARDO HURTADO CORTÉS, JHON ALEJANDRO FORERO CASALLAS

39

### Refrigeración de gabinetes de transmisión de datos por tubos de calor

115  
Refrigeration of data transmission boxes by heat pipe systems

JORGE ANDRÉS GAITÁN TRIANA, CAMILO ANDRÉS ARIAS HENAO

45

### Evaluación de los protocolos MAC IEEE 802.11 y MMAC-CR en una red MANET

125  
Evaluation of MAC IEEE 802.11 and MMAC-CR protocols within a MANET

JUDY C. GUEVARA, LUIS FERNANDO PEDRAZA MARTÍNEZ, CÉSAR AUGUSTO HERNÁNDEZ SUÁREZ

65

### Simulación y análisis del comportamiento del BER y Throughput en capa física de WIMAX IEEE 802.16-2004 en ambientes con presencia de AWGN y Rayleigh Fading

135  
Simulation and analysis of BER and throughput performance in WIMAX physical layer IEEE 802.16-2004 in the presence of AWGN and Rayleigh Fading

ELIZABETH OCHOA TORRES, MANUEL IGNACIO CASTRO OLAYA, ERNESTO GÓMEZ VARGAS

81

89

103

135

## REVISIÓN

- Aplicación de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red: estado del arte** 157  
Grid-connected photovoltaic systems application: state of the art  
JOHANN ALEXANDER HERNÁNDEZ MORA, ANDRÉS FELIPE CORTÉS BORRAY DANIEL ALBERTO BALAGUERA CAÑOLA, MAURICIO ALEXANDER URUEÑA SAAVEDRA

## ESTUDIO DE CASO

- Diseño y construcción de un fotogoniómetro para el laboratorio de iluminación de la Universidad Distrital, Sede tecnológica** 173  
Design and construction of a goniophotometer for the lighting laboratory at District University, faculty of technology  
JOSÉ DAVID CORTÉS TORRES, WILSON FERNANDO RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ, HUGO ARMANDO CÁRDENAS FRANCO

- Aplicación al control de procesos batch** 189  
Application to batch process control  
ENRIQUE YAMID GARZÓN GONZÁLEZ, CARLOS EDUARDO COTRINO BADILLO

- Prototipo de sistema experto en diagnóstico médico basado en síntomas de los pacientes. Caso de estudio: esclerosis múltiple** 205  
Expert system prototype on medical diagnosis based on patients' symptoms. Case study: multiple sclerosis  
JUAN GUILLERMO RIVERA BERRÍO, HÉCTOR ANÍBAL TABARES OSPINA

- Prototipo de emulación de movimiento humano mediante una plataforma bípeda humanoide** 217  
Prototype for human movement emulation by means of a bipedal humanoid platform  
MILTON VICENTE CALDERÓN COY, CÉSAR AUGUSTO CORONEL SEGRERA ESPERANZA CAMARGO CASALLAS

- Sistema de alta disponibilidad basado en plataforma de virtualización para pequeñas y medianas empresas** 231  
High availability system based on virtualization platform for small & medium businesses

LUIS FELIPE WANUMEN SILVA, DARIN JAIRO MOSQUERA PALACIOS

## REFLEXIÓN

- Accesibilidad territorial: instrumento de planificación urbana y regional** 241  
Territorial accessibility: instrument for urban and regional planning  
DIEGO ALEXANDER ESCOBAR GARCÍA, CARLOS FELIPE URAZÁN BONELLS
- La formación lingüística en la educación superior** 255  
Linguistic education in higher education  
NEVIS BALANTA CASTILLA, DAVID NAVARRO MEJÍA

- La responsabilidad por culpa patronal en el accidente o enfermedad laboral** 263  
Employer's liability on work accidents or disease  
GUILLERMO EDUARDO ALFONSO GUTIÉRREZ

## DIVULGACIÓN

- Comunidad científica y tecnológica, ha llegado la oficina que te acompañará en la transferencia de tu conocimiento** 273  
Scientific and technological community, The office that will accompany you in knowledge transfer has come

- Un vistazo al proyecto emprendetronika** 277  
Check out project emprendetronika  
DORIS MARLENE OLEA, PABLO EMILIO GARZÓN, HENRY MONTAÑA

- Instrucciones para los autores** 281  
**Instructions for authors** 288  
**Suscripción** 295  
**SIGN UP** 296

## EDITORIAL

Durante los últimos cinco años, los diferentes proyectos curriculares de la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas han venido incursionando en la organización y participación de eventos académicos de corte internacional, algunos de los cuales ya se han venido institucionalizando y consolidando, lo anterior, como resultado de una iniciativa que se propuso en el comité de publicaciones de la Facultad Tecnológica. Con el fin de divulgar ante la comunidad académica los mejores trabajos de sus docentes y visibilizar aun más el quehacer de la Facultad, se presenta esta primera edición especial de la revista TECNURA de 2014. Su eje principal son los congresos internacionales de Ingeniería Electrónica, Mecánica y Civil que fueron organizados por los proyectos curriculares de la Facultad en asocio con otras instituciones durante el segundo semestre de 2013.

En virtud de la importancia que han venido adquiriendo estos eventos por la participación masiva de estudiantes, docentes e investigadores de la Facultad y de las instituciones aliadas, se tiene previsto que esta edición especial no sea solamente la primera y la única de ellas, sino que se mantenga en el tiempo. Se espera que a futuro y año tras año, se continúen desarrollando estos congresos por parte de cada uno de los proyectos curriculares y con un nivel académico y científico cada vez mayor, al punto en el cual dentro de unos pocos años se terminen por consolidar, tengan amplio reconocimiento y se constituyan en un referente nacional e internacional, teniendo en cuenta que este tipo de eventos es reconocido como una de las formas más eficaces de socializar y divulgar el conocimiento entre la comunidad científica, y facilitar la conformación de redes académicas.

Se ha incluido también en este número otros trabajos sobre temáticas inherentes a los campos de interés a la tecnología, que han sido desarrollados principalmente por docentes y estudiantes de

la Facultad Tecnológica y, en menor medida, por otros docentes y estudiantes pertenecientes a otras facultades de la Universidad y algunas instituciones externas que ya habían surtido el proceso de evaluación en la revista.

De acuerdo con el proceso editorial y los procedimientos de la revista, todos los artículos asociados a las ponencias y conferencias que se presentaron fueron sometidos a evaluación por pares externos, y aunque algunos investigadores presentaron más de un trabajo - bien sea como ponencia en alguno de los congresos, o porque habían presentado con anterioridad un artículo a la revista que había sido incluido en esta edición especial - se limitó la publicación a uno solo por autor, con el fin de dar cabida a la mayor cantidad posible de autores.

La selección de los artículos, derivados de los trabajos presentados en estos congresos y que han sido incluidos en esta edición especial, estuvo a cargo de los consejos de los proyectos curriculares de la Facultad Tecnológica que participaron en su organización. También es importante mencionar que para la publicación de esta edición se contó con el respaldo incondicional por parte de la Decanatura de la Facultad y el Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico de la Universidad – CIDC.

Con estas consideraciones, se seleccionaron los 25 artículos que conforman esta edición especial de la revista. Los mismos se enmarcan en áreas del conocimiento como automatización, aprovechamiento de materiales, eficiencia energética, vivienda, formación tecnológica, electrónica, y software, principalmente. A todos los integrantes de los consejos curriculares, a los organizadores de los congresos, a los docentes, investigadores y conferencistas que participaron, y a todos los autores en general, nuestro agradecimiento.

César Augusto García Ubaque  
DIRECTOR

## EDITORIAL

During the past five years, various curriculum projects from Faculty of Technology at District University Francisco José de Caldas have been participating and organizing international academic events, some of which have already been institutionalized and consolidated, the former, as a result of an initiative that was proposed in the publications committee at Faculty of Technology. In order to disclose the best work of its teachers to academic community and make even more visible the Faculty work, the very first Special Edition of TEC-NURA Journal 2014 is presented. Its main axis is the International Electronic, Mechanical and Civil Engineering Congresses that were organized by The Faculty curriculum projects associated with other institutions during the second semester, 2013.

By virtue of the importance these events have gained due to massive participation of students, teachers and researchers of the Faculty and allied institutions, it is expected that this Special Edition will not be the first and only of them, but consolidating it over time. It is intended that in the future, year after year, each curriculum project continues developing these congresses, growing academic and scientifically, so that in a few years should they be consolidated, widely recognized and perceived as a national and international reference, taking into consideration that this type of events is recognized as one of the most effective ways to socialize and disseminate knowledge among the scientific community, and facilitate the formation of academic networks.

This number has included other works related to technology interest areas, which have been mainly developed by teachers and students at Faculty of Technology and, to a lesser extent, by other teachers and students from other faculties of the

University and external institutions that had already approved the evaluation process in the journal.

According to the editorial process and procedures of the magazine, all presented papers associated with talks and conferences were subjected to evaluation by external peers, and although some researchers presented more than one work - either as a paper in any of the conferences, or because they had previously submitted an article to the magazine that had already been included in this special edition - the publication was limited to one paper per author, in order to include as many authors as possible.

The selection of articles, derived from papers presented at these congresses and included in this Special Edition, was in charge of the boards of the participating curriculum projects at the Faculty of Technology. It is also important to mention that the publication of this edition had the unconditional support coming from the Faculty Deanship and the Centre for Research and Scientific Development at the University - CIDC.

With these considerations, the 25 articles that shape this journal Special Edition were selected. Those are part of knowledge areas as automation, materials use, energy efficiency, housing, technology training, electronics, and software, mainly. To all the members of the curriculum councils, congresses organizers, professors, researchers and lectures who participated, and to all the authors in general, our thanks.

Cesar Augusto García Ubaque  
DIRECTOR



## Problema de tomografía local usando wavelets B-spline cúbicos

### Local tomography problem using cubic B-spline wavelets

Wilmar Alberto Díaz Ossa\*, Harold Vacca González\*\*

Citation / Para citar este artículo: Diaz Ossa, W., & Vacca González, H. (2014). Problema de tomografía local usando wavelets B-spline cúbicos. Revista Tecnura, Edición especial, 13-29.

**Fecha de recepción:** 14 de febrero de 2013 / **Fecha de aceptación:** 7 de marzo de 2014

#### RESUMEN

En el presente artículo se describe e implementa una solución al problema de la tomografía local, equivalente a la inversión de la transformada de Radon, utilizando la transformada wavelet. Para ello se ejecuta un algoritmo basado en wavelets B-spline cúbicos de soporte compacto con suficientes momentos de desvanecimiento para que la función de escalado filtrada, la wavelet madre y su transformada de Hilbert tengan decaimiento rápido. Lo anterior favorece la localización de la transformada wavelet de la transformada de Radon y, por tanto, la inversión, es decir; la reconstrucción de una región central de interés del fantasma Shepp-Logan.

**Palabras clave:** Base separable biortogonal, B-Spline cúbico, tomografía local, transformada de Radon, wavelets.

#### ABSTRACT

This paper presents a formal description and subsequent implementation of a solution to the local tomography problem, equivalent to the so-called Radon Transform local Inversion. To do so, it is necessary to execute an algorithm based on compact-support B-spline cubic wavelets, including sufficient vanishing moments so that the filtered-scaling, the mother wavelet and its Hilbert Transform functions decay rapidly. This favors localization of Radon-Transform Wavelet Transform and, therefore, its corresponding inversion; that is, the reconstruction of a Shepp-Logan Phantom central interest region (ROI).

**Keywords:** Separable biorthogonal base, cubic B-spline, local tomography, Radon transformation, wavelets.

\* Licenciado en matemáticas, Universidad Pedagógica Nacional; magíster en matemáticas aplicadas, Universidad EAFIT. Docente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Contacto: [wadiazo@udistrital.edu.co](mailto:wadiazo@udistrital.edu.co)

\*\* Licenciado en matemáticas, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; magíster en matemáticas aplicadas, Universidad EAFIT. Docente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Contacto: [hvacca@udistrital.edu.co](mailto:hvacca@udistrital.edu.co)

## INTRODUCCIÓN

En los problemas inversos, el objetivo es estimar algunos atributos desconocidos que son de interés, a partir de mediciones que se relacionan indirectamente con dichos atributos. Tal es el caso de la tomografía, en donde, a partir de las mediciones de las atenuaciones de los rayos X que atraviesan un objeto, se debe recuperar la imagen del mismo. Este asunto empezó a investigarse teóricamente hacia 1917 por J. Radon; posteriormente, hacia 1979, Cormack y Hounsfield concretaron sus resultados en la tomografía axial computarizada; y desde finales del siglo XX hasta hoy, el problema ha seguido vigente por efectos del avance en tecnología computacional y la variedad de aplicaciones que pueden desarrollarse.

El artículo se estructura de la siguiente manera: en la sección 2 se describe el problema de la tomografía y, en particular, el de la tomografía local o de región de interés; en la sección 3 se presentan la notación y las definiciones de las transformadas utilizadas; en la sección 4 se hace una descripción de los antecedentes y métodos utilizados en la reconstrucción de una función a partir de la transformada de Radon; en la sección 5 se definen las transformadas wavelets; en la sección 6 se hace una introducción al análisis wavelet que incluye el análisis multiresolución para determinar las wavelet escalada y madre, y se utilizan wavelets B-spline biortogonales como alternativa para recuperar la transformada de Radon. En la sección 7 se estudian las wavelets para invertir Radon; en la sección 8 se muestran y analizan los resultados obtenidos al comparar la imagen de la región central del fantasma Shepp-Logan, reconstruida al utilizar wavelets separables biortogonales, frente a la reconstrucción realizada utilizando transformada rápida de Fourier.

Finalmente, en la sección 9 se presentan las conclusiones.

## EL PROBLEMA DE LA TOMOGRAFÍA LOCAL

Al hacer pasar un número finito de rayos  $X$  a través de un plano de un objeto, desde varios ángulos, se busca cómo construir el mapa de intensidades del objeto a partir de las medidas de las atenuaciones de los rayos. Para ello se considera una variable  $s$ , que mide la distancia desde la fuente a lo largo de un rayo, asumiéndose que la intensidad  $I$  cambia con respecto a tal distancia. Faridani, Keinert, Natterer, Ritman & Smith (1990); Faridani, Ritman & Smith (1993); Faridani, Finch, Ritman & Smith (1997) habían encontrado que la relación entre la intensidad inicial transmitida ( $I_0$ ), la cantidad de materia (densidad,  $\mu(x, y)$ ), e intensidad final ( $I_T$ ), está dada por:

$$\frac{dI}{I} = -\mu(x, y)ds \quad (1)$$

Donde

$$\frac{I_0}{I_T} = e^{-\int_s \mu(x, y)ds} \quad (2)$$

Berenstein & Walnut (1994 y 1995), así como Rashid-Farrokhi, Liu, Berenstein & Walnut (1994), indicaban que el problema de la tomografía local se presenta como la recuperación de la función  $f(x)\chi_{\{|x| \leq a\}}(x)$ , dado  $a > 0$ , a partir de las proyecciones  $\mathfrak{R}_\theta f(s)\chi_{[-a, a]}(s)$ ; donde  $\chi_s(t)$  es la función característica y  $\mathfrak{R}_\theta f(s)$  es la transformada de Radon de  $f$ . La idea se centra en la inversión de la transformada de Radon, es decir: teniendo todas las proyecciones el objetivo consiste en la recuperación de la función. Walnut (1993); Rashid-Farrokhi *et al.* (1994); o más recientemente J. Walker (2008), indicaban que la tomografía local también se denomina *problema interior*, o tomografía en una región de interés (ROI, por sus siglas en inglés). Maass (1992); Helgason (1999); Natterer (2001) y Natterer & Wübbeling (2001), enunciaban además que la inversión de la transformada de Radon no es única en dimensiones pares. Esto quiere decir que el

problema de la tomografía local no tiene solución única cuando  $n$  es par.

## DEFINICIONES Y NOTACIÓN

Los conceptos dados a continuación se definen y notan, al estilo de Berenstein & Walnut (1994 y 1995); Mertins (1996); Folland (1999); Natterer (2001); Pinsky (2001); Hong, Wang & Gardner (2005); Boggess & Narcowich (2007); Chaudhury & Unser (2011), entre otros.

$L_1(R)$  es el espacio de todas las funciones  $f : R \rightarrow C$ , tal que  $\int_R |f(t)| dt = \|f\|_{L_1} < \infty$ . De igual forma, se tiene para  $L_2(R)$ , el espacio de las funciones cuadrado-integrables, con la norma definida a partir de la ecuación (3):

$$\|f\|_{L_2} = \left( \int_R |f(t)|^2 dt \right)^{1/2} < \infty. \quad (3)$$

Dadas  $f \in L_1(\mathbb{R}^n)$  y  $\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ ,  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$ , se define la transformada de Fourier de  $f$  en el punto  $\xi$  mediante (4).

$$\hat{f}(\xi) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{n}{2}}} \int_{\mathbb{R}^n} f(x) e^{-i\langle \xi, x \rangle} dx \quad (4)$$

Donde  $\langle \xi, x \rangle = \xi_1 x_1 + \xi_2 x_2 + \dots + \xi_n x_n$  y  $dx = dx_1 dx_2 \dots dx_n$

La transformada de Hilbert se define a partir de la ecuación (5).

$$Hf(t) = f_H(t) = \frac{1}{\pi} \int_{\mathbb{R}} \frac{f(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (5)$$

La transformada inversa de Hilbert está dada por (6).

$$f(t) = \frac{1}{\pi} \int_{\mathbb{R}} \frac{f_H(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (6)$$

$S^{n-1}$ , define la esfera unidad; sea  $\Theta$  que pertenece a  $S^{n-1}$ ,  $\theta^\perp$  es el hiperplano ortogonal a  $\Theta$  que pasa a través del origen.

La transformada de Radon de una función  $f(x)$ ,  $x \in \mathbb{R}^n$  está definida por la ecuación (7).

$$\mathfrak{R}f(\theta, s) = \mathfrak{R}_\theta f(s) = \int_{x \cdot \theta = s} \vec{f}(\vec{x}) d\vec{x} = \int_{\theta^\perp} f(s \theta + y) dy \quad (7)$$

$\mathfrak{R}f(\theta, s)$  representa la integral de línea de  $f$ , en el hiperplano de  $\mathbb{R}^n$  perpendicular a  $\Theta$  y a una distancia  $s$  desde el origen. Dada una función  $h(\theta, t)$  definida en  $S^{n-1} \times \mathbb{R}$ , se define el operador retroproyección  $\mathfrak{R}^\#$  a partir de la ecuación (8).

$$\mathfrak{R}^\# h(x) = \int_{S^{n-1} \perp} h(\theta, x \cdot \theta) d\theta \quad (8)$$

Donde el par  $(\theta, t)$  es la parametrización del hiperplano  $\{x : x \cdot \theta = t\}$ , y la función  $h$  está definida en el hiperplano  $(n-1)$ -dimensional de  $\mathbb{R}^n$ . En este caso,  $\mathfrak{R}^\# h(x)$  es la integral de  $h$  sobre todos los hiperplanos que pasan a través de  $x$ .

Por otra parte, dados  $m \geq 0$ ,  $p \geq 1$  y  $\Omega$  un dominio de  $\mathbb{R}^n$  ( $n \geq 2$ ); el espacio de Sobolev,  $W^{m,p}(\Omega)$  se define mediante (9).

$$W^{m,p}(\Omega) = \{u \in L_p(\Omega) : \partial^\alpha u \in L_p(\Omega), \forall \alpha, |\alpha| \leq m\}. \quad (9)$$

Y se dice un espacio vectorial normado, equipado con la norma expresada en (10).

$$\|u\|_{W^{m,p}(\Omega)} = \left( \int_{\Omega} \sum_{|\alpha| \leq m} |\partial^\alpha u|^p dx \right)^{1/p} = \left( \sum_{|\alpha| \leq m} \|\partial^\alpha u\|_{L_p(\Omega)}^p \right)^{1/p} \quad (10)$$

## METODOLOGÍA Y ANTECEDENTES

Guédon & Unser (1992); Ramm & Zaslavsky (1993); Berenstein & Walnut (1994 y 1995), así como Rashid-Farrokhi, Liu, Berenstein & Walnut (1994); Natterer (2001) y Natterer & Wübbeling (2001), entre otros, coinciden en que la metodología más utilizada para invertir la transformada de Radon, se basa en el teorema de Slice de Fourier, ecuación (11). Dada  $f(x)$ ,  $x \in \mathbb{R}^n$  y  $\theta \in S^{n-1}$  fijo

$$\mathfrak{R}_\theta \hat{f}(\lambda) = \hat{f}(\gamma\theta) \quad (11)$$

Para todo  $\gamma \in \hat{\mathbf{R}}$  ( $\hat{\mathbf{R}}$  representa el dual de  $\mathbf{R}$ ).

Al escribir la fórmula usual de inversión de Fourier en coordenadas polares se tiene la ecuación (12).

$$f(x) = \int_{S_+^{n-1}} \int_{-\infty}^{\theta} \Re_\theta \hat{f}(r) e^{2\pi i((x\theta)r)} |r|^{n-1} dr d\theta \quad (12)$$

Donde  $S_+^{n-1}$  denota la mitad superior de la esfera en  $\mathbf{R}^n$ . Berenstein & Walnut (1994 y 1995); Natterer (2001), observan que la ecuación (12) puede generalizarse de la siguiente manera. Dado  $\alpha \in \mathbf{R}$ , se define el operador potencial de Riesz (ecuación (13)),  $I^\alpha$  como:

$$I^\alpha \hat{f}(\xi) = |\xi|^{-\alpha} \hat{f}(\xi) \quad (13)$$

Si  $\alpha < n$ , y  $g = \Re_\theta f$  entonces se obtiene la ecuación (14).

$$f = \frac{1}{2} (2\pi)^{1-n} I^{-\alpha} R^\# I^{\alpha-n+1} g$$

$$f = c_n \begin{cases} R^\# H g^{(n-1)}, & n \text{ par} \\ R^\# g^{(n-1)}, & n \text{ impar} \end{cases}, \quad c_n = \frac{1}{2} (2\pi)^{1-n} \begin{cases} (-1)^{(n-2)/2} & n \text{ par} \\ (-1)^{(n-1)/2} & n \text{ impar} \end{cases} \quad (14)$$

Esto significa que la fórmula de la inversión es local en el siguiente sentido: para reconstruir  $f$  en algún punto  $x$ , solo se necesita la integral de  $f$  sobre hiperplanos que pasan a través de un entorno de  $x$ .

Un segundo método para invertir la transformada de Radon es a través de la fórmula de retroproyección filtrada (ecuación (15)). Dado  $f(x)$ ,  $x \in \mathbf{R}^n$ ,  $g(\theta, t) = g_\theta(t)$ ,  $\theta \in S^{n-1}$ ,  $t \in \mathbf{R}$ ,

$$f * \Re^\#(g_\theta)(x) = \Re^\#(\Re_\theta f * g_\theta)(x) \quad (15)$$

La convolución del lado izquierdo se calcula con respecto a  $x \in \mathbf{R}^n$  y la derecha con respecto a  $t \in \mathbf{R}$ . Guédon y Unser (1992) utilizaron este método para calcular los cuadrados de las proyecciones de funciones polinómicas suaves por tramos, con nodos espaciados uniformemente.

Natterer (2001), Delaney & Bresler (1995) o Destefano & Olson (1994), formalmente utilizan para la reconstrucción de  $f$ , entre otras, la ecuación (16).

$$f(x) = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_{\mathbf{R}} \frac{\frac{d}{ds} g(\theta, s)}{(x \cdot \theta) - s} ds d\theta \quad (16)$$

Esta, sin embargo, es una forma difícil de implementar computacionalmente.

## TRANSFORMADAS WAVELETS

El origen de la descomposición de una señal en wavelets radicó en la necesidad de conocer las características y particularidades de la señal en diferentes instantes de tiempo. Muchos autores han actuado en consecuencia; por ejemplo, Mallat (1989, 1992 y 2008); Daubechies (1990, 1992 y 2006); Chui (1992); Aldroubi (1996); Hernández & Weiss (1996); Goswami & Chan (1999); Boggess & Narcowich (2007), observaron que el análisis de Fourier tiene el defecto de la no localidad, es decir, el comportamiento de una función en un conjunto abierto, sin importar cuán pequeño, influye en el comportamiento global de la transformada de Fourier; por lo que no se captan los aspectos locales de la señal tales como cambios bruscos, saltos o picos, que se han de determinar a partir de su reconstrucción. Este aspecto se soluciona a través del análisis wavelet.

### Transformada wavelet continua

En particular, Mallat (1989, 1992 y 2008) y Daubechies (1990, 1992 y 2006), construyen la teoría wavelet basada en la representación de una función en términos de una familia biparamétrica de dilataciones y traslaciones de una función fija  $\psi$ , llamada wavelet madre.

*Definición 5.1.* Para  $f, \psi \in L_2(\mathbf{R})$ , la transformada wavelet se expresa mediante la ecuación (17).

$$W_\psi f(a, b) := \int_{\mathbf{R}} f(t) \overline{\psi_{a,b}(t)} dt \quad (17)$$

Por la desigualdad de Cauchy,  $W_\psi$  es una función acotada:  $|W_\psi f(a, b)| \leq \|f\|_2 \|\psi\|_2$ . Nótese también que la transformada se puede escribir como la ecuación (18).

$$W_\psi f(a, b) = \langle f, \psi_{a,b} \rangle_{L_2(\mathbb{R})} = \langle f, \psi_{a,b} \rangle \quad (18)$$

Luego, la transformada wavelet  $W_\psi$  de  $f$  puede ser descrita en términos de convolución:

$$W_\psi f(a, b) = (f \cdot \hat{\psi}_{a,0})(b) \quad \text{donde } \hat{\psi}(t) = \overline{\psi(-t)}.$$

Además:  $\hat{\psi}_{a,b}(\omega) = \sqrt{|a|} \hat{\psi}(a\omega) e^{-i\omega b}$ .

La fórmula de inversión, en términos de  $W_\psi$ , está dada por la ecuación (19); se puede ver, por ejemplo, Mallat (1989) y Mallat & Hwang (1992).

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{\mathbb{R}^2} W_\psi f(a, b) \psi_{a,b}(t) db \frac{da}{a^2} \quad (19)$$

### Transformada wavelet discreta

Daubechies (1990, 1992 y 2006), Mallat (1989), entre otros, consideran que la transformada wavelet continua introduce cierta redundancia, pues la señal original se puede reconstruir completamente calculando  $W_\psi f(a, \cdot)$  para una cantidad numerable de escalas, por ejemplo, potencias enteras de 2. Esto es, si se elige la escala  $a = 2^{-j}$  para cada  $j \in \mathbb{Z}$ , y también se discretiza en el dominio del tiempo en los puntos  $b = 2^{-j}k$ ,  $k \in \mathbb{Z}$ , la familia de wavelets será ahora dada por la ecuación (20).

$$\psi_{2^{-j}, 2^{-j}k}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^{-j}}} \psi\left(\frac{t - 2^{-j}k}{2^{-j}}\right) = 2^{j/2} \psi(2^j t - k), \quad \forall j, k \in \mathbb{Z}. \quad (20)$$

Se utilizará la notación  $\psi_{j,k}$  para denotar la wavelet  $\psi$  comprimida  $2^j$  y trasladada  $k$  unidades, es decir,  $\psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \psi(2^j t - k)$ . Con la elección de  $a = 2^{-j}$  y  $b = 2^{-j}k$ , el muestreo en el tiempo se ajusta proporcionalmente a la escala; es decir, a mayor escala se toma puntos más distantes, ya que se busca información global, mientras que a menor escala se buscan detalles de la señal, por tal motivo se muestrea en puntos menos distantes entre sí. Para otras elecciones de  $a$  y  $b$  se puede consultar a Chui (1992). En consecuencia, una condición suficiente para la reconstrucción de una señal  $f$  es que la familia de dilatadas y trasladadas  $\psi_{j,k}$  forme una base

ortonormal en el espacio  $L_2(\mathbb{R})$ . Para conocer más detalles se pueden ver Hernández & Weiss (1996) y Daubechies (1990). Si esto se tiene, cualquier función  $f \in L_2(\mathbb{R})$  se puede escribir mediante la ecuación (21).

$$f(t) = \sum_{j,k} c_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (21)$$

$$\text{Donde } c_{j,k} = \langle f, \psi_{2^{-j}, 2^{-j}k} \rangle = W_\psi f(2^{-j}, 2^{-j}k).$$

*Definición 5.2:* Para cada  $f \in L_2(\mathbb{R})$ , el conjunto bidimensional de coeficientes se determina mediante la ecuación (22).

$$c_{j,k} = \langle f, \psi_{j,k} \rangle = \int_{\mathbb{R}} 2^{j/2} f(t) \overline{\psi(2^j t - k)} dt \quad (22)$$

Se denomina *la transformada wavelet discreta de f*.

En consecuencia, la expresión (serie-wavelet) se puede escribir en forma alterna como la ecuación (23).

$$f(t) = \sum_{j,k} \langle f(t), \psi_{j,k}(t) \rangle \psi_{j,k}(t) \quad (23)$$

La serie expresada en la ecuación (23) se llama representación wavelet de  $f$ .

Para recuperar  $f(t)$  desde su transformada wavelet,  $\psi(t)$  debe satisfacer la ecuación (24).

$$\hat{\psi}(0) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (24)$$

Además, las wavelets se construyen de modo que tengan soporte compacto y un alto orden de desvanecimiento. Una wavelet se dice que tiene momentos de desvanecimiento de orden  $m$  si cumple la ecuación (25).

$$\int_{\mathbb{R}} t^p \psi(t) dt = 0, \quad p = 0, 1, \dots, m-1 \quad (25)$$

La expresión para la transformada wavelet inversa se define mediante la ecuación (26),

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{\mathbb{R}} db \int_0^{\infty} \frac{1}{a^2} [W_\psi f(b, a) \psi_{b,a}(t)] da \quad (26),$$

la cual permite reconstruir la función original desde su transformada wavelet. Aquí,  $C_\psi$  es una constante que depende de la elección de la wavelet y se conoce como *condición de admisibilidad*, y se define a partir de la ecuación (27).

$$C_\psi := \int_{\mathbb{R}} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (27)$$

$\hat{\psi}(\omega)$  es la transformada de Fourier de  $\psi$ .

Si además  $\psi \in L_1(\mathbb{R})$ , entonces la condición (13) implica que  $\int_{\mathbb{R}} \psi(t) dt = 0$ . En efecto, por el lema de Riemann-Lebesgue (ver, por ejemplo: Meyer (1990); Irino & Kawahara (1993); Wojtaszczyk (1997) o Walnut (2002)),  $\lim_{\omega \rightarrow \infty} \hat{\psi}(\omega) = 0$ , y dada la continuidad de la transformada de Fourier, implica que  $0 = \hat{\psi}(0) = \int_{\mathbb{R}} \psi(t) dt$ .

### Transformada rápida wavelet

Rioul & Duhamel (1992), así como Destefano & Olson (1994) o Walter & Shen (1999), determinan que la transformada rápida wavelet es una implementación computacionalmente eficiente de la transformada wavelet discreta, que aprovecha la relación entre los coeficientes de la transformada wavelet discreta y escalas adyacentes, lo que se expresa en las ecuaciones (28) y (29).

$$W_\psi(j, k) = \sum_m h_\psi(m - 2k) W_\phi(j+1, m) \quad (28)$$

Y

$$W_\phi(j, k) = \sum_m h_\phi(m - 2k) W_\phi(j+1, m) \quad (29)$$

Estas ecuaciones pueden expresarse mediante convolución (ecuaciones (30) y (31)), con los coeficientes wavelet y de escalamiento invertidos en el tiempo (descomposición), es decir,

$$W_\psi(j, k) = h_\psi(-n) * W_\phi(j+1, m) \Big|_{n=2k, k \geq 0} \quad (30)$$

Y

$$W_\phi(j, k) = h_\phi(-n) * W_\phi(j+1, m) \Big|_{n=2k, k \geq 0} \quad (31)$$

Donde las convoluciones son evaluadas en instantes  $n = 2k$  para  $k \geq 0$ .

## ANÁLISIS MULTIRRESOLUCIÓN Y FUNCIONES SPLINE

El concepto de análisis multirresolución fue desarrollado por Mallat (1989) y Meyer (1990). Aplicando este tipo de análisis a una función esta puede descomponerse en funciones más simples y estudiarlas separadamente, núcleo fundamental del concepto siguiente:

*Definición 6.* Un análisis multirresolución (AMR) sobre  $\mathbb{R}$  consta de una sucesión de subespacios cerrados  $\{V_j : j \in \mathbb{Z}\}$  de  $L^2(\mathbb{R})$ , que satisfacen:

1.  $V_j \subset V_{j-1}$ ;  $\forall j \in \mathbb{Z}$  (cadena de subespacios encajonados).
2.  $\overline{\bigcup_{j \in \mathbb{Z}} V_j} = L^2(\mathbb{R})$ , es decir  $\bigcup_{j \in \mathbb{Z}} V_j$  es densa en  $L^2(\mathbb{R})$ .
3.  $\bigcap_{j \in \mathbb{Z}} V_j = \{0\}$ .
4.  $f(x) \in V_j$  si y solo si  $f(2^j x) \in V_0$ .
5.  $f(x) \in V_0$  si y solo si  $f(x - k) \in V_0$ , para todo  $k \in \mathbb{Z}$ , además, por (4) se tiene que si  $f(x) \in V_j$ , entonces  $f(x - 2^j k) \in V_j$ , para todo  $k \in \mathbb{Z}$ .
6. Existe  $\phi \in V_0$  tal que  $\{\phi_{0,k} : k \in \mathbb{Z}\}$  es una base ortonormal  $V_0$ .

Las condiciones (1)–(3) significan que cualquier función en  $L_2(\mathbb{R})$  se puede aproximar por elementos de los sub-espacios  $V_j$ , y como  $j$  tiende a  $\infty$  la precisión de la aproximación se incrementa. Las condiciones (4) y (5) expresan la invariancia de la familia de sub-espacios  $(V_j)_{j \in \mathbb{Z}}$  con respecto a los operadores de traslación y dilatación ( $T_h f(x) = f(x - h)$ ,  $J_s f(x) = f(2^s x)$ ). Además, se tienen (4') (5') y (6').

- 4'.  $V_j = J_{-j}(V_0)$  para toda  $j \in \mathbb{Z}$
- 5'.  $V_0 = T_n(V_0)$  para toda  $n \in \mathbb{Z}$
- 6'. Para cada  $j \in \mathbb{Z}$  el sistema  $\{2^{j/2} \phi_{j,k}(2^{j/2} x - k)\}_{j,k \in \mathbb{Z}}$  es una base ortonormal en  $V_j$ .

El análisis multirresolución conduce de una forma natural a la construcción de wavelets en

términos de detalles que complementan la aproximación entre  $V_j$  y  $V_{j+1}$ .

Por lo anterior, se pueden adoptar dos formas de ver un análisis multirresolución:

1. Tomando los sub-espacios  $(V_j)_{j \in \mathbb{Z}}$  como una base. Ellos tienen que satisfacer las condiciones (1)–(5), que por lo general son fáciles de comprobar. Entonces, se necesita encontrar una función escala que cumpla la condición (6). Esto generalmente no es tan evidente.
2. Partiendo de la función  $\phi$  se define  $V_0$  como  $\text{gen}\{\phi(t-m)\}_{m \in \mathbb{Z}}$  y los demás espacios  $V_j$  se definen por la condición (4) o (4'). La condición (5) se cumple automáticamente, y se tienen que comprobar las condiciones (1)–(3) y (6).

Se adopta en esta investigación la aplicación de un AMR utilizando el camino 2.

## Función spline

Una función *spline* está formada por varios polinomios, Kincaid & Cheney (1989). Cada uno es definido sobre un sub-intervalo, y se unen entre sí obedeciendo a ciertas condiciones de continuidad. Al fijar un número entero  $k \geq 0$ , y  $n+1$  puntos (nodos)  $t_1 < t_2 < \dots < t_n$ , una función  $S(x)$  que satisface las condiciones:

1. En cada intervalo  $[t_{i-1}, t_i]$ ,  $S(x)$  es un polinomio de grado  $\leq k$ .
2.  $S(x)$  tiene una derivada de orden  $(k-1)$  continua en  $[t_0, t_n]$ .
3. Se denomina una función *spline* de grado  $k$ ;  $S(x)$  es, por tanto, un polinomio continuo por tramos de, cuando más, grado  $k$ , que tiene derivadas continuas de orden hasta  $(k-1)$ .

Entre los diferentes *spline*, la función *spline* cúbica es la más común y se define como la ecuación (32).

$$y = S(x) = A_k(x - x_k) + B_k(x - x_k)^2 + C_k(x - x_k)^3 + D_k \quad (32)$$

Donde las constantes  $A_k$ ,  $B_k$ ,  $C_k$ ,  $D_k$ , son los coeficientes.

## Los B-splines

Es un sistema de funciones *spline* simétricas y en forma de campana, a partir de las cuales se obtienen, mediante combinaciones lineales, todas las demás funciones *spline*. Son centrados, simétricos y de soporte compacto; Unser & Aldroubi, (1993), Unser (1996). Los de Schoenberg se definen a partir de la ecuación (33).

$$\beta^n(t) = \frac{1}{n!} \sum_{k=0}^{n+1} \binom{n+1}{k} (-1)^k \left(t - k + \frac{n+1}{2}\right)^n \mu\left(t - k + \frac{n+1}{2}\right) \quad (33)$$

En Unser (1996); Antonini, Barlaud, Mathieu & Daubechies (1992); Unser & Aldroubi (1993); y López & De Armas (2010), el B-spline central de orden  $n$  se define mediante la ecuación (34).

$$\beta^n(t) = \frac{1}{n!} \sum_{k=0}^{n+1} \binom{n+1}{k} (-1)^k \left(t - k + \frac{n+1}{2}\right)^n \mu\left(t - k + \frac{n+1}{2}\right) \quad (34)$$

Cada B-spline de orden  $n$  se puede construir por convoluciones sucesivas (ecuación (35)).

$$\beta^n(t) = \underbrace{\beta^0(t) * \dots * \beta^0(t)}_{(n+1) \text{ veces}}; \quad \beta^0(t) = \begin{cases} 1, & \text{si } t \in [-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}], \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (35)$$

$t \in \mathbb{R}$ ,  $\mu$  es la función escalón unitario y  $n$  es el orden de los polinomios.

Esta forma de construir recursivamente cada B-spline de orden  $n$  puede hacerse a partir de un B-spline desplazado de orden  $n-1$ . Así, el *spline* cúbico se genera por la ecuación (36).

$$\beta^3(t) = \beta^0(t) * \beta^0(t) * \beta^0(t) * \beta^0(t) \quad (36)$$

Tomando:

$$\phi(t) = \beta^3(t) = \begin{cases} 0 & \text{si } t < -2 \\ \frac{1}{6(2+t)^3}, & \text{si } -2 \leq t \leq -1 \\ 1+t - \frac{1}{6}t^3 - \frac{1}{3}(1+t)^3 & \text{si } -1 < t \leq 0 \\ 1-t + \frac{1}{6}t^3 - \frac{1}{3}(1-t)^3 & \text{si } 0 < t \leq 1 \\ \frac{1}{6}(2-t)^3 & \text{si } 1 < t \leq 2 \\ 0 & \text{si } t > 2 \end{cases}$$

La función escalada  $\Phi(t)$  se diseña tomando la suma promedio de los B-splines  $x$  con el filtro identidad  $\delta_0(k)$  o de Kronecker (ecuación (37)).

$$\phi(t) = \sum_{k=-\infty} \delta_0(k) \beta^3(t-k) \quad (37)$$

Considerando ahora el espacio  $V_j$ , formado por las funciones *spline*, donde cada polinomio definido sobre el intervalo  $[k2^j; (k+1)2^j]$ , con  $k \in \mathbb{Z}$ , es de grado tres:

$$V_j = \left\{ s(t) : s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_j(k) \phi(2^{-j}t - k), t \in \mathbb{R}, c_j \in l_2 \right\},$$

$l_2$  es el espacio de las sucesiones cuadrado sumables  $c(k)$ ,  $k \in \mathbb{Z}$ .  $V_j$  es el conjunto de funciones *spline* cuadrado integrables de una dimensión, es decir, pertenecen a  $L_2(\mathbb{R})$ . Estas funciones son continuas de clase  $C^2$ .

Esta sucesión de espacios anidados  $V_j$  y la función escalada  $\phi(t) = \beta^3(t)$  definen un análisis multirresolución. La relación de escala viene dada mediante la ecuación (38); Unser, Aldroubi & E. Murray (1993) y López & De Armas (2010):

$$\beta^3\left(\frac{t}{2}\right) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \mu_2^3(k) \beta^3(t-k) \quad (38)$$

El filtro binomial Kernel  $\mu_2^3(k)$  se conoce como filtro de impulso de respuesta finita o FIR, definido como:

$$\mu_2^3(k) = \begin{cases} 0 & \text{si } k < -2 \\ \frac{1}{8} & \text{si } k = -2 \\ \frac{1}{8} & \text{si } k = -1 \\ \frac{1}{2} & \text{si } k = 0 \\ \frac{3}{4} & \text{si } k = 1 \\ \frac{1}{2} & \text{si } k = 2 \\ 0 & \text{si } k \geq 2 \end{cases}$$

La wavelet *spline*  $\Psi\left(\frac{t}{2}\right)$  se construye al tomar la suma promedio de los B-splines cúbicos con una sucesión  $w(k)$  definida a partir de la ecuación (39).

$$\psi\left(\frac{t}{2}\right) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} w(k) \beta^3(t-k) \quad (39)$$

$\psi\left(\frac{t}{2}\right)$  es ortogonal al conjunto de B-splines expandidos  $\{\beta^3(\frac{t}{2} - k)\}$ .

Para conseguir una fórmula explícita de la wavelet B-spline de orden tres, se toma la ecuación (38) junto con la propiedad  $\langle \beta^3(t), \beta^3(t-y) \rangle = \beta^7(y)$ , consecuencia de la propiedad ya dada de convolución sucesiva. Finalmente, tiene la forma de la ecuación (40).

$$\psi\left(\frac{t}{2}\right) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} (\mu_2^3 * \underline{b}^7 * \delta_{-1})(k) \beta^3(t-k) \quad (40)$$

Y, cambiando  $t$  por  $2t$  queda la ecuación (41).

$$\psi(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} (\mu_2^3 * \underline{b}^7 * \delta_{-1})(k) \beta^3(2t-k) \quad (41)$$

Desarrollando las operaciones, se tiene explícitamente la wavelet de medida nula, oscilante, de energía finita, bien localizada en un intervalo finito y con desvanecimiento en el tiempo; López & De Armas (2010).

## INVERSIÓN DE RADON UTILIZANDO WAVELETS

Las wavelets y sus deformaciones, al estilo de Bonani, Durand & Weiss (1996), se usan ahora para invertir la transformada de Radon (Berenstein & Walnut (1994 y 1995), Rashid-Farrokhi, Liu, (1994); Natterer (2001); Walker (2008), Delaney & Bresler (1995) o Destefano & Olson (1994), Berenstein, & Walnut (1997); Yin, Brian, Ferguson & Abbott (2009); Ramm & Zaslavsky (1993)). Como todas las wavelets tienen al menos un momento de desvanecimiento, esto sugiere que la transformada wavelet de  $f$  pueda recuperarse localmente desde proyecciones locales.

En esta sección se presentan los teoremas que permiten invertir la transformada de Radon mediante la utilización de wavelets.

*Proposición 7.1.* Dada una wavelet  $n$  – dimensional separable  $n > 1$ , como en la ecuación (42)

$$\Psi(\mathbf{x}) = \psi^1(x_1)\psi^2(x_2)\cdots\psi^n(x_n) \quad (42)$$

donde la  $\psi^i(t)$  satisface  $|\hat{\psi}^i(\gamma)| \leq C_i(1+|\gamma|)^{-1}$  para todo  $\gamma$ , se define la familia de funciones unidimensional  $\{\rho_\theta\}_{\theta \in S^{n-1}}$  por la ecuación (43)

$$\hat{\rho}_\theta(\gamma) = \frac{1}{2} |\gamma|^{n-1} \hat{\psi}^1(\gamma\theta_1)\hat{\psi}^2(\gamma\theta_2)\cdots\hat{\psi}^n(\gamma\theta_n) \quad (43)$$

donde  $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n) \in S^{n-1}$ . Entonces para toda  $f \in L^1 \cap L^2(\mathbf{R}^n)$  se tiene la ecuación (44).

$$(W_\psi f)(a, \mathbf{b}) = a^{(1-n)/2} \int_{S^{n-1}} (W_{\rho_\theta} \mathfrak{R}_\theta f)(a, b \cdot \theta) d\theta \quad (44)$$

El punto central de esta proposición es observar que la transformada wavelet de una función  $f(x)$  con cualquier wavelet madre y en cualquier escala y localización puede obtenerse por retroproyección de la transformada wavelet de la transformada de Radon de  $f$ , usando wavelets que varían con cada ángulo, pero que son admisibles para cada ángulo. La ecuación (43) se sigue inmediatamente de la ecuación de retroproyección

filtrada (15) con una apropiada elección de  $\theta_\alpha$  y observando que la dilatación conmuta con la retroproyección.

*Proposición 7.2.* Dada una wavelet unidimensional  $\rho(t)$  tal que  $\rho(t) = \rho(-t)$ ,  $\rho(t) \in \mathbf{R}$  para todo  $t$  y la condición que se expresa en la ecuación (45), se define la función radial  $\psi(x)$  mediante la ecuación (46).

$$\int_0^\infty \frac{|\hat{\rho}(r)|^2}{r^{2n-1}} dr < \infty \quad (45)$$

$$\hat{\psi}(\xi) = 2|\xi|^{1-n} \hat{\rho}(|\xi|) \quad (46)$$

Entonces obtenemos la ecuación (47):

$$(W_\psi f)(a, \mathbf{b}) = a^{(1-n)/2} \int_{S^{n-1}} (W_\rho \mathfrak{R}_\theta f)(a, b \cdot \theta) d\theta \quad (47)$$

Esta proposición es un caso particular de la proposición 7.1, excepto que la wavelet unidimensional  $\rho$  se fija con anterioridad para todos los ángulos  $\theta$ . Esto determina la wavelet bidimensional  $\psi$ . En la proposición 7.1,  $\psi$  fue fijada con anterioridad determinando  $\{\rho_\theta\}_{\theta \in [0, 2\pi]}$  para cada  $\theta$ .

En tomografía local se busca  $\rho$  con soporte pequeño y muchos momentos de desvanecimiento. En este caso  $\psi$  tendrá esencialmente el mismo radio de soporte que  $\rho$ . Por tanto, de la ecuación (47) los coeficientes wavelet de  $f$  pueden recuperarse localmente desde las medidas locales de su transformada de Radon. Para los propósitos del procesamiento de imágenes, la idea es fijar la wavelet bidimensional  $\psi$  apropiadamente, de acuerdo con la tarea deseada, y luego considerar las propiedades de  $\rho_\theta$  para cada  $\theta$ .

Una vez calculada la transformada de la función  $f(x)$ , ahora se puede recuperar la función original  $f(x)$  utilizando fórmulas estándar de inversión para la transformada wavelet continua.

*Proposición 7.3.* Dada  $\rho(t)$  wavelet unidimensional que satisface  $\rho(t) = \rho(-t)$ ,  $\rho(t) \in \mathbf{R}$  para todo  $t$  y con  $\lim_{\gamma \rightarrow 0} |\gamma|^{-1} \hat{\rho}(\gamma) = \frac{1}{2}$ . Se define la función radial  $G(x)$  mediante la ecuación (48), y sean  $\psi^1(x)$ ,  $\psi^2(x)$  como en la ecuación (46) y la (47).

Entonces la transformada wavelet de  $f(x)$  se expresa mediante las ecuaciones (49) y (50).

$$\hat{G}(\xi) = 2|\xi|^{-1} \hat{\rho}(|\xi|) \quad (48)$$

$$(W_{\psi^1} f)(2^j, x) = 2^{j/2} \int_0^{2\pi} \cos \theta (W_{\frac{dp}{dt}} \mathfrak{R}_\theta f)(2^j, x \cdot \theta) d\theta \quad (49)$$

$$(W_{\psi^2} f)(2^j, x) = 2^{j/2} \int_0^{2\pi} \sin \theta (W_{\frac{dp}{dt}} \mathfrak{R}_\theta f)(2^j, x \cdot \theta) d\theta \quad (50)$$

*Proposición 7.4.* Sea  $\rho(t)$  y  $G(x)$  que cumplen las condiciones del teorema anterior, y sea  $\beta \in [0, 2\pi]$ . Entonces la transformada de  $f(x)$  se puede escribir como en la ecuación (51).

$$(W_{\psi^\beta} f)(2^j, x) = 2^{j/2} \int_0^{2\pi} \cos(\beta - \theta) (W_{\frac{dp}{dt}} \mathfrak{R}_\theta f)(2^j, x \cdot \theta) d\theta \quad (51)$$

Los coeficientes se obtienen a partir de los productos interiores definidos en las ecuaciones (52)-(55).

$$\langle f, \Phi_{j,k} \rangle = 2^{-j/2} \int_0^{2\pi} (W_{\sigma\theta} \mathfrak{R}_\theta f)(2^j, 2^j(k \cdot \theta)) d\theta \quad (52)$$

$$\langle f, \Psi_{j,k}^i \rangle = 2^{-j/2} \int_0^{2\pi} (W_{\rho_\theta^i} \mathfrak{R}_\theta f)(2^j, 2^j(k \cdot \theta)) d\theta \quad (53)$$

$$\langle f, \Phi_{j,k} \rangle = 2^{-j/2} \int_0^{2\pi} (W_{\sigma_\theta} \mathfrak{R}_\theta f)(2^j, 2^j(k \cdot \theta)) d\theta \quad (54)$$

$$\langle f, \Psi_{j,k}^i \rangle = 2^{-j/2} \int_0^{2\pi} (W_{\rho_\theta^i} \mathfrak{R}_\theta f)(2^j, 2^j(k \cdot \theta)) d\theta \quad (55)$$

Y se expresan en términos de la transformada wavelet de las proyecciones para cada ángulo, donde se definen los siguientes filtros en términos de la transformada de Fourier (ecuaciones (56)-(59)).

$$\hat{\sigma}_\theta(\gamma) = \frac{1}{2} |\gamma| \hat{\phi}(\gamma \cos \theta) \hat{\phi}(\gamma \sin \theta) \quad (56)$$

$$\hat{\sigma}_\theta^1(\gamma) = \frac{1}{2} |\gamma| \hat{\phi}(\gamma \cos \theta) \hat{\phi}(\gamma \sin \theta) \quad (57)$$

$$\hat{\sigma}_\theta^2(\gamma) = \frac{1}{2} |\gamma| \hat{\phi}(\gamma \cos \theta) \hat{\phi}(\gamma \sin \theta) \quad (58)$$

$$\hat{\sigma}_\theta^3(\gamma) = \frac{1}{2} |\gamma| \hat{\phi}(\gamma \cos \theta) \hat{\phi}(\gamma \sin \theta) \quad (59)$$

Y los filtros duales, definidos igualmente en Be- renstein & Walnut (1994 y 1995) en términos de

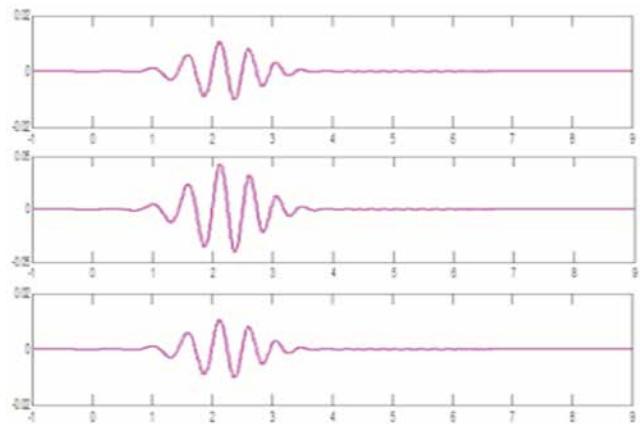
la transformada de Fourier de las duales (ecuacio- nes (60)-(63)), y que mediante la transformada de Hilbert y la transformada de la derivada se obtiene  $\rho_\theta^i$ :  $i = 1, 2, 3$ ; como se muestra en la figura 1.

$$\hat{\sigma}_\theta(\gamma) = \frac{1}{2} |\gamma| \hat{\phi}(\gamma \cos \theta) \hat{\phi}(\gamma \sin \theta) \quad (60)$$

$$\hat{\sigma}_\theta^1(\gamma) = \frac{1}{2} |\gamma| \hat{\phi}(\gamma \cos \theta) \hat{\phi}(\gamma \sin \theta) \quad (61)$$

$$\hat{\sigma}_\theta^2(\gamma) = \frac{1}{2} |\gamma| \hat{\phi}(\gamma \cos \theta) \hat{\phi}(\gamma \sin \theta) \quad (62)$$

$$\hat{\sigma}_\theta^3(\gamma) = \frac{1}{2} |\gamma| \hat{\phi}(\gamma \cos \theta) \hat{\phi}(\gamma \sin \theta) \quad (63)$$



**Figura 1.**  $\rho^1$  proyección 10, 45 y 90 grados.

**Fuente:** Elaboración propia.

## Inversión con wavelets separables

Una imagen  $f(\mathbf{x})$ ,  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^2$  de acuerdo con Be- renstein & Walnut (1994 y 1995), puede expresarse mediante la transformada wavelet a partir de la ecuación (64) o como las ecuaciones (65) y (66).

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{j,k} \sum_{i=1}^3 \langle f, \Psi_{j,k}^i \rangle \Psi_{j,k}^i = \sum_{j,k} \sum_{i=1}^3 \langle f, \Psi_{j,k}^i \rangle \Psi_{j,k}^i \quad (64)$$

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{k \in \mathbb{Z}^2} \langle f, \Phi_{j,k} \rangle \Phi_{j,k} + \sum_{j=-\infty}^J \sum_{k \in \mathbb{Z}^2} \sum_{i=1}^3 \langle f, \Psi_{j,k}^i \rangle \Psi_{j,k}^i \quad (65)$$

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{k \in \mathbb{Z}^2} \langle f, \Phi_{j,k} \rangle \Phi_{j,k} + \sum_{j=-\infty}^J \sum_{k \in \mathbb{Z}^2} \sum_{i=1}^3 \langle f, \Psi_{j,k}^i \rangle \Psi_{j,k}^i \quad (66)$$

Donde

$$\Phi_{j,k}(\mathbf{x}) = \varphi_{j,k_1}(x_1)\varphi_{j,k_2}(x_2)$$

$$\Psi_{j,k}^1(\mathbf{x}) = \varphi_{j,k_1}(x_1)\psi_{j,k_2}(x_2)$$

$$\Psi_{j,k}^2(\mathbf{x}) = \psi_{j,k_1}(x_1)\varphi_{j,k_2}(x_2)$$

$$\Psi_{j,k}^3(\mathbf{x}) = \psi_{j,k_1}(x_1)\psi_{j,k_2}(x_2)$$

Y

$$\Phi_{j,k}(\mathbf{x}) = \varphi_{j,k_1}(x_1)\varphi_{j,k_2}(x_2)$$

$$\Psi_{j,k}^1(\mathbf{x}) = \varphi_{j,k_1}(x_1)\psi_{j,k_2}(x_2)$$

$$\Psi_{j,k}^2(\mathbf{x}) = \psi_{j,k_1}(x_1)\varphi_{j,k_2}(x_2)$$

$$\Psi_{j,k}^3(\mathbf{x}) = \psi_{j,k_1}(x_1)\psi_{j,k_2}(x_2)$$

$$\Phi(x) = \varphi(x_1)\varphi(x_2) \quad (67)$$

$$\Psi^1(x) = \varphi(x_1)\psi(x_2) \quad (68)$$

$$\Psi^2(x) = \psi(x_1)\varphi(x_2) \quad (69)$$

$$\Psi^3(x) = \psi(x_1)\psi(x_2) \quad (70)$$

Las funciones duales respectivas, ecuaciones (71)-(74)

$$\Phi(x) = \varphi(x_1)\varphi(x_2) \quad (71)$$

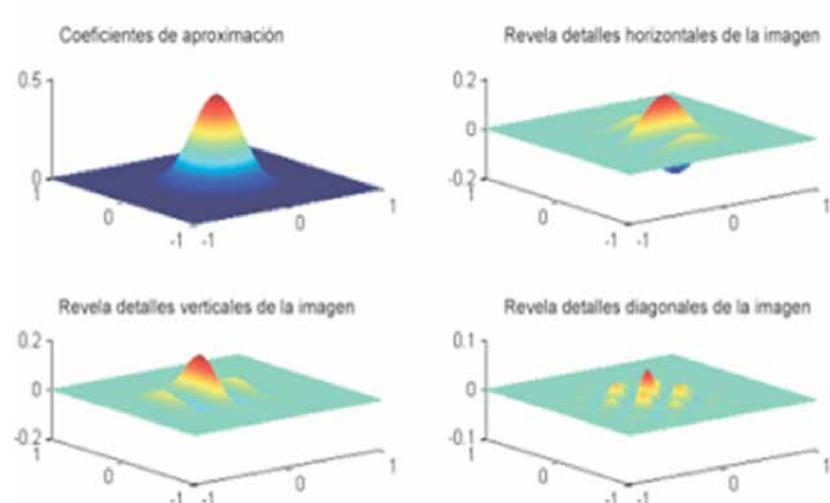
$$\Psi^1(x) = \varphi(x_1)\psi(x_2) \quad (72)$$

$$\Psi^2(x) = \psi(x_1)\varphi(x_2) \quad (73)$$

$$\Psi^3(x) = \psi(x_1)\psi(x_2) \quad (74)$$

Correspondiendo a las bases wavelets separables biortogonales de las *splines* cúbicas  $\varphi$  y  $\psi$ .

En la figura 2 se muestra la función escalada y wavelet.



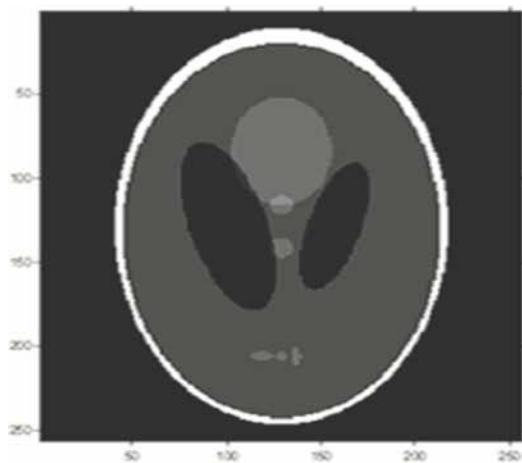
**Figura 2.** Las funciones escalada y wavelet separables, para la función  $f(\mathbf{x}), \mathbf{x} \in \mathbb{R}^2$ :  $\psi^1(x, y)$  (detalles horizontales).  $\psi^2(x, y)$  (detalles verticales);  $\psi^3(x, y)$  (detalles diagonales).

Fuente: Elaboración propia.

## ANÁLISIS Y RESULTADOS

En el algoritmo de reconstrucción que proponen los autores en Berenstein & Walnut (1994), basado en trabajos realizados sobre la localización de la transformada de Radon, las wavelets utilizadas son Daubechis de orden 4, 6, y 10. En el presente trabajo se ha acordado escoger la wavelet bior-*toogonal spline* cúbica con soporte compacto. Para comprobar la reconstrucción de una imagen cuya función inicial  $\psi$  es elegida como una wavelet de este tipo, entonces cada función o imagen de energía finita resulta ser una superposición de tales componentes multiplicadas por un coeficiente. Esta representación de la señal es única y conserva en los coeficientes la energía de la misma.

La imagen original tiene un tamaño de 512 x 512 pixeles, y los datos de los bordes locales se calcularon usando solamente proyecciones que atravesaban la región de interés escogida (figura 3).



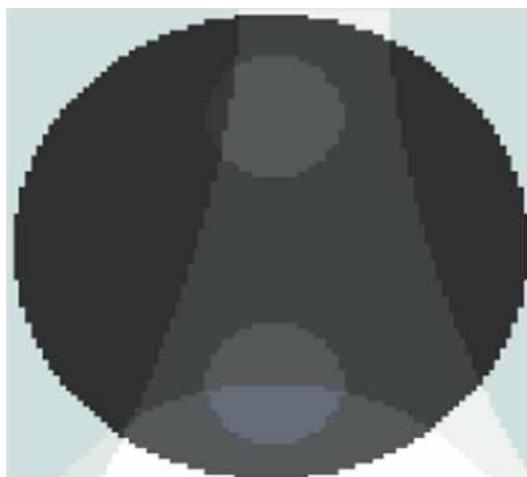
**Figura 3.** Fantasma de Shepp-Logan.

**Fuente:** Elaboración propia.

Se escoge una región de hasta 91 pixeles de diámetro localizada en el centro del fantasma de Shepp-Logan. La imagen fue reconstruida usando el algoritmo de transformada wavelet separable dada por la ecuación (66). Luego, se muestra la reconstrucción comparada con la reconstrucción estándar de retroproyección filtrada utilizando la transformada rápida de Fourier.

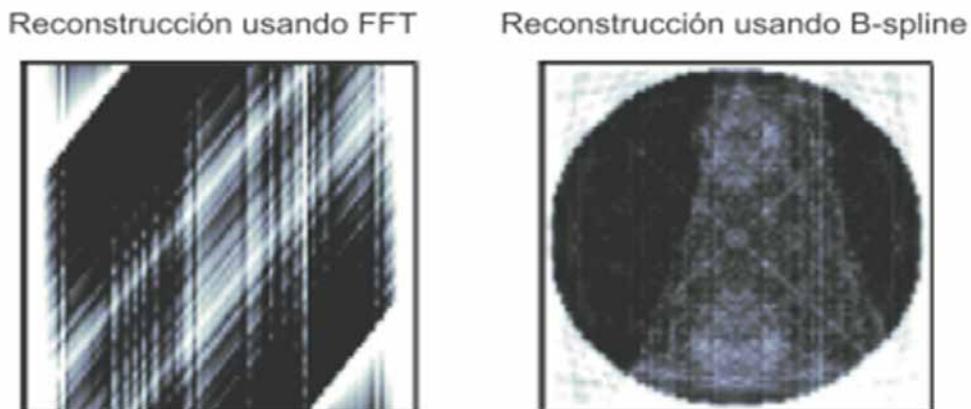
Como resultado, se ha implementado un algoritmo aprovechando las propiedades de las wavelets para localizar la transformada de Radon y usarla para reconstruir una región local. El algoritmo se basa en la observación intuitiva de que para algunas bases wavelet con momentos de desvanecimiento suficientemente numerosos, la versión rampa-filtrada de la función de escalado, así como la función wavelet tienen decaimiento rápido. Esto explica que un alto número de momentos de desvanecimiento puede contribuir al incremento en el decaimiento de transformada de Hilbert (Chaudhury & Unser, 2011). Es decir, dada  $\psi(x)$  una wavelet diferenciable con  $n$  momentos de desvanecimiento,  $H\psi(x)$  está bien definida y tiene a su vez  $n$  momentos de desvanecimiento. Así mismo la suavidad de  $H\psi(x)$  se tiene al sacar provecho del dominio de Fourier de la transformación, y el hecho de que la suavidad de una función se relaciona con el decaimiento de su transformada de Fourier. En general, cuanto mejor sea el decaimiento de la transformada de Fourier, más suave es la función, y viceversa. Como la wavelet B-spline cúbica es una señal de energía finita y pertenece al espacio de Sobolev  $W^{2,p}(\Omega)$  para todo  $p < 3 + \frac{1}{2}$ , esto explica la suavidad de la wavelet y su transformada de Hilbert utilizadas en el algoritmo diseñado, las cuales son dos veces continuamente diferenciables.

En la figura 4 se ilustra la región de interés, donde se puede variar la cantidad de pixeles del diámetro de la misma.



**Figura 4.** Región central del fantasma.

**Fuente:** Elaboración propia.

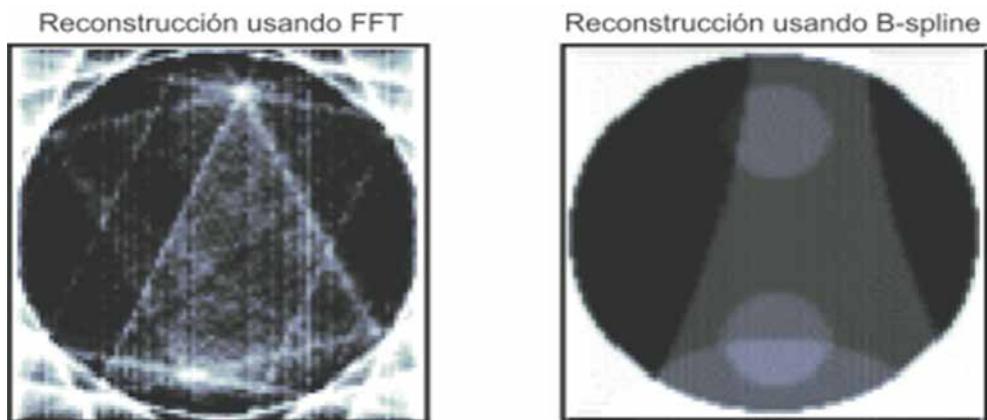


**Figura 5.** Reconstrucción utilizando 10 proyecciones.

**Fuente:** Elaboración propia.

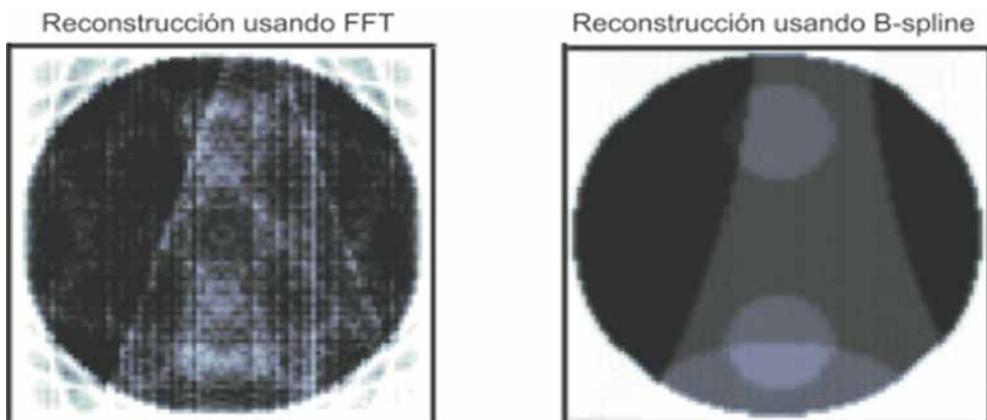
En la figura 5 se contrasta el resultado de la reconstrucción obtenida del algoritmo propuesto frente a la utilización del método basado en FFT, utilizando 10 proyecciones.

En la figura 6 se utilizan 55 proyecciones, y en la figura 7 se utilizan 80 proyecciones.



**Figura 6.** Reconstrucción utilizando 55 proyecciones.

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 7.** Reconstrucción utilizando 80 proyecciones.

**Fuente:** Elaboración propia.

De las anteriores gráficas se puede inferir que para reconstruir, incluso una pequeña ROI, se consideran algunos datos fuera de ella; Natterer (2001). Siguiendo a F. Rashid-Farrokhi, Liu & Berenstein (1995), y Rashid-Farrokhi, Liu & Berenstein (1997); Yin, Ferguson & Abbott (2009), los límites superiores del error en términos de la cantidad de tales datos no locales son mayores en el ilustrado en la reconstrucción estándar FFT (Brigham, 1989) que

con la implementada con B-spline, debido a la calidad de la localización wavelet pues los soportes de la wavelet madre y los filtros rampa escalados se mantienen en errores relativos inferiores a 0.4% utilizando cerca de 6 pixeles fuera de la ROI. En consecuencia, la mayor parte de la energía de una imagen se compacta en la imagen aproximada, por lo que la estimación de error allí da una buena indicación del error global.

## CONCLUSIONES

La propuesta de un algoritmo cuyo reconstructor se diseña a partir de wavelets escaladas y wavelets madre de tipo B-spline cúbicos, al evidenciar claramente la eficiencia del mismo, es una elección plausible puesto que ellas son wavelets con soporte compacto continuamente diferenciables. Este es el caso de la wavelet *spline* cúbica escogida, que, además de ser continuamente diferenciable, tiene momentos de desvanecimiento y satisface condiciones de decaimiento. Se concluye que la importancia de este resultado es formalizar que, al exigir que  $\psi(x)$  tenga un gran número de momentos de desvanecimiento, se puede efectivamente hacer  $H\psi(x)$  tan localizada como  $\psi(x)$ . Hasta ahora esto se había observado cualitativamente con la localización de la transformada wavelet de la transformada de Radon, Brigham (1989); Ramm & Zaslavsky (1993) y Destefano & Olson (1994). Teniendo en cuenta el caso especial de  $\psi(x)$  wavelet B-spline de grado  $n-1$ , entonces  $H\psi(x)$  vuelve a ser una wavelet B-spline fraccional del mismo grado, y por consiguiente tiene el mismo decaimiento; Unser & Aldroubi (1993); Chaudhury & Unser (2011). Por lo anterior, se garantiza la predicción de la reconstrucción propuesta, mejorando la basada en FFT, ya que se sabe que  $\psi(x)$  tiene  $n$  momentos de desvanecimiento. El método mostrado utiliza las propiedades de las wavelets B-spline cúbicas para localizar la transformada de Radon y poder reconstruir eficientemente una región local del fantasma de Shepp Logan, a partir de datos digitales.

Las wavelets pueden aplicarse con ventaja sobre otros métodos basados en Fourier, como se puede observar en las múltiples aplicaciones: Walnut(1992); Clarke (1995); Donoho (1993); Shapiro (1993); Quak, Weyrich (1994); Shen & Galerkin (2000); Tang & Yang (2000); Tao, Mang & Yuesheng (2000); Stark (2005), pues el procesamiento de imágenes es más eficiente por efecto de la capacidad de localización.

Como perspectiva de investigación, además de la utilidad sistemática en tomografía, actualmente se utilizan las wavelets en la investigación de materiales. En este sentido Lebon, Rodríguez-Ramos, López-Realpozo, Bravo-Castillero, Guinovart-Díaz & Mesejo (2006), por ejemplo, estudian teóricamente problemas unidimensionales de homogenización, en particular el caso de la determinación de propiedades efectivas de compuestos laminados con características especiales, solucionando numéricamente las ecuaciones resultantes con wavelets de soporte compacto y análisis multirresolución.

## FINANCIAMIENTO

Universidad EAFIT

## REFERENCIAS

- Aldroubi, A. (1996). The wavelet transform: A surfing guide. *Wavelets in Medicine and Biology*. A. Aldroubi, M. Unser (eds.), pp. 3-36. New York: CRC Press.
- Antonini, M.; Barlaud, P.; Mathieu, P.; Daubechies, I. (1992). Image Coding Using Wavelet Transform. *IEEE Trans. Image Proc.*, vol. 1(2), pp.205-220.
- Berenstein, C.; Walnut, D. (1994). Local inversion of the Radon transform in even dimensions using Wavelets. S. Gindikin and P. Michor, eds., *75 years of Radon Transform*, pp. 45-69. Cambridge, MA.: International Press Co., Ltd.
- Berenstein, C.; Walnut, D. (1995.). Wavelets and local tomography. *Wavelets in Medicine and Biology*. CRC Press.
- Brigham, E. (1988). *The Fast Fourier Transform and its Applications*. Ann Arbor, Michigan: Prentice Hall.
- Boggess, A.; Narcowich, F. (2007). *A First Course in Wavelets with Fourier analysis*. Ann Arbor, Michigan: Prentice Hall.
- Bonani, A.; Durand, S.; Weiss, G. Wavelets obtained by continuos deformations of the Haar wavelet. *Revisita Mat. Iberoamericana*, vol. 12(1).

- Chaudhury, K.; Unser, M. (April 2011). On the Hilbert Transform of Wavelets. *IEEE, Transactions on Signal Processing*, vol. 59(4).
- Chui, C. (1992). An Introduction to Wavelets. New York: Academic Press.
- Clarke, R. (1985). Transform Coding of Images. San Diego, CA: Academic Press.
- Clarke, R. (1995). Digital Compression of Still Images and Video. San Diego, CA: Academic Press.
- Daubechies, I. (1990). The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis. *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 36(11), pp. 961-1005.
- Daubechies, I. (1992). Ten Lectures on Wavelets. Philadelphia: CBMS Series 61, SIAM.
- Daubechies, I. (Aug. 2006). Orthonormal bases of compactly supported wavelets. *Communications on pure and Applied Mathematics*, vol. 41(7), pp. 909-996.
- Delaney, A.; Bresler, Y. (June 1995). Multiresolution tomographic reconstruction using wavelets. *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 4 (3).
- Destefano, J.; Olson, T. (Aug. 1994). Wavelet Localization of the Radon Transform. *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 42 (8), pp. 2055-2067.
- Donoho, D. (1993). Nonlinear Wavelet Methods for Recovery of Signals, Densities and Spectra from Indirect and Noyse Data. Different Perspectives on Wavelets. *Proceedings of Symposia in Pure Math.*, AMS., I. Daubechies, Edt., 47, pp. 173-205.
- Faridani, A.; Keinert, F.; Natterer, F.; Ritman, E.; Smith, K. (1990). Local and global tomography. New York: Springer-Verlag.
- Faridani, A.; Ritman, E.; Smith, K. (1993). Local Tomography. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, vol. 52(2), pp. 459-484.
- Faridani, A.; Finch, D.; Ritman, E.; Smith, K. (Aug. 1997). Local Tomography II. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, vol. 57( 4), pp. 1095-1127.
- Folland, G. (1999). Real Analysis. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2nd edition.
- Guédon, J.; Unser, M. (1992). Least squares and spline filtered back-projection. *NCRR Rep.* 52/92, Nat. Inst. Health.
- Goswami, J.; Chan, A. (1999). Fundamentals of Wavelets Theory, Algorithms, and Applications. John Wiley & sons, Inc.
- Helgason, S. (1999). The Radon Transform. Boston: Birkhäuser. Second Edition.
- Hernández, E.; Weiss, G. (1996). A First Course on Wavelets. Boca Raton FL: CRC Press.
- Hong, D.; Wang, J.; Gardner, R. (2005). Real Analysis with an Introduction to Wavelets and Applications. Academic Press, Elsevier.
- Irino, T.; Kawahara, H. (1993). Signal reconstruction from modified auditory wavelet transform. *IEEE Trans. Signal Process*, vol. 41(32), pp. 3549-3553.
- Kincaid, D.; Cheney, W. (1994). *Análisis Numérico*. Edit. E.U.A. pp. 323-363.
- Lebon, F.; Rodríguez-Ramos, R.; López-Realpozo, J.C.; Bravo-Castillero, J.; Guinovart-Díaz, R.; Mesejo, A. (January 2006). Effective Properties of Nonlinear Laminated Composites With Perfect Adhesion. *Transactions of the ASME*, vol. 73, pp. 174-178.
- López, R.; De Armas, R. (2010). Algoritmo para detectar eventos epilépticos a partir de wavelets analizando la función de energía. Tesis de maestría en matemáticas aplicadas. Universidad EAFIT, Medellín.
- Maass, P. (agosto 1992). The interior Radon Transform. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, vol. 52(3), pp. 710-724.
- Mallat, S. (1989). A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 11(33), pp. 674-693.
- Mallat, S. (1989). Multiresolution approximations and wavelet orthonormal bases for  $L_2$ . *Trans. of Amer. Math. Soc.* 315, pp. 69-87.
- Mallat, S.; Hwang, W. (1992). Singularity detection and processing with wavelets. *IEEE Trans. Inform. Theory* (Special Issue on Wavelet Transforms and Multiresolution Signal Analysis), 38(2), pp. 617-643.
- Mallat, S. (2008). Wavelet Tour of signal Processing. Boston: American Press.
- Mertins, A. (1996). Signal Analysis Wavelets, Filter Banks, Time-Frequency Transforms and Applications. New York: John Wiley & sons.
- Meyer, Y. (1990). Ondelettes et operateurs, I: Ondelettes. Paris: Herman.

- Natterer, F. (2001). The Mathematics of Computerized Tomography. SIAM.
- Natterer, F.; Wübbeling, F. (2001). Mathematical Methods in Image Reconstruction. SIAM.
- Pinsky, M. (2001). Introduction to Fourier Analysis and wavelet. Brooks/Cole, NJ.
- Quak, E.; Weyrich, N. (1994). Decomposition and reconstruction algorithms for spline wavelet on a bounded interval. *Appl. and Comp. Harmonic Anal. (ACHA)*, vol. 1, pp. 217-231.
- Ramm, A.; Zaslavsky, A. (1993). Reconstructing singularities of a function from its Radon transform. *Math. and Comput. Modelling*, vol. 18(1), pp. 109-138.
- Ramm, A.; Zaslavsky, A. (1993). Singularities of the Radon transform. *Bull. AMS*, vol. 25(1), pp. 109-115.
- Rashid-Farrokhi, F.; Liu, K.; Berenstein, C.; Walnut, D. (1995). Localized wavelet based computerized tomography. Washington: Proceedings ICIP-95.
- Rashid-Farrokhi, F.; Liu, R., K.J.; Berenstein, C.; Walnut, D. (Oct. 1997). Wavelet-Based Multiresolution Local Tomography. *IEEE. Trans. On image Process*, vol. 6(10), pp. 1412-1429.
- Rioul, O.; Duhamel, P. (1992). Fast algorithms for discrete and continuous wavelet transform. *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 38, pp. 569-586.
- Shapiro, J. (1993). Embedded image coding using zero-trees of wavelet coefficients. *IEEE Trans. Signal Proc.*, vol. 41, pp. 3445-3462.
- Shen, X.; Galerkin, A. (2000). Wavelet method for a singular convolution equation on the real line. *J. Int. Equa. Appl.*, vol. 12, pp. 157-176.
- Stark, H. (2005). Wavelets and Signal Processing An Application-Based Introduction. Springer.
- Tang, Y.; Yang, L. (2000). Wavelet Theory and Its Application to Pattern Recognition. World Scientific.
- Tao, Q.; Mang, V.; Yuesheng, X. (2000). Wavelet Analysis and Applications. Berlin: Birkhäuser Verlag Basel.
- Unser, M.; Aldroubi, A.; Murray, E. (1993). A family of polynomial spline wavelet transforms. *Signal Processing*, vol. 30, pp. 141-162.
- Unser, M.; Aldroubi, A. (1993). B-spline processing I: Theory and II: Efficient design and application. *IEEE Trans. Signal Process*, vol. 41, pp. 821-848.
- Unser, M. (1996). A practical guide to implementation of the wavelet transforms. *Wavelets in Medicine and Biology*. New York: CRC Press, pp. 37-76.
- Walker, J. (2008). Local inversion of the Radon Transform in the plane using wavelets. *A Primer on wavelets and Their Scientific Applications*. Second edition. Chapman & Hall/CRC. Taylor & Francis Group.
- Walnut, D. (1992). Application of Gabor and Wavelet expansions to the Radon Transform, *Probabilistic and Stochastic Methods in Analysis, with applications*. J. Byrnes et al. eds., Kluwer Academic Publishers, Inc., pp. 187-205.
- Walnut, D. (1993). Local inversion of the Radon Transform in the plane using wavelets. San Diego: Proceedings of SPIE's. International Symposium on Optics, Imaging, and Instrumentation.
- Walnut, D. (2002). An Introduction to Wavelet Analysis. Birkhäuser.
- Walter, G.; Shen, X. (1999). Deconvolution using Meyer wavelets. *J. Integral Equations Appl.*, vol. 11, pp. 515-534.
- Wojtaszczyk, P. (1997). A Mathematical Introduction to Wavelets. Cambridge University Press.
- Yin, X.; Ferguson, B.; Abbott, D. (2009). Wavelet based local tomographic image using terahertz techniques. *Digital Signal Processing*, vol. 19, pp. 750-763. Elsevier.





## Resistencia bajo carga monotónica de mezclas de concreto asfáltico modificadas con gilsonita por vía seca

### Monotonic loading strength of hot asphalt mixtures modified with gilsonite by dry-way

Hugo Alexander Rondón Quintana\*, Edgar Humberto Sánchez Cotte\*\*, Jesús Orlando Castaño Tabares\*\*\*

Citation / Para citar este artículo: Rondón Quintana, H. A., Sánchez Cotte, E. H., & Castaño Tabares, J. O. (2014). Resistencia bajo carga monotónica de mezclas de concreto asfáltico modificadas con gilsonita por vía seca. Revista *Tecnura*, Edición especial, 31-37.

**Fecha de recepción:** 29 de noviembre de 2013 / **Fecha de aceptación:** 11 de julio de 2014

#### RESUMEN

El artículo presenta los resultados experimentales de ensayar tres mezclas asfálticas densas en caliente (concreto asfáltico) tipos MDC-1, MDC-2 y MDC-3 (de acuerdo con las especificaciones del Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2007) modificadas por vía seca con un asfalto natural de tipo gilsonita (G) proveniente de la región del Cesar, Colombia. Para la elaboración de las mezclas y la evaluación de las mismas se empleó el cemento asfáltico (CA) que actualmente se fabrica en Colombia: CA 60-70 (PG 58-22). Para la evaluación de la resistencia mecánica bajo carga monotónica de las mezclas asfálticas convencionales (sin gilsonita) y modificadas se empleó el ensayo Marshall. Se reporta un incremento notable en la rigidez de las mezclas modificadas cuando se adiciona a las mismas una relación de gilsonita y CA de G/CA = 10%.

**Palabras clave:** Concreto asfáltico, gilsonita, mezcla asfáltica modificada, resistencia bajo carga monotónica.

#### ABSTRACT

This paper presents the experimental results on three hot asphalt mixtures (HMA) types MDC-1, MDC-2 and MDC-3 (INVIAS, 2007) modified by dry-way with a natural asphalt called Gilsonite (G) from Cesar region (Colombia). Asphalt cement AC 60-70 (PG 58-22) was used in the preparation and evaluation of the mixtures, which is currently manufactured in Colombia. For the evaluation of mechanical strength under monotonic loading of conventional (no Gilsonite) and modified asphalt mixtures, the Marshall Test was performed. This paper reports a notable increase in the stiffness of modified mixtures when adding a relationship of Gilsonite and G/AC = 10%.

**Keywords:** Asphalt concrete, Gilsonite, modified asphalt mixture, monotonic loading strength.

\* Ingeniero civil, magíster en ingeniería civil y doctor en ingeniería. Docente, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: [harondonq@udistrital.edu.co](mailto:harondonq@udistrital.edu.co)

\*\* Ingeniero civil, magíster en ingeniería civil con énfasis en gerencia y construcción. Docente, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: [esanchezc@udistrital.edu.co](mailto:esanchezc@udistrital.edu.co)

\*\*\* Ingeniero civil, máster en ingeniería del hormigón. Docente, Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia. Contacto: [jesus.castano@javeriana.edu.co](mailto:jesus.castano@javeriana.edu.co)

## INTRODUCCIÓN

De acuerdo con (Sagamone, 1995), el asfalto natural es un material bituminoso natural en estado sólido compuesto por hidrocarburos de alto peso molecular en estratos que pueden ir desde algunos centímetros a decenas de metros de espesor; presentan gran variedad en su dureza, por lo que su punto de fusión puede ir de 100 °C a más de 300 °C. En Colombia existe una gran cantidad de yacimientos de asfaltos naturales. Se identifican depósitos, principalmente en los departamentos de Boyacá, Caquetá, Caldas, Cundinamarca, Tolima, Santander y Cesar.

La gilsonita es uno de los asfaltos naturales de mayor pureza. Posee baja gravedad específica, bajo carbón fijo y contenido de azufre. Este material fue utilizado por uno de los autores para modificar por vía húmeda dos cementos asfálticos colombianos (Rondón & Reyes, 2012), con el fin de producir una mezcla de concreto asfáltico y evaluar sus propiedades bajo carga monotónica y dinámica. Los resultados obtenidos del estudio demostraron que las mezclas asfálticas modificadas con la gilsonita por vía húmeda (adicionándola al cemento asfáltico) generan mezclas de concreto asfáltico más rígidas, llevando a pensar que tendrían un buen desempeño en climas cálidos. Los valores de estabilidad y rigidez Marshall de las mezclas modificadas fueron mayores para cualquier porcentaje de asfalto y gilsonita, en comparación con la mezcla convencional. Los módulos resilientes de las mezclas modificadas fueron superiores a los alcanzados por las convencionales, y los mayores incrementos se obtuvieron cuando la temperatura del ensayo aumentaba. Lo anterior permitió concluir que la gilsonita como modificador de asfaltos puede ser un material que mejore las características de rigidez y resistencia a las deformaciones permanentes de mezclas que se utilicen en climas cálidos. Una conclusión similar fue reportada por (Liu & Li, 2008) cuando modificaron un cemento asfáltico de Alaska con gilsonita por vía húmeda en porcentajes entre 3% y 12% con respecto al peso total del

CA. (Esfeh, Ghanavati, & GhaleGolabi, 2011) mencionan que adicionar gilsonita a un asfalto ayuda a incrementar la viscosidad y disminuye la penetración rigidizando el ligante.

En el presente estudio, a diferencia del reportado por (Rondón & Reyes, 2012), la modificación de las mezclas se ejecutó por vía seca y no por vía húmeda, es decir, la gilsonita se adicionó al agregado pétreo y no al asfalto. Lo anterior, con el fin de medir si las mezclas de concreto asfáltico experimentan un buen comportamiento bajo carga monotónica cuando se modifican con gilsonita por vía seca, ya que esta forma de modificación permite reducir costos de fabricación de las mismas en las plantas de asfalto.

El artículo presenta una fase experimental diseñada con el fin de evaluar la resistencia bajo carga monotónica de tres mezclas de concreto asfáltico de tipos MDC-1, MDC-2 y MDC-3 (de acuerdo con las especificaciones del Instituto Nacional de Vías (INVIA, 2007) modificadas con un asfalto natural de tipo gilsonita (G) proveniente de la región del Cesar, Colombia. El cemento asfáltico (CA) utilizado para la fabricación de las mezclas es el que actualmente se fabrica en Colombia: CA CA 60-70 (se refiere a un CA cuya medida en el ensayo de penetración ASTM D-5 está en un rango entre 60 y 70 décimas de mm). Este ligante presenta un grado de funcionamiento PG 64-22. La gilsonita se adicionó al agregado pétreo de la mezcla asfáltica a alta temperatura (modificación por vía seca). Para la evaluación de la resistencia mecánica bajo carga monotónica de las mezclas asfálticas convencionales (sin aditivo o gilsonita) y modificadas se empleó el ensayo Marshall (INV. E-748-07, AASHTO T 245 – 97).

## METODOLOGÍA

### Caracterización de materiales

En la tabla 1 se presentan los valores obtenidos de los ensayos de caracterización al agregado pétreo. Se observa en esta tabla que los valores de cada

uno de los ensayos cumplen con el requisito mínimo de calidad exigido por las especificaciones (INVIAS, 2007) para fabricar mezclas de concreto asfáltico de tipos MDC-1, MDC-2 y MDC-3. Para cumplir con las especificaciones del (INVIAS, 2007), se modificó la granulometría original de los agregados, tomando como referencia los valores promedio en porcentajes de la franja granulométrica que exige la especificación para la elaboración de las mezclas (ver la tabla 2). Al cemento asfáltico se le hicieron los ensayos típicos que exige la especificación (INVIAS, 2007) para caracterizarlos

y los resultados se presentan en la tabla 3. La gilsonita utilizada proviene de la mina San Alberto (Cesar, Colombia). Una descripción detallada de la gilsonita puede consultarse en (INVIAS, 1997). Este material presenta un peso específico de 1.10 g/cm<sup>3</sup> y partículas de coloración negra brillante que pasan el tamiz No. 40 en un ensayo de granulometría por tamizado (ver la figura 1). Sobre el CA convencional y modificado se efectuaron ensayos de penetración (INV. E-706) a diferentes temperaturas y punto de ablandamiento, siguiendo los procedimientos recomendados por (INVIAS, 2013a).

**Tabla 1.** Caracterización del agregado pétreo y granulometría.

Ensayo	Método	Resultado
Peso específico (gruesos y finos)	ASTM D 854-00	2,62
Equivalente de arena	ASTM D 2419-95	76%
Caras fracturadas	ASTM D 5821-01	87%
Índice de alargamiento	NLT 354-91	9,5%
Índice de aplanamiento	NLT 354-91	9,5%
Ataque en sulfato de sodio	ASTM C 88-99a	12,9%
Microdeval	ASTM D6928-03	22,3%
Resistencia al desgaste Máquina de los Ángeles	ASTM C 131-01	24,6%

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 2.** Granulometría de agregados pétreos para la fabricación de las mezclas.

Tamiz		Mezcla		
Normal	Alterno	MDC-1	MDC-2	MDC-3
37.5 mm	1 1/2"	-	-	-
25.0 mm	1"	100	-	-
19.0 mm	3/4"	80-95	100	-
12.5 mm	1/2"	67-85	80-95	-
9.5 mm	3/8"	60-77	70-88	100
4.75 mm	No. 4	43-59	49-65	65-87
2.00 mm	No. 10	29-45	29-45	43-61
0.425 mm	No. 40	14-25	14-25	16-29
0.180 mm	No. 80	8-17	8-17	9-19
0.075 mm	No. 200	4-8	4-8	5-10

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 3.** Características generales del CA 60-70.

Ensayo	Método	Unidad	CA 60-70
<b>Ensayos sobre el CA original</b>			
Penetración (25 °C, 100 g, 5 s)	ASTM D-5	0.1 mm	65
Índice de penetración	NLT 181/88	-	-0,7
Viscosidad absoluta (60 °C)	ASTM D-4402	Poises	1750
Ductilidad (25 °C, 5 cm/min)	ASTM D-113	cm	> 105
Solubilidad en tricloroetileno	ASTM D-2042	%	> 99
Contenido de agua	ASTM D-95	%	< 0,2
Punto de inflamación COC	ASTM D-92	°C	275
<b>Ensayos sobre el residuo del CA luego del RTFOT</b>			
Pérdida de masa	ASTM D-2872	%	0,4
Penetración (25 °C, 100 g, 5 s)	ASTM D-5	%	70

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 1.** Gilsonita antes y después de trituración.

**Fuente:** Elaboración propia.

## Diseño de mezclas asfálticas

Luego de realizar los ensayos al agregado pétreo y a los ligantes asfálticos se fabricaron cinco briquetas (compactadas a 75 golpes por cara) para cada porcentaje de asfalto de 4,5%, 5,0%, 5,5%, 6,0 y 6,5%, con el fin de efectuar el diseño Marshall para determinar el contenido óptimo de asfalto de

las mezclas convencionales (sin gilsonita). Los porcentaje óptimos de cemento asfáltico fueron 5,0%, 5,3% y 5,5% para el caso de las mezclas de tipos MDC-1, MDC-2 y MDC-3, respectivamente (ver las tablas 4-6). En estos porcentajes se están cumpliendo los requisitos mínimos exigidos por la especificación (INVIAS, 2007) para tránsitos de tipos NT1 y/o NT2 (bajos y medios volúmenes de tránsito).

**Tabla 4.** Resultados del ensayo Marshall para diseño de mezcla MDC-1.

CA [%]	Estabilidad- <i>E</i> [kg]	Flujo- <i>F</i> [mm]	<i>E/F</i> [kg/mm]	Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	Vacíos [%]	Vacíos en AP [%]
4,5	1701,92	4,11	413,61	2,238	8,44	18,41
5,0	1610,52	3,78	425,55	2,281	5,99	17,29
5,5	1571,90	4,17	377,35	2,284	5,20	17,63
6,0	1284,71	4,98	258,06	2,292	4,16	17,77

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 5.** Resultados del ensayo Marshall para diseño de mezcla MDC-2.

CA [%]	Estabilidad- <i>E</i> [kg]	Flujo- <i>F</i> [mm]	<i>E/F</i> [kg/mm]	Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	Vacíos [%]	Vacíos en AP [%]
4,5	1396,54	3,73	374,03	2,257	7,66	17,71
5,0	1500,60	3,73	401,90	2,288	5,72	17,05
5,5	1551,87	3,78	410,05	2,295	4,71	17,21
6,0	1235,97	4,72	261,61	2,300	3,80	17,47

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 6.** Resultados del ensayo Marshall para diseño de mezcla MDC-3.

CA [%]	Estabilidad- <i>E</i> [kg]	Flujo- <i>F</i> [mm]	<i>E/F</i> [kg/mm]	Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	Vacíos [%]	Vacíos en AP [%]
4,5	1214,60	3,91	310,51	2,279	6,78	16,93
5,0	1278,11	3,78	337,71	2,316	4,56	16,02
5,5	1321,77	3,91	337,91	2,311	4,08	16,66
6,0	1176,73	4,88	241,29	2,307	3,51	17,22

**Fuente:** elaboración propia

## Fase experimental

Una vez se obtuvo el porcentaje óptimo de CA, se fabricaron nuevas briquetas agregando por vía seca la gilsonita a la mezcla asfáltica en relaciones de gilsonita y cemento asfáltico de G/CA = 5, 10, 15, 20, 25, 30% (con respecto al peso total del cemento asfáltico). Por vía seca se entiende que el aditivo (la gilsonita en este caso) se adiciona a alta

temperatura al agregado pétreo en el momento de la fabricación de la mezcla. Por cada porcentaje de aditivo se fabricaron cinco briquetas para ensayarlas en el aparato Marshall con el fin de evaluar la respuesta que experimentan las mezclas bajo carga monotónica. La temperatura de mezclado del CA con la gilsonita y el agregado pétreo fue 160 °C. Se escogió esta temperatura debido a que por encima de la misma el asfalto experimenta

envejecimiento por pérdida de componentes químicos por oxidación, y por debajo el mezclado se dificulta especialmente cuando el contenido de gilsonita es alto.

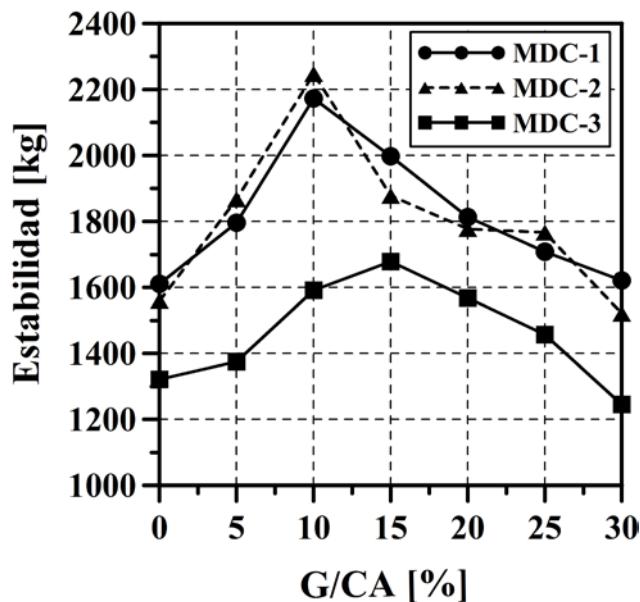
El ensayo que se ejecutó para evaluar la resistencia bajo carga monotónica de las mezclas convencionales y modificadas con gilsonita fue el Marshall (INV. E-748-07, AASHTO T 245-97).

## RESULTADOS

En las figuras 2-4 se observa la evolución de la estabilidad ( $E$ ), la relación estabilidad – flujo ( $E/F$ ) y los vacíos con aire de la mezcla con el contenido de gilsonita (G) adicionado a las mezclas de concreto asfáltico de tipos MDC-1, MDC-2 y MDC-3.

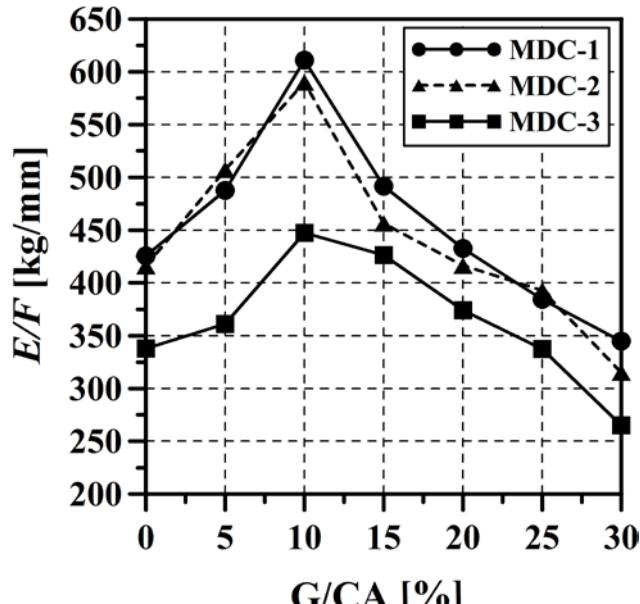
En la figura 2 se observa un incremento de 34,9%, 44,1% y 20,4% en la estabilidad cuando las mezclas MDC-1, MDC-2 y MDC-3, respectivamente, se modifican por vía seca con un contenido de G de 10% con respecto a la masa del CA. En ese mismo porcentaje de gilsonita y CA ( $G/CA = 10\%$ ), las mezclas MDC-1, MDC-2 y MDC-3 experimentan un incremento en su resistencia bajo carga monotónica ( $E/F$ ) de 43,46%, 41,8% y 32,4%, respectivamente (ver la figura 3). A partir de dicha relación  $G/CA$ , las mezclas experimentan un decaimiento en su resistencia  $E/F$  debido en gran parte al incremento notable en los vacíos con aire en la mezclas (ver la figura 4).

Es interesante observar en la figura 4 que las mezclas experimentan el mayor incremento en rigidez y resistencia reportado con anterioridad cuando la relación  $G/CA = 10\%$ , aunque aumentan sus vacíos con aire. Para el caso de las mezclas MDC-1, MDC-2 y MDC-3, cuando la relación  $G/CA = 10\%$ , los vacíos con aire aumentan desde 5,99% hasta 7,93%, 5,0% a 6,66% y 4,08% a 4,94%, respectivamente.



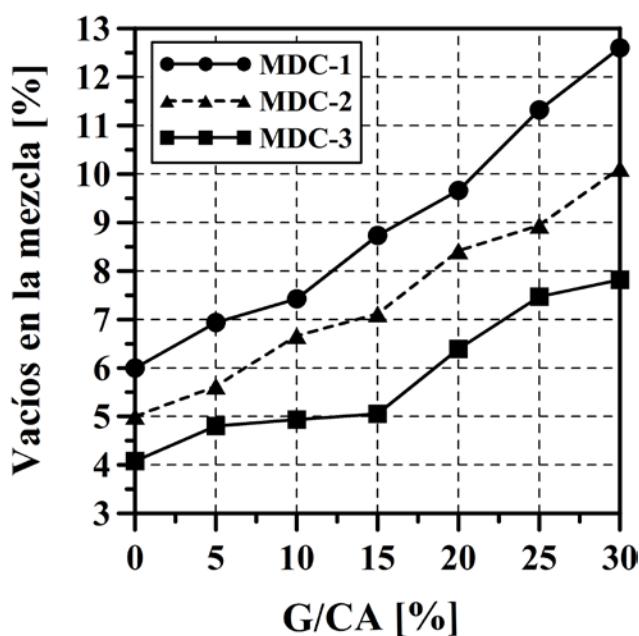
**Figura 2.** Evolución de la estabilidad con la relación G/CA.

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 3.** Evolución de la relación estabilidad/flujo con la relación G/CA.

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 4.** Evolución de los vacíos con aire en la mezcla con la relación G/CA.

**Fuente:** Elaboración propia.

## CONCLUSIONES

El presente estudio midió la resistencia bajo carga monotónica que experimentan tres mezclas de concreto asfáltico cuando se modifican por vía seca con un asfalto natural de tipo gilsonita.

Se reporta un incremento entre 32,4% y 43,46% en dicha resistencia cuando se adiciona al agregado pétreo de las mezclas un contenido de gilsonita de 10% con respecto al peso del cemento asfáltico. Este incremento es mayor cuanto mayor sea el tamaño máximo de la partícula del agregado pétreo que conforma la mezcla asfáltica. Además se observa que dicho incremento lo experimentan las mezclas aunque el contenido de vacíos de las mismas aumenta.

El incremento en rigidez reportado en las mezclas asfálticas modificadas hace prever que la gilsonita como aditivo modificador de mezclas puede emplearse para mejorar la resistencia de las mismas a fenómenos como el ahueamiento a altas temperaturas de servicio. Sin embargo, a bajas temperaturas la mezcla podría experimentar fragilización disminuyendo su resistencia a fenómenos como el agrietamiento por bajas temperaturas o la fatiga.

## FINANCIAMIENTO

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

## REFERENCIAS

- Esfeh, H. K., Ghanavati, B., & GhaleGolabi, T. (2011). Properties of Modified Bitumen Obtained from Natural Bitumen by Adding Pyrolysis Fuel Oil. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 2(3), 168-172.
- INVIAS (1997). *La Asfaltita como Modificador de los Asfaltos Colombianos. Modificación de Asfalto de la Refinería de Cartagena con Asfaltita*. Bogotá, D.C., Colombia: Instituto Nacional de Vías.
- INVIAS (2013). *Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras*. Bogotá, D.C.: INVIAS.
- INVIAS (2013a). *Normas de Ensayos de Materiales para Carreteras*. Bogotá, D.C.: Instituto Nacional de Vías.
- Liu, J., & Li, P. (2008). Experimental study on Gilsonite-modified asphalt. *Airfield and Highway Pavements: Efficient Pavements Supporting Transportation's Future* (pp. 222-228). Bellevue, Washington: ASCE.
- Rondón, H. A., y Reyes, F. A. (2012). Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente modificada con asfaltita. *Revista de Ingeniería* (36), 12-19.
- Sagamone, P. (1995). *Los asfaltos naturales colombianos*. Bogotá D.C.: Instituto Nacional de Vías, Oficina de Investigaciones y Desarrollo Tecnológico.





## Cuantificación de existencias de compuestos bifenilos policlorados (PCB) en Colombia

### Stocks quantification of polychlorinated biphenyl compounds (PCB) in Colombia

Martha Lucía Vaca Bohórquez\*, César Augusto García Ubaque\*\*,  
Juan Carlos García Ubaque\*\*\*

Citation / Para citar este artículo: García Ubaque, C. A., García Ubaque, J. C., & Vaca Bohórquez, M. L. (2014). Cuantificación de existencias de compuestos bifenilos policlorados (PCB) en Colombia. Revista Tecnura, Revista Tecnura, 39-44.

**Fecha de recepción:** 29 de noviembre de 2013 / **Fecha de aceptación:** 11 de julio de 2014

#### Resumen

Los compuestos bifenilos policlorados, más conocidos como PCB, son sustancias de alta toxicidad tanto para el ser humano como para los ecosistemas. El Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP), entre los que se encuentran los PCB, establece la necesidad de que los países tomen medidas para reducir o eliminar el uso de equipos eléctricos que aún funcionen con PCB. Por esta razón, el Ministerio de Ambiente de la República de Colombia (MINAMBIENTE) desarrolló un inventario sobre las existencias globales de PCB en uso. En este artículo se presentan la metodología seguida y los resultados consolidados de dicho inventario. El informe indica que las existencias estimadas de PCB en Colombia están entre 9.771 y 12.803 toneladas.

**Palabras clave:** bifenilos policlorados, compuestos orgánicos persistentes, ecotoxicidad, inventarios.

#### Abstract

Polychlorinated biphenyl compounds (PCB) are high toxicity substances for humans as well as for ecosystems. The Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants, including PCB, establishes the need for countries to reduce or eliminate the use of electrical equipment that still operates with PCB. Thus, the Ministry of Environment, Housing and Territorial Development in Colombia (MINAMBIENTE) conducted a preliminary inventory of PCB in use. This article presents the methodology and results of this inventory. The report shows that estimated stocks of PCB in Colombia are among 9.771 and 12.803 tons.

**Keywords:** ecotoxicity, inventories, persistent organic compounds, polychlorinated biphenyls.

\* Psicóloga, especialista en salud ocupacional, especialista en derecho ambiental, magíster en Business Administration, consultora independiente, Bogotá, Colombia. [ml.vaca68@uniandes.edu.co](mailto:ml.vaca68@uniandes.edu.co)

\*\* Ingeniero civil, magíster en ingeniería ambiental, doctor en ingeniería; docente, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. [cagarciau@udistrital.edu.co](mailto:cagarciau@udistrital.edu.co)

\*\*\* Médico, magíster en salud pública, doctor en salud pública; docente, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. [jgarciau@unal.edu.co](mailto:jgarciau@unal.edu.co)

## INTRODUCCIÓN

Los bifenilos policlorados (PCB) son una clase de productos químicos orgánicos sintéticos, fabricados desde 1930, que debido a su estabilidad química son resistentes al fuego, tienen baja conductividad eléctrica, alta resistencia a la ruptura térmica, a oxidantes y otros productos químicos, por lo cual se han usado como fluidos dieléctricos, retardantes de llama, solventes, intercambiadores de calor, etc. (UNEP, 2003). Hacia 1970 se encontró que estas sustancias representaban una grave amenaza para la salud humana y el medio ambiente y poco a poco su producción se detuvo. Los efectos adversos asociados con la exposición de los PCB se dan en el sistema inmunológico, hígado, piel, sistema reproductor, aparato gastrointestinal y la glándula tiroides (Boix & Cauli, 2012); (Chiu-Yueh, Tien-Shang, Kao-Chang, Pei-Chien, & Yue Leon, 2011) (Remer & Boekelheide, 2013).

Se estima que alrededor de 1,7 millones de toneladas de PCB se produjeron entre 1929 y 1989 y muchos de los equipos que contienen PCB están todavía en uso en algún lugar o almacenados a la espera de disposición final. Como los PCB una vez liberados al medio ambiente no se descomponen pero sí pueden viajar largas distancias, continúan planteando riesgos para la salud a los seres humanos, por lo cual es importante eliminar su uso y destruir los arsenales existentes. Las opciones de destrucción son principalmente la entrada de energía química o térmica a través de la ruptura de los enlaces moleculares y el método más común es la incineración de alta temperatura, aunque existen otros métodos no térmicos como la dechloración (PNUMA, 2005) (Seeger, Timmis, & Hofer, 1997) (Shimura, Koana, Fukuda, & Kimbara, 1996) (Zanaroli, y otros, 2010) (Librando, y otros, 2013).

En respuesta a esta problemática, el Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP) ha requerido a los países la adopción de medidas para reducir el uso y eliminar de una manera ambientalmente racional los equipos, los líquidos y los desechos contaminados con PCB

tan pronto como sea posible, pero a más tardar en el año 2028 (MINAMBIENTE, 2007). Para esto, los países deberán comenzar a hacer esfuerzos decididos para identificar, etiquetar y retirar de uso los equipos con PCB y promover medidas para la reducción de la exposición y el riesgo para la salud humana y el ambiente. De hecho, la cuantificación e identificación de los PCB presentes en el medio ambiente que aún tienen contacto cotidiano con la población humana son objeto de numerosas investigaciones en los territorios de países fabricantes, como Estados Unidos, Italia, Alemania, China y Japón, entre otros (Delistraty, 2013) (Clarke, Porter, Marriot, & Blackbeard, 2010) (Hopf, Ruder, & Sucoop, 2009) (Bianco, y otros, 2009), así como en países solo consumidores (Mohammed, y otros, 2011) (Dodoo, Esumang, & Johathan, 2013).

Este artículo presenta los resultados obtenidos en el Inventario Nacional de Existencias de Bifenilos Policlorados (PCB) en Colombia, realizado como parte del proyecto de asistencia técnica “Actividades Habilitadoras sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP) en Colombia” (MINAMBIENTE, 2007). El alcance del inventario comprendió la investigación a los sectores eléctricos del Sistema Interconectado Nacional (líneas mayores o iguales a 34,5 kW, subestaciones, generadores y distribuidores asociados a estas líneas), empresas de gran consumo de energía ( $> 1$  MW) de otros sectores y a los fabricantes, comercializadores y reparadores de equipos eléctricos, al año de referencia 2002.

## METODOLOGÍA

La metodología seguida para este inventario siguió los lineamientos de la guía para la identificación de PCB y los materiales que contienen PCB de las Naciones Unidas (UNEP, 1999). Se siguieron estas etapas:

1. Recolección de información secundaria, mediante la consulta de otros inventarios efectuados en la región (Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, México, Paraguay, Uruguay y Venezuela), registros de

- importaciones y exportaciones, empresas del sistema de interconexión eléctrica, autoridades ambientales locales y otras entidades gubernamentales.
- Selección de una muestra estadística para la recolección de información directa. Se utilizó el muestreo aleatorio estratificado y por conglomerados. Se dividió la población en cinco estratos, de acuerdo con la capacidad y tipo de transformadores (ver la tabla 1).

**Tabla 1.** Clasificación por estratos.

Estrato	Descripción
1	Empresas generadoras netas.
2	Empresas con < 1.000 transformadores.
3	Empresas entre 1.001 y 10.000 transformadores.
4	Empresas entre 10.001 y 20.000 transformadores.
5	Empresas con > 20.001 transformadores.

**Fuente:** (MINAMBIENTE, 2007).

Para efectuar el cálculo del tamaño de la muestra se utilizó la ecuación (1).

$$n = \frac{\sum_{h=1}^1 W_h \left[ \frac{N_h P_h Q_h}{N_h - 1} \right]}{V(\hat{p}) + \left( (1/N) \left\{ \sum_{h=1}^1 W_h \left[ \frac{N_h P_h Q_h}{N_h - 1} \right] \right\} \right)} \quad (1)$$

Donde:

1: Número de estratos

$N_h$ : Universo o población de instalaciones en cada estrato

N: Universo o población total, corresponde a  $N = \sum_{h=1}^1 N_h$

$W_h$ : Corresponde a la relación  $\frac{N_h}{N}$

$P_h$ : Proporción de casos de interés en cada estrato, que se define como  $p$  igual para todos los estratos en 10%

$Q_h$ : Se determina mediante la ecuación  $Q_h = 1 - P_h$

Varianza esperada para el estimador del parámetro.

Se obtiene con  $V_{(\hat{p})} = \left( \frac{d}{Z_{\alpha/2}} \right)^2$ , donde  $d$  = error de estimación de 0,01  $Z_{\alpha/2}$  y = percentil  $(1-\alpha/2)*100$  de la distribución normal estándar. En este caso 1,64, que corresponde a un nivel de confianza de 90%.

- El territorio nacional se dividió en seis zonas: a) Costa Atlántica; b) Región Cundiboyacense y Meta; c) Eje Cafetero, Antioquia y Córdoba; d) Costa Pacífica y Valle del Cauca; e) Nariño, Cauca y Putumayo; f) Santanderes y Cesar.
- Envío de cuestionarios para obtener información sobre las características de los equipos eléctricos existentes. Solamente los sectores eléctrico, manufactura e hidrocarburos reportaron tener existencias de PCB.
- Realización de visitas de campo. Se visitaron algunas instalaciones con el fin de identificar las condiciones de almacenamiento de equipos eléctricos y aceites y determinar sitios potencialmente contaminados.
- Cuantificación de existencias de PCB reportadas directamente. Se registró la información de residuos sólidos y aceites con concentraciones de PCB > 50 ppm o con PCB puro.
- Realización de muestreos de PCB para validar información. Mediante estas mediciones se establecieron índices de probabilidad de contaminación de un transformador, de acuerdo con la marca, potencia, país y año de fabricación.
- Realización del inventario estimado de PCB con base en proyecciones estadísticas de la información obtenida en el inventario directo y las mediciones efectuadas. Este paso se realizó en dos etapas: a) cálculo de los índices de contaminación de acuerdo con las características de cada equipo; b) proyección estadística de acuerdo con los índices calculados y el número y características de equipos reportados en cada región.
- Estimación del total de equipos contaminados y el peso total de PCB.
- Cuantificación del inventario consolidado de PCB en el país.

## RESULTADOS

Los resultados obtenidos en el inventario se presentan en las tablas 2 a 5.

**Tabla 2.** Inventario directo de existencias de PCB en Colombia.

Sector	Material sólido (kg)			Aceite (kg)		Total (kg)
	Carcasas de transformadores	Carcasas de condensadores	Residuos sólidos	Contenido de transformadores y condensadores	Almacenado en canecas	
Eléctrico	388.154,7	0	9.900	142.170,8	28.624	568.849,5
		Total	398.054,7	Total	170.794,8	
Manufactura	195.109,7	844	0	64.925,8	1.926	262.805,5
		Total	195.953,7	Total	66.851,8	
Hidrocarburos	66.446,9	0	0	28.553,1	0	95.000
		Total	66.446,9	Total	28.553,1	
Total	649.711,3	844	9.900	235.649,7	30.550	926.655
		Total	660.455,3	Total	266.199,7	

Fuente: (MINAMBIENTE, 2007).

**Tabla 3.** Resultados de muestreos de PCB.

Tipo de equipo	Número de muestras	Resultado positivo	Resultado negativo
		Kit Clor-N-Oil 50	Kit Clor-N-Oil 50
Canecas con aceite dieléctrico	27	0	27
Condensador	1	1	0
Filtro termovació	1	0	1
Transformadores eléctricos	1.494	150	1.344

Fuente: (MINAMBIENTE, 2007).

**Tabla 4.** Estimación de existencias de PCB en los transformadores de todos los sectores, equipos en uso y en desuso.

Sector	Transformadores en uso	Transformadores en desuso	Total de transformadores	Cantidad estimada de transformadores contaminados en uso		Cantidad estimada de transformadores contaminados en desuso		Cantidad total estimada de transformadores contaminados	
				Escenario 1 0,058	Escenario 2 0,076	Escenario 1 0,058	Escenario 2 0,076	Escenario 1 0,058	Escenario 2 0,076
Transporte	47	1	48	3	4	0	0	3	4
Minería	3.713	115	3.828	215	282	7	9	222	291
Hidrocarburos	957	30	987	56	73	2	2	57	75
Militar	140	4	144	8	11	0	0	8	11
Eléctrico	368.692	11.404	380.095	21.384	28.021	661	867	22.046	867
Total	374.364	11.580	385.943	21.713	28.452	672	880	22.385	29.332
Peso promedio por transformador				450 kg = 0,45 ton					
Toneladas de equipos contaminados con PCB				9.771	12.803	302	396	10.073	13.199

Fuente: (MINAMBIENTE, 2007).

**Tabla 5.** Inventario preliminar de PCB existentes en Colombia.

<b>Tipo de metodología utilizada</b>	<b>Fuente de PCB</b>	<b>Cantidad (t)</b>
Estimación	Probable existencia de PCB puro en transformadores en desuso	683,27
	Probable existencia de PCB en transformadores en uso	547,74
	Probable existencia de PCB por contaminación en transformadores en uso	entre 9.771 y 12.803
	Probable existencia de PCB por contaminación en transformadores en desuso	entre 302 y 396
Recolección directa, reportes y formularios	Existencias de equipos, aceites y residuos contaminados con PCB	926,65
Levantamiento de registros	PCB importado al país en aceites lubricantes y equipos	20,14
	Condensadores importados al país antes del año 1985, probablemente con PCB	3.863,39

**Fuente:** (MINAMBIENTE, 2007).

De acuerdo con el cálculo de equipos evaluados sobre equipos que dieron positivo, se obtuvo un índice de contaminación por rango y potencia. Al analizar el total de los equipos considerados se obtuvo que el índice de contaminación nacional con PCB es 0,067, que se sitúa en un rango entre 0,034 y 0,159. Para un rango de confianza de 99%, este índice debe situarse entre 0,058 y 0,076.

## DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados del cuadro V, la existencia de PCB en Colombia está entre 9.771 y 12.803 toneladas. Otros países de la región como Venezuela, estiman sus existencias entre 6.500 y 10.000 toneladas; Brasil estima sus existencias en 80.000 toneladas y Uruguay en 4.150 toneladas (MINAMBIENTE, 2007).

Una de las observaciones que pueden destacarse es que el conocimiento acerca de la naturaleza de los PCB y sus probables efectos por causa de la exposición prolongada es aún muy limitado por parte de la población que los utiliza.

Debido a que no existe percepción del riesgo sobre los PCB, se encontró que son muy

comunes las prácticas inadecuadas de manejo. En general, se observó en la población una gran despreocupación, lo que contribuye a favorecer la dispersión indiscriminada de los PCB en el ambiente, mediante prácticas como la reutilización de equipos, mangueras y tanques de almacenamiento.

Aunque algunas empresas del sector eléctrico ya han iniciado procesos de reconversión de sus transformadores, se hace necesario estructurar un plan de acción interinstitucional, suficientemente ambicioso para hacer un inventario más preciso y llevar a cabo la reconversión de equipos junto con la destrucción de los aceites con PCB recolectados, siguiendo las recomendaciones de la UNEP (UNEP, 2003). Este proceso debe ser monitorizado y evaluado periódicamente por parte de las entidades de control ambiental. De igual manera, sus resultados deben ser divulgados a la población en general.

## FINANCIAMIENTO

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, PNUD

## REFERENCIAS

- Bianco, G.; Novario, G.; Bochicchio, D.; Anzilotta, G.; Palma, A., & Cataldi, T. R. (2009). Polychlorinated biphenyls in contaminated soil samples evaluated by GC-ECD with dual column and GC-HRMS. *Chemosphere*, 104-112.
- Boix, J., & Cauli, O. (2012). Alterations of serotonin system by polychlorinated biphenyls exposure. *Neurochemistry International*, 809-816.
- Chiu-Yueh, Y.; Tien-Shang, H.; Kao-Chang, L.; Pei-Chien, T., & Yue Leon, G. (2011). Menstrual effects among women exposed to polychlorinated biphenyls and dibenzofurans. *Environmental Research*, 288-294.
- Clarke, B. O.; Porter, N. A.; Marriot, P. J., & Blackbeard, J. R. (2010). Investigating the levels and trends of organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyl in sewage sludge. *Environment International*, 323-329.
- Delistraty, D. (2013). Ecotoxicity and risk to human fish consumers of polychlorinated biphenyls in fish near the Hanfore Site (USA). *Science of the Total Environment*, 14-21.
- Dodoo, D. K.; Esumang, D. K., & Johathan, J. W. (2013). Accumulation profile and seasonal variations of polychlorinated biphenyls (PCBs) in bivalves *Crassostrea tulipa* (oysters) and *Anadar senilis* (mussels) at three different aquatic habitats in two seasons in Ghana. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 26-34.
- Hopf, N. B.; Ruder, A. M., & Sucoop, P. (2009). Background levels of polychlorinated biphenyls in the U.S. population. *Science of the Total Environment*, 6109-6119.
- Librando, L.; Minniti, Z.; Acolla, M. L.; Cascioc, O.; Castelli, F., & Sarpietro, M. G. (2013). Calorimetric evaluation of interaction and absorption of polychlorinated biphenyls by biomembrane models. *Chemosphere*, 791-796.
- MINAMBIENTE (2007). *Inventario preliminar de compuestos bifenilos policlorados en Colombia*.
- Bogotá: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Mohammed, A.; Peterman, P.; Echols, K.; Feltz, K.; Tegerdine, G.; Manoo, A.; Orazio, C. (2011). Polychlorinated biphenyls (PCBs) and organochlorine pesticides (OCPs) in harbor sediments from Sea Lots, Port-of-Spain, Trinidad and Tobago. *Marine Pollution Bulletin*, 1324-1332.
- PNUMA (2005). *Eliminando los COP del mundo: guía del Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes*. Ginebra: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- Remer, M., & Boekelheide, K. (2013). Multiple environmental chemical exposures to lead, mercury and polychlorinated biphenyls among childbearing-aged women (NHANES 1999-2004): Body burden and risk factors. *Environmental Research*, 23-30.
- Seeger, M.; Timmis, K. N., & Hofer, B. (1997). Bacterial pathways for degradation of polychlorinated biphenyls. *Marine Chemistry*, 327-333.
- Shimura, M.; Koana, T.; Fukuda, M., & Kimbara, K. (1996). Complete degradation of polychlorinated biphenyls by a combination of ultraviolet and biological treatments. *Journal of Fermentation and Bioengineering*, 573-576.
- UNEP (1999). *Guidelines for the identification of PCBs and materials containing PCBs*. Ginebra: United Nations Environment Programme.
- UNEP (2003). *Preparación de un plan nacional de manejo ambientalmente adecuado de los bifenilos policlorados (PCB) y de equipos contaminados con PCB*. Ginebra: United Nations Environment Programme.
- Zanaroli, G.; Ballo, A.; Negroni, A.; Daffonchio, D.; Young, L. Y., & Fava, F. (2010). Characterization of the microbial community from the marine sediment of the Venice lagoon capable of reductive dechlorination of coplanar polychlorinated biphenyls (PCBs). *Journal of Hazardous Materials*, 417-426.



## Análisis del modelo eléctrico del mecanismo de hurto de energía eléctrica más utilizado en el sector industrial de Bogotá

### Analysis of the electrical model for the electric power theft mechanism widely used in the industrial sector in Bogotá

Yaqueleine Garzón Rodríguez\*, César Andrés Doncel Díaz\*\*

Citation / Para citar este artículo: Garzón Rodríguez, Y., & Doncel Díaz, C. A. (2014). Análisis del modelo eléctrico del mecanismo de hurto de energía eléctrica más utilizado en el sector industrial de Bogotá. Revista Tecnura, Edición especial, 45-63.

**Fecha de recepción:** 28 de marzo de 2013 / **Fecha de aceptación:** 7 de marzo de 2014

#### RESUMEN

Este trabajo se inscribe en la línea de Investigación de Compatibilidad Electromagnética y analiza el modelo eléctrico del mecanismo de hurto más implementado en medida semidirecta, con el fin de comprender el fenómeno físico que se encuentra y, a su vez, generar algunas recomendaciones respecto a las situaciones que pueden propiciar o permitir la implementación de este tipo de mecanismos utilizados en celdas de medida semidirecta en el sector industrial de la ciudad de Bogotá.

El trabajo se divide en cuatro partes; en la primera sección se hace referencia al proceso que se realizó para la obtención del mecanismo de hurto de energía eléctrica más utilizado en la ciudad de Bogotá, su jerarquización y descripción. En la segunda sección se presenta la elaboración del circuito eléctrico equivalente, así como las pruebas teóricas y experimentales efectuadas como parte de la comprobación de su funcionamiento. En la tercera sección se hace la documentación de las anomalías encontradas en las celdas de medida semidirecta, ya que se han identificado como principal causa de implementación de

mecanismo de hurto; por último, en la cuarta sección se presentan las recomendaciones de solución sugeridas a las anomalías encontradas en dichas celdas. Para establecer el modelo eléctrico se tomó como base el diagrama unifilar de medida semidirecta y se realiza circuito equivalente monofásico teniendo presente que el medidor y el transformador de corriente (TC) son los principales elementos en donde actúa este dispositivo. Acto seguido se efectúa el análisis mediante simulación del circuito, contemplando esta alteración mediante la herramienta Simulink en MATLAB, en la cual se identifica la anulación de la señal de corriente que se dirige al medidor a causa de la corriente inversa que proviene de la caja negra y, por ende, se verifica el bajo registro del consumo, como se evidencia en las curvas de potencia y energía en la carga. Posteriormente se hacen pruebas experimentales, para lo cual se construye un prototipo y se efectúa medición con dos equipos diferentes. Como resultado, se identifica que el mecanismo de caja negra se implementa mediante un transformador de núcleo partido, que se instala en la fase a la cual se le

\* Ingeniera en distribución y redes eléctricas, magíster en ciencias de la información y las comunicaciones. Docente, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: [ygarzonr@udistrital.edu.co](mailto:ygarzonr@udistrital.edu.co)

\*\* Tecnólogo electricista, estudiante de ingeniería eléctrica. Asistente de presupuestos, IIE Ingeniería e Instalaciones Eléctricas. Bogotá, Colombia. Contacto: [cadoncel@correo.udistrital.edu.co](mailto:cadoncel@correo.udistrital.edu.co)

hace la anulación de la corriente mediante un acople inductivo.

**Palabras clave:** Semidirecta, medida, hurto, mecanismo, acople inductivo, transformador, consumo, prototipo.

## ABSTRACT

This work is classified under the line of Electromagnetic Compatibility Research and analyzes the electrical model for theft mechanism widely implemented for semi-direct measurement; in order to understand the physical phenomena found and, in turn it generating some recommendations regarding situations that may lead to or allow implementing such mechanisms used in semi-direct measurement cells in the industrial sector in Bogotá city.

This paper is divided into four excerpts, namely in the first section it refers to the process that was undertaken for the obtaining of the electricity theft mechanism most commonly used in Bogotá city, its ranking and description. In the second section it presents the development of the equivalent circuit, as well as theoretical and experimental tests conducted as part of the operational check. The third section is the documentation of the anomalies found

in the cells of semi-direct measurement as they are identified as the main cause of theft mechanism implementation, and finally, in the fourth section, it presents the recommendations solution suggested for the anomalies found in those cells.

To set the electric model, the semi-direct measurement line diagram was taken as a base, and mophasic equivalent circuit is done taking into account that the meter and current transformer (CT) are the main elements that operate this device. Right after, the analysis is performed by means of simulation of the circuit, considering this alteration through MATLAB Simulink tool, which identifies the cancellation of the current signal that goes to the meter because of the reverse current coming from the black box, and therefore consumption low register is verified, as evidenced by the curves of power and energy in the load.

Later, experimental tests are performed, for which a prototype is built and measurement is performed with two different teams. As a result, it is identified that the black box mechanism is implemented through a split core transformer, installed in the phase that performs the cancellation of the current through an inductive coupling.

**Keywords:** Semi-direct, measurement, theft, mechanism, inductive coupling, transformer, consume, prototype.

## INTRODUCCIÓN

El régimen de los servicios públicos obliga a las empresas de servicios a que investiguen las desviaciones significativas de los consumos efectuados por los usuarios en un período frente a sus consumos anteriores (Ley 142, 1994, artículo 149); allí se establece que se debe hacer una investigación de estas desviaciones para elaborar las facturas y que es obligación de las empresas adoptar mecanismos eficientes que permitan someter su facturación a investigación de desviaciones significativas, entre el consumo registrado del suscriptor o usuario durante un período de facturación y sus promedios de consumos anteriores.

Ahora bien, configurada una desviación significativa, las empresas de servicios públicos están

obligadas a visitar los domicilios de los usuarios con el fin de determinar la causa que los originó. Esta facultad de visitar los inmuebles se ve enmarcada por la Comisión Reguladora de Energía y Gas, CREG, la cual ordena:

Control sobre el funcionamiento de los medidores. Las condiciones uniformes del contrato permitirán tanto a la empresa como al suscriptor o usuario verificar el estado de los instrumentos que se utilizan para medir el consumo; y obligarán a ambos a adoptar precauciones eficaces para que no se alteren. Se permitirá a la empresa, inclusive, retirar temporalmente los instrumentos de medida para verificar su estado.

(Resolución CREG 108, 1997, artículo 37).

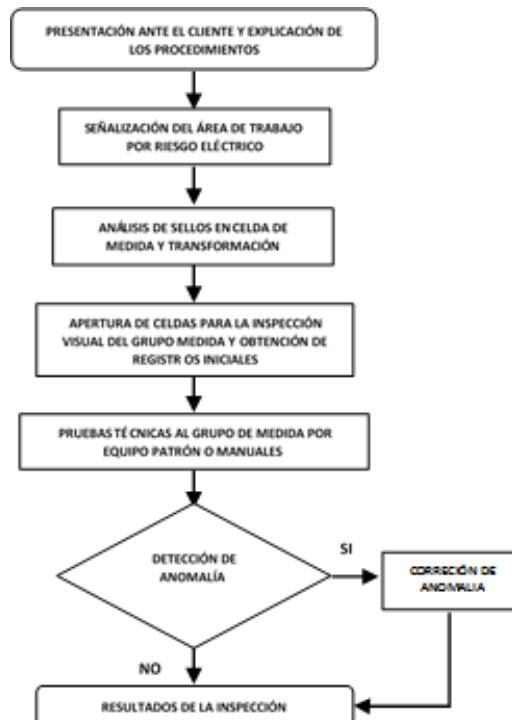
Así mismo, la ley 142 de 1994 en su artículo 145, parágrafo 2º determina: “(...) La Empresa deberá practicar las visitas y realizar las pruebas técnicas que se requieran con el fin de precisar la causa que originó la desviación detectada en la revisión previa”.

Por este motivo, se hizo necesario generar acciones concretas para la descripción de mecanismos de hurto, como parte de las estrategias que deben emprender las empresas prestadoras del servicio de distribución de energía eléctrica para reducir las pérdidas económicas por falta de facturación. Por tanto, en este trabajo se hizo una revisión de los diferentes mecanismos de hurto más implementados en Bogotá, D.C., y se encontró que la “caja negra” es el de mayor implementación (SSPD, Concepto 111, 2002); partiendo de este resultado y teniendo en cuenta que este no tiene antecedentes de estudios específicos de su funcionamiento, se realiza el circuito eléctrico equivalente para comprender teóricamente cómo cumple el objetivo de evadir el pago real de energía eléctrica consumida.

Finalmente, con base en las diferentes situaciones encontradas en la implementación de mecanismos de hurto, se hace una serie de recomendaciones para afrontar las anomalías encontradas en el diseño de las celdas de medida semidirecta.

## MECANISMO DE HURTO

Para poder determinar el mecanismo de hurto más implementado en Bogotá, D.C., se tuvo en cuenta la estadística de las inspecciones realizadas por la Compañía Americana de Multiservicios (CAM) para la empresa distribuidora y comercializadora de energía CODENSA S.A.E.S.P. Las inspecciones se efectúan periódicamente y sin previo aviso; de acuerdo con lo estipulado, estas inspecciones se hacen para detectar anomalías en las instalaciones y se enfocan en la revisión de los elementos de medida; las inspecciones se realizan de acuerdo con la metodología implementada por CAM y está descrita en la figura 1.



**Figura 1.** Flujograma de la metodología de inspecciones realizadas por CAM.

**Fuente:** Elaboración propia a partir de la metodología CAM.

**Tabla 1.** Descripción de los resultados de las inspecciones.

RESULTADO INSPECCIÓN	DESCRIPCIÓN
ACTUALIZAR	Por cambio de tarifa, doble facturación. Actualizar en el sistema general de CODENSA S.A. E.S.P
ADECUAR	No hay garantías suficientes para el correcto registro del consumo.
CAMBIO	Retiro e instalación de nuevo medidor por anomalías.
CORRECCIÓN	Condición anormal en el equipo de medida, instalaciones eléctricas y detección de anomalías.
FALLIDA	Cuando el inmueble no existe o no se puede localizar el predio.
INCORPORACIÓN	Usuario no registrado en el sistema comercial de la empresa.
INSTALACIÓN	Existe eliminación del servicio directo, medida de un nuevo suministro o instalación del medidor de energía reactiva.
NORMAL	La acometida, el equipo de medida y los elementos de seguridad se encuentran en perfecto estado.
REPROGRAMAR	Se necesita una nueva inspección.
RETIRO	Retiro de medidor por anomalías.
SELLOS AL LABORATORIO	Se presumen irregularidades en los sellos de los elementos del equipo de medida.
SERVICIO DIRECTO	Suministro no registrado por un medidor.
SIN SERVICIO	No existe servicio de energía.
SUSPENSIÓN DEL SERVICIO	Suspensión del servicio previa autorización del cliente.

**Fuente:** Elaboración propia a partir de la metodología CAM.

A partir de las inspecciones efectuadas se utilizan los términos descritos en la tabla 1 para identificar el resultado obtenido en dichas inspecciones. Cabe aclarar que por inspección solo se puede determinar un único resultado.

Con base en la clasificación de resultados obtenidos en las inspecciones, se encuentra que el término *corrección* es el que está directamente ligado con la detección de una anomalía o posible hurto.

A continuación se presentan los resultados de un total de 12.413 inspecciones efectuadas en el período comprendido entre junio y diciembre de 2011. Los datos se presentan en forma gráfica y referidos a la tabla 1, teniendo en cuenta los datos que hacen referencia a corrección con el fin de identificar causales de hurto.

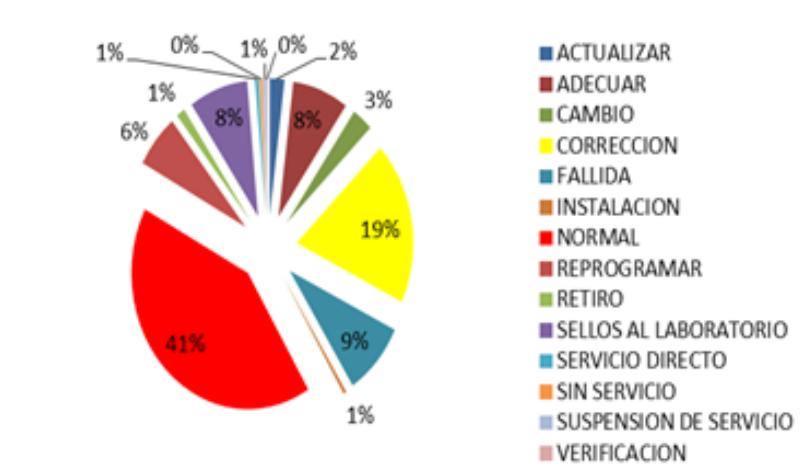
## Total de inspecciones efectuadas durante el período

En la figura 2 se evidencia que el porcentaje más alto del total de inspecciones efectuadas en este

período fue 41%, resultado que corresponde a equipo de medida y elementos de seguridad en perfecto estado; conforme a la clasificación dada en la tabla 1, pertenece al resultado de inspección NORMAL; pero con preocupación en segundo lugar porcentual con 19% se encuentra el término CORRECCIÓN, es decir, describe una condición anormal en el equipo de medida, instalaciones eléctricas y/o detecciones de hurto.

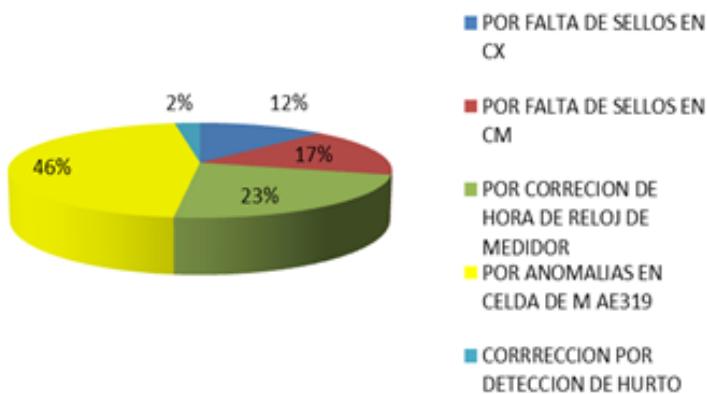
Teniendo en cuenta que el resultado CORRECCIÓN es el término que nos indica y clasifica las diferentes anomalías, como puede ser la detección de hurto, se procede a hacer una revisión más puntual o específica de cómo se clasifican estas anomalías para este porcentaje, las cuales se encuentran descritas en la figura 3.

En esta gráfica se encuentra que el porcentaje más alto es 46%, equivalente a 1.100 inspecciones, y está directamente relacionado a las anomalías en celdas de medida, para este caso puntual a una referencia específica, bajo la normatividad (CODENSA S.A.E.S.P., AE319). Estas



**Figura 2.** Resultado de inspecciones junio-diciembre de 2011.

**Fuente:** Elaboración propia.

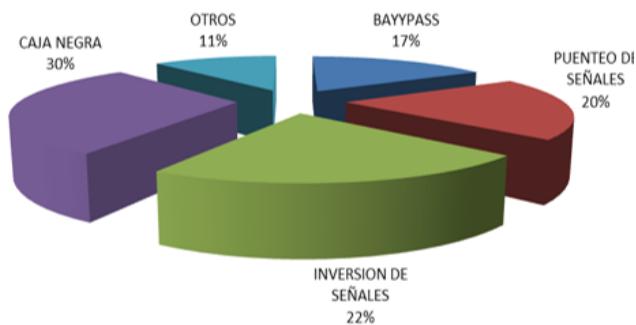


**Figura 3.** Tipos de anomalías.

**Fuente:** Elaboración propia.

anomalías son aprovechadas para implementar distintos mecanismos de hurto, los cuales no son fáciles de detectar por simple inspección visual y, por tanto, se requirió la revisión del historial de estos datos para poder dar un informe más cercano a la realidad. De esta revisión en la figura 3 se encuentra que el menor resultado porcentual pertenece a los mecanismos de hurto detectados *in fraganti*, con 2% correspondiente a 60 inspecciones. Haciendo una revisión más exhaustiva de este 2% de anomalías en la información

recopilada de las inspecciones para este período, en la figura 4 se identifican cuatro mecanismos de hurto encontrados *in fraganti*, como son: bypass, puenteo de señales, inversión de señales y caja negra, siendo el dispositivo de "caja negra" el mecanismo más utilizado para la ciudad de Bogotá, D.C., durante este período. De esta revisión se verifica que las condiciones que facilitan su implementación se asocian de manera directa a diferentes características de construcción en las celdas de medida AE319.

**Figura 4.** Mecanismos de hurto más utilizados.

**Fuente:** Elaboración propia.

## Caracterización de los mecanismos de hurto más utilizados

A continuación, en las tablas 2, 3, 4 y 5 se presenta la descripción de cada uno de los mecanismos de hurto encontrados *in fraganti*, teniendo en cuenta su forma de detección y caracterización.

De acuerdo con las estadísticas y la caracterización de los mecanismos de hurto se encuentra que la “caja negra” fue el más implementado durante el período comprendido entre junio y diciembre

de 2011 en la ciudad de Bogotá, D.C. Adicionalmente, se considera el más complejo desde el punto de vista de que no se tiene informes de su operación e implementación y con la dificultad de detección por el elemento eléctrico utilizado en su implementación.

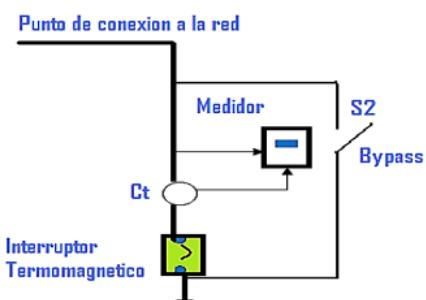
### Bypass

Este mecanismo consiste en la modificación del flujo normal de energía hacia la carga para evadir su registro por el medidor, como lo muestra la figura 5.

**Tabla 2.** Caracterización del mecanismo de hurto Bypass.

CARACTERÍSTICAS	DETECCIÓN
*Intervención de la acometida.	Se necesita comparar las corrientes de entrada con las que pasan por el medidor, que deben coincidir; de no ser así, se presume la existencia de un mecanismo de hurto Bypass.
*Afectación de la estructura civil (cajas de inspección, paredes, tubería).	
*No es visualmente detectable.	
*Puede tener 100% de eficiencia.	

**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura 5.** Diagrama unifilar de mecanismo de hurto Bypass.

**Fuente:** Elaboración propia.

**Puenteo de CT**

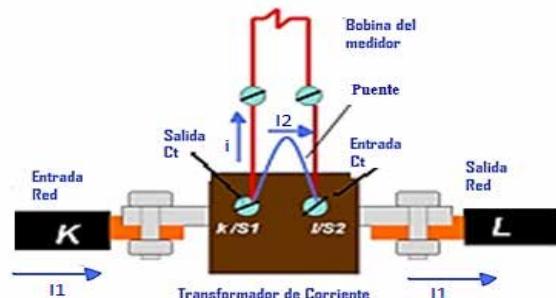
Consiste en utilizar un puente (alambre de cobre) para conectar las salidas del transformador

de corriente (CT) con el fin de disminuir el flujo al medidor por desviación, como muestra la figura 6.

**Tabla 3.** Caracterización del mecanismo de hurto por puenteo de CT.

CARACTERÍSTICAS	DETECCIÓN
*Violación de sellos de seguridad de los CT.	
*Afectación de la estructura de la celda.	Es posible observar anomalías en el aspecto de los bornes de los CT debido al arco que se produce en esta maniobra.
*Detectable visualmente.	
*No tiene gran eficiencia por no garantizar la desviación total de corriente que se dirige al medidor.	

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 6.** Esquema del mecanismo de hurto de puenteo de señales del CT.

**Fuente:** Elaboración propia.

**Invertir señales de salidas de los CT**

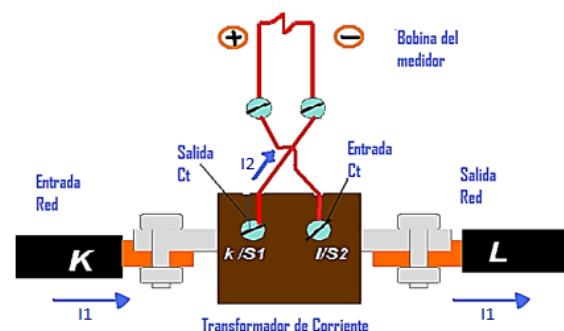
Consiste en invertir las señales de salidas de los CT que van al medidor y cambiar la dirección de la

corriente en las bobinas del medidor para que no exista registro por parte del medidor, como muestra la figura 7.

**Tabla 4.** Caracterización del mecanismo de hurto Invertir señales de salidas de los CT.

CARACTERÍSTICAS	DETECCIÓN
*Violación de los sellos de seguridad de los CT o de caja de conexiones del medidor.	Se puede descubrir al verificar la conexión del medidor y comparar la carga instalada con los consumos mensualmente registrados.
*Afectación de la estructura de la celda.	
*Detectable visualmente.	
*Tiene gran eficiencia porque garantiza la desviación total de corriente que se dirige al medidor.	

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 7.** Esquema del mecanismo de hurto Invertir señales de salida en el CT.

**Fuente:** Elaboración propia.

**Caja negra**

Consiste en utilizar un transformador de corriente que envía una señal de corriente al medidor, opuesta a la señal generada por los transformadores de corriente del grupo de medida, como muestra la figura 8.

**Tabla 5.** Caracterización del mecanismo de hurto Caja negra.

CARACTERÍSTICAS	DETECCIÓN
*Violación de los sellos de seguridad de los CT.	
*Afectación de la estructura de la celda.	Es posible observar anomalías en el aspecto de los bornes de los CT debido al arco que se produce en esta maniobra.
*Detectable visualmente.	
*No tiene gran eficiencia por no garantizar la desviación total de corriente que se dirige al medidor.	

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 6.** Comparación % de pérdidas de los mecanismos de hurto.

MECANISMOS DE HURTO ENCONTRADOS							
Bypass		Puenteo de CT		Invertir señales de salidas de los CT		CAJA NEGRA	
Línea	Pérdidas [%]	Línea	Pérdidas [%]	Línea	Pérdidas [%]	Línea	Pérdidas [%]
R	33.3%	R	25%-30%	R	33.3%	R	33.3%
R-S	66.6%	R-S	50%-60%	R-S	66.6%	R-S	66.6%
R-S-T	100%	R-S-T	75%-90%	R-S-T	100%	R-S-T	100%

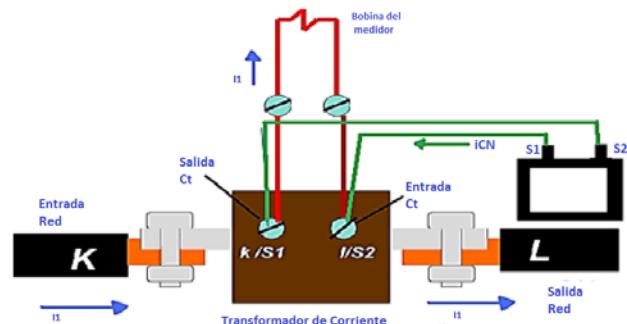
**Fuente:** Elaboración propia.

En la tabla 6 se detalla la comparación en porcentaje de pérdidas que arroja cada uno de estos mecanismos de hurto haciendo énfasis si su implementación se realiza en una sola línea o fase denominada "R", en dos "R-S" o en las tres, "R-S-T".

## OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DEL MODELO ELÉCTRICO DE CAJA NEGRA

Una vez detectados y descritos los modelos de hurto se jerarquizó el mecanismo de hurto de caja negra como el más utilizado en la ciudad de

Bogotá. Este mecanismo se basa en alterar únicamente las señales de corriente generadas por el transformador y que se dirigen al medidor. En este aparte se describe la elaboración del circuito eléctrico equivalente, su simulación y análisis teórico, además de la comprobación calculada y corroborada con elementos de medida. Para este caso específico, se utilizó una medida semidirecta con transformadores de corriente con una relación de transformación de 200:5, de lo cual se resalta que la medida tiene un factor de liquidación por 40.



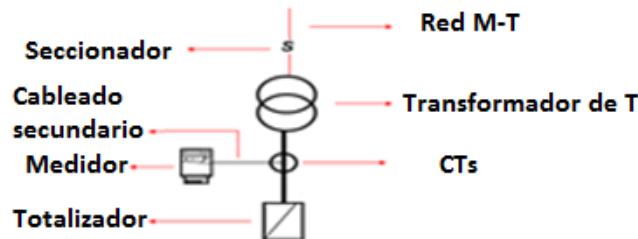
**Figura 8.** Esquema del mecanismo de caja negra.

**Fuente:** Elaboración propia.

En primer término se realizó el circuito equivalente con base en la simbología establecida en el estándar (IEEE 315,1993), luego se procedió a desarrollar el análisis teórico y simulación mediante herramientas del programa Simulink de Matlab. Por último, se construyó un prototipo de caja negra, el cual permitió hacer la comparación de los datos simulados con los obtenidos mediante dos equipos de medida diferentes: el equipo patrón ZERA MT 3000 y la pinza amperimétrica Erasmus.

#### Descripción del modelo eléctrico

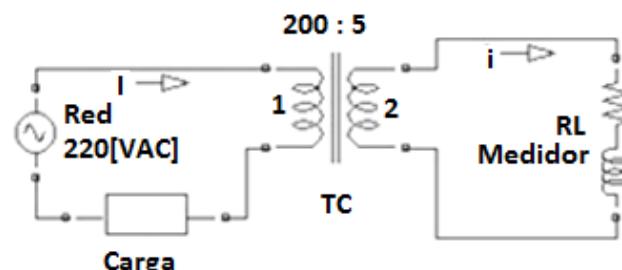
Para establecer el modelo eléctrico se tomó como base el diagrama unifilar de la figura 9 de medida semidirecta con el fin de identificar los principales elementos y convertirlos en un circuito equivalente.



**Figura 9.** Diagrama unifilar de una medida semidirecta.

**Fuente:** Elaboración propia.

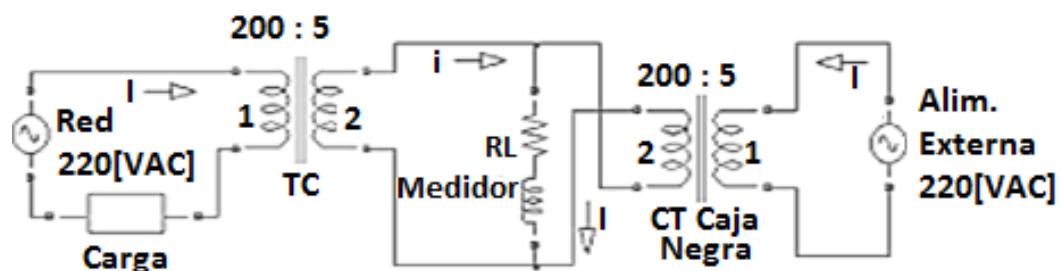
Teniendo en cuenta que el medidor y el transformador de corriente (TC) son los principales elementos donde actúa la caja negra, se procede a convertir estos elementos en un circuito equivalente en una fase de acuerdo con las normas internacionales (IEEE 315, 1993); como se ilustra en la figura 10, el modelo se realiza monofásicamente ya que los transformadores son monofásicos y este mecanismo de hurto actúa directamente en el secundario de dicho elemento. El modelo eléctrico del medidor se toma del libro *Pérdidas de energía-enfoque operativo* (Orjuela, P., 2008).



**Figura 10.** Circuito equivalente de medida semidirecta.

**Fuente:** Elaboración propia.

Con base en el circuito obtenido de medida semidirecta, se acopla el mecanismo de hurto “caja negra” para obtener el circuito mostrado en la figura 11.



**Figura 11.** Circuito equivalente de medida semidirecta con caja negra.

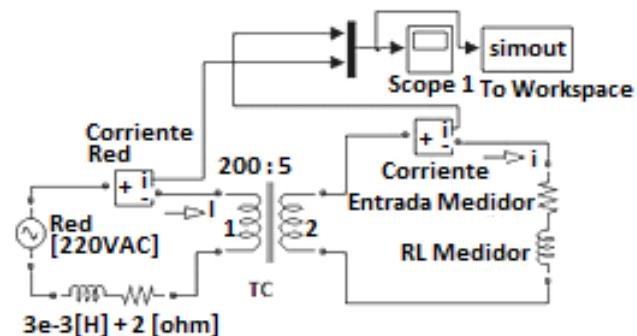
**Fuente:** Elaboración propia.

### Simulación y análisis Teórico

A continuación se describe la simulación y el análisis del modelo del circuito eléctrico, primero el circuito sin alteración de sus componentes, seguido del análisis de la simulación del circuito con alteración de la caja negra, utilizando la herramienta Simulink (MATLAB, 2009).

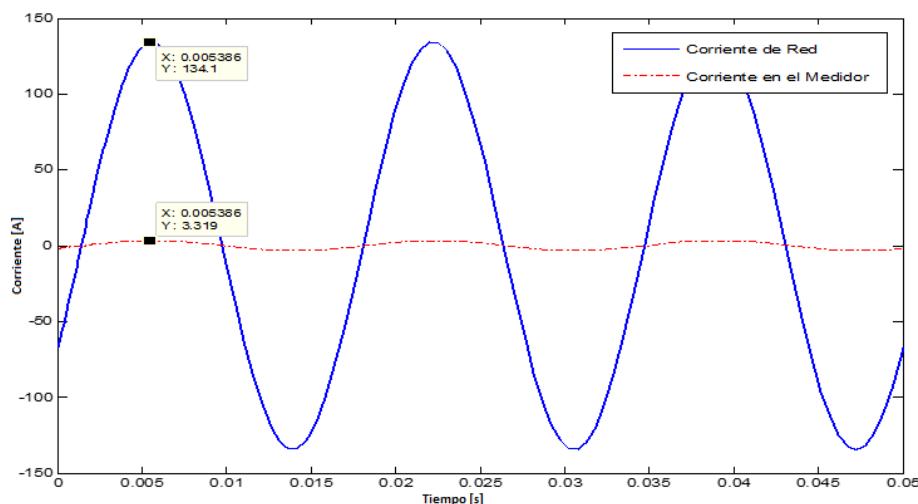
### Simulación del circuito equivalente en condiciones normales

En la figura 12 se puede observar el circuito equivalente de una medida semidirecta, en correcto funcionamiento y sin ninguna clase de alteración. En el gráfico se puede discriminar la dirección de la corriente de la red  $I$  y corriente del medidor  $i$ .



**Figura 12.** Simulación del circuito equivalente en condiciones normales.

**Fuente:** Elaboración propia.

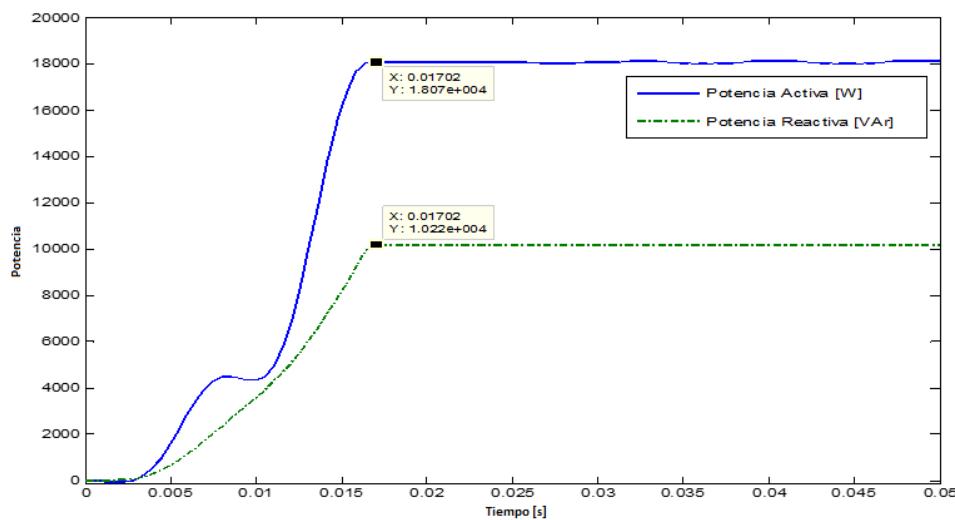


**Figura 13.** Corriente de red y corriente del medidor.

**Fuente:** Elaboración propia.

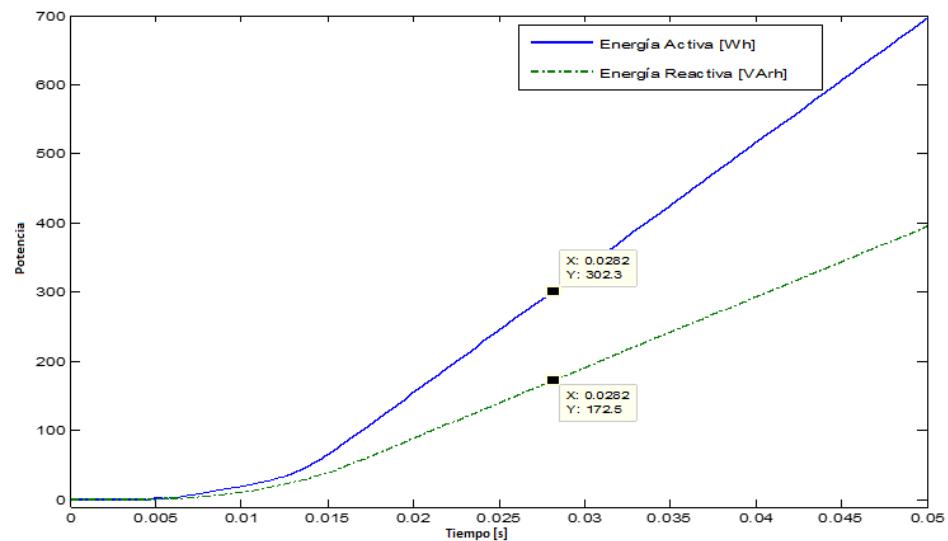
Con base en el libro (Kemmerly, 2000) se hizo el circuito equivalente y la simulación correspondiente en Simulink, que arrojó las siguientes gráficas: la figura 13 muestra la relación entre la corriente de la red con valores pico de 134.1 A y la corriente del medidor con valores pico en 3.31 A, dado a la relación de transformación 200:5 A del CT, lo que indica un correcto funcionamiento del circuito.

En la figura 14 puede observarse la potencia activa que es de 18 kW, también denominada potencia útil; es la que realmente se aprovecha en el trabajo; por otra parte, se identifica la potencia reactiva de 10 kVAR, consumida por las bobinas presentes en la carga.



**Figura 14.** Potencia en la carga.

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 15.** Energía consumida por la carga.

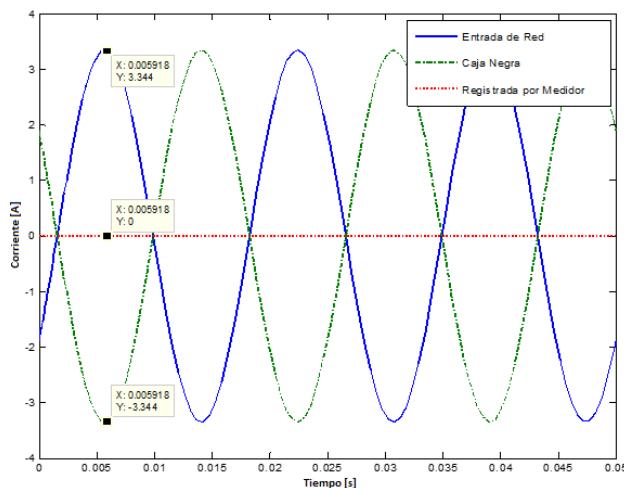
**Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 15 se identifica la energía activa en vatios / hora y energía reactiva en voltamperios reactivos / hora consumida por la carga y que está siendo registrada correctamente por el medidor de energía.

#### *Simulación del circuito equivalente con caja negra*

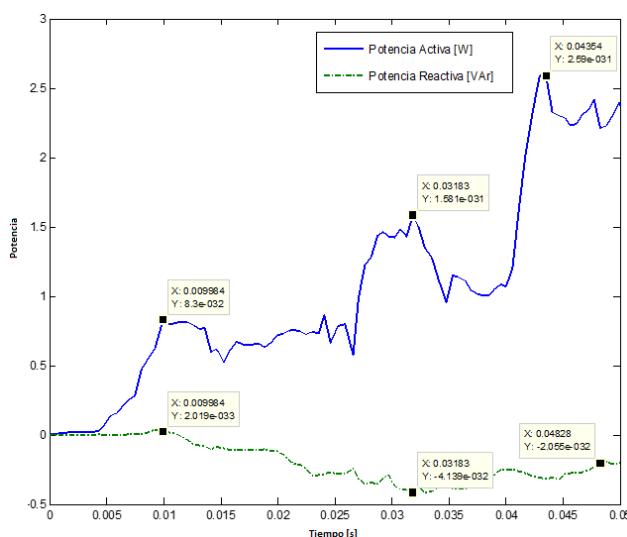
De acuerdo con esta caracterización, se procedió a hacer la comprobación pertinente del mecanismo en el simulador Simulink, empezando por el diagrama del circuito equivalente con alteración

de caja negra; como resultado se obtienen las tres señales de corriente en el medidor, correspondientes a la corriente de entrada de red, corriente de caja negra y la corriente registrada por el medidor, tal como se ilustran en la figura 16.



**Figura 16.** Corriente de la red versus corriente de caja negra y corriente resultante.

**Fuente:** Elaboración propia.

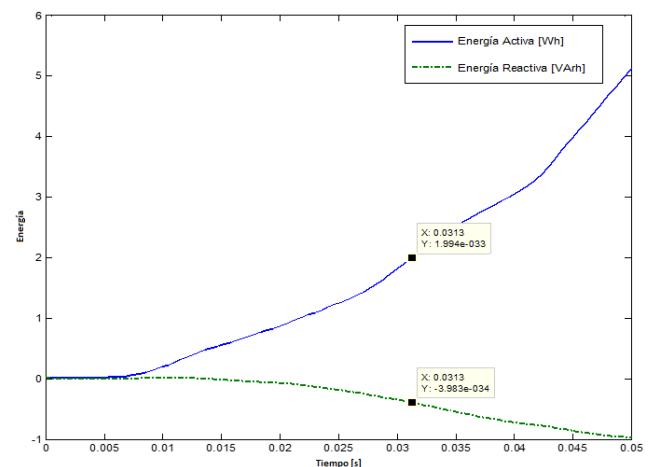


**Figura 17.** Potencia en el medidor con el mecanismo de hurto.

**Fuente:** Elaboración propia.

Al observar esta figura se puede relacionar la anulación de la señal de corriente que se dirige al medidor a causa de la corriente inversa que proviene de la caja negra y, por ende, verificar el bajo registro del consumo.

En las figuras 17 y 18 se aprecia que la potencia y energía del medidor se ven afectadas por el mecanismo de hurto disminuyendo las magnitudes a valores cercanos a cero, comprobándose el efecto del mecanismo de hurto de la caja negra para el no registro de la energía consumida.



**Figura 18.** Energía registrada por el medidor con el mecanismo de hurto.

**Fuente:** Elaboración propia.

### Criterios preliminares 2

Los principales elementos utilizados durante las pruebas experimentales fueron un transformador de corriente (de tipo ventana), un medidor electromecánico (como componente de una medida semi-directa), el equipo patrón de marca ZERA MT 3000 y la pinza Erasmus como elementos de medida.

### Obtención de registros con equipo patrón ZERA MT 3000 3

Después de comprobar mediante la simulación las pérdidas de corriente por el mecanismo de hurto, se procedió a efectuar pruebas con el

equipo patrón ZERA MT 3000. Para comprobar que el grupo de medida está en perfectas condiciones se hacen inicialmente pruebas sin el mecanismo de hurto con el equipo patrón, y se observa que las corrientes y tensiones son iguales tanto en el medidor como en el equipo patrón. La comparación entre las corrientes de red y del medidor se efectúa mediante el equipo patrón con base en el factor de transformación propio del transformador de corriente. Para el montaje y conexión se tuvo en cuenta el manual de procedimientos del equipo patrón.

### *Comprobación en condiciones normales*

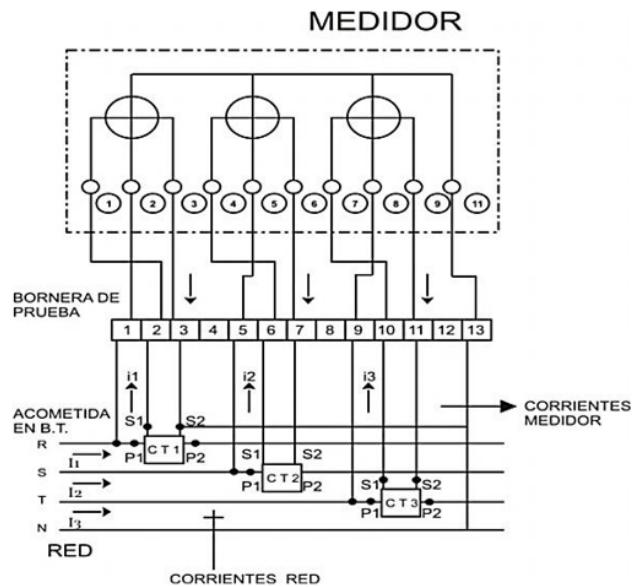
En la figura 19 se muestra específicamente el diagrama de conexión del medidor con los parámetros de corrientes y tensiones de los cuales se tuvo lectura con el equipo patrón.

Los parámetros en condiciones iniciales del grupo de medida con base en la figura 19, como lo son (VLN) tensión de fase, (VLL) tensión de línea; (I) corriente en la red (i) corriente transformada que se dirige al medidor, (P) potencia activa, (Q) potencia reactiva y (S) potencia aparente, se describen numéricamente en la tabla 7.

**Tabla 7.** Parámetros obtenidos del equipo ZERA MT 3000.

R	S	T	Datos de operación del sistema	
V <sub>LN</sub> [V]	122.054	122.306	122.53	
V <sub>LL</sub> [V]	211.366	212.185	211.921	
θV°	29.44	149.44	269.44	F[Hz]
I[A]	96.17	95.12	95.05	Sec
θI°	00.0	118.39	260.62	FP[PU]
P[W]	10438	10432	10430	ΣP[W]
Q[Var]	5902	5900	5901	ΣQ[Var]
S[VA]	11991	11989	11983	ΣS[VA]

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 19.** Diagrama de conexiones del grupo de medida semidirecta.

**Fuente:** Elaboración propia.

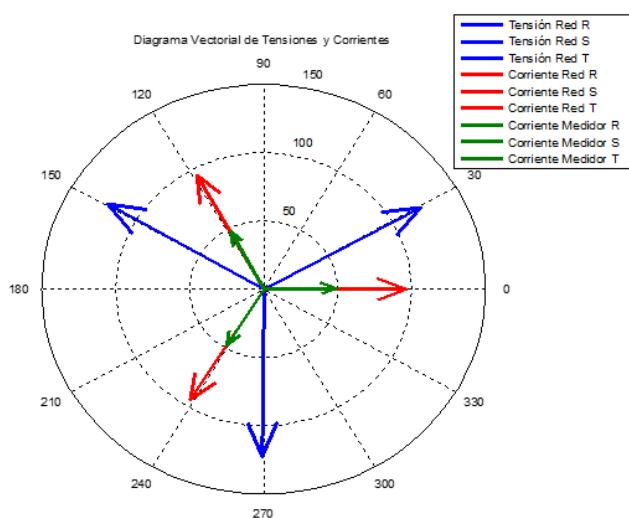
En la tabla 8 se demuestra que la relación de transformación de los CT se cumple para cada una de las corrientes por fase, como se evidencia en las corrientes  $I$  de la red con respecto a las corrientes  $i$  del medidor.

**Tabla 8.** Comparación de corrientes de red y corrientes del medidor obtenidas del equipo ZERA MT 3000.

	R	S	T
VLN[V]	122.054	122.306	122.53
VLL[V]	211.366	212.185	211.921
$\Theta V^\circ$	29.44	149.44	269.44
I[A]	96.17	95.122	95.05
$\Theta I^\circ$	00.0	118.39	238.62
i[A]	2.404	2.371	2.376
$\Theta i^\circ$	00.56	117.42	238.62

**Fuente:** Elaboración propia.

A continuación, en la figura 20 se ilustra el diagrama vectorial de las señales de corriente en la red, el medidor y señales de tensión.



**Figura 20.** Diagrama vectorial de señales de corriente y tensiones obtenidas, ZERA MT 3000.

**Fuente:** Elaboración propia.

De la figura 20 se observa que señales de corriente y tensión se encuentran en fase debido a las características resistivas del circuito.

En la tabla 9 se hace una comparación de las magnitudes y ángulos entre las corrientes de red y las corrientes del medidor; a su vez estas corrientes se multiplican por el factor de transformación 40, con el fin de compararlas con las corrientes de red medidas por el equipo patrón, y así determinar el error porcentual entre magnitudes y ángulos. Se observa una diferencia mínima entre los dos datos, lo que garantiza un normal funcionamiento de la medida.

**Tabla 9.** Comparación de corrientes de red y corrientes del medidor obtenidas del equipo ZERA MT 3000.

	I[A]	$\Theta I^\circ$	i[A]	$\Theta i^\circ$	DIF MAG	DIF ANG
R	96.17	00.0	96.16	00.56	-0.01	-0.56
S	95.12	118.39	94.84	117.42	-0.29	-0.81
T	95.05	260.62	95.04	261.62	-0.01	-0.38

**Fuente:** Elaboración propia.

Por último, se procedió a efectuar la comparación metrológica entre el equipo patrón y el medidor; esta comparación se realiza en forma automática por el equipo patrón con base en el número de giros registrados por el sensor que se instala sobre el medidor y que permite establecer la diferencia entre la energía de los dos equipos; para este caso se censó un giro del medidor y con la referencia que posee el equipo patrón del medidor, se indica un porcentaje de error, para este caso de -0.17%, el cual está dentro de los parámetros establecidos por la normatividad vigente en la (Ley 142, 1994, artículo 145).

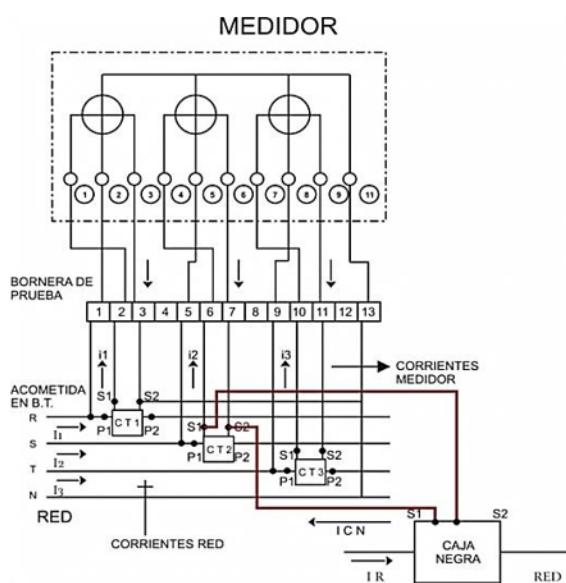
## COMPROBACIÓN CON MECANISMO DE HURTO

Para la comprobación del mecanismo de hurto con el equipo patrón ZERA MT 3000 se elaboró un prototipo de caja negra, el cual se presenta a continuación.

### Elaboración del prototipo

Para la elaboración del prototipo de caja negra se utilizó un transformador de núcleo partido, por su fácil manipulación y sus características de funcionamiento y además porque se ha descubierto su utilización en la mayoría de casos *in fraganti*, pues este es instalado en la fase a la cual se hace la anulación de la corriente, como se aprecia en la figura 21. El mecanismo de hurto de caja negra se denomina así porque el transformador de núcleo partido se asemeja a una caja por su construcción y además por su color original de fabricación.

En la figura 21 se muestra específicamente la dirección de las corrientes y el diagrama de conexión del medidor y el mecanismo de hurto de caja negra.



**Figura 21.** Diagrama de conexiones del grupo de medida semidirecta con mecanismo de hurto de caja negra.

**Fuente:** Elaboración propia.

El transformador de núcleo partido, prototipo de caja negra se instaló en la fase *S* de acuerdo con el diagrama de la figura 21 con las salidas invertidas y con la misma corriente de alimentación,

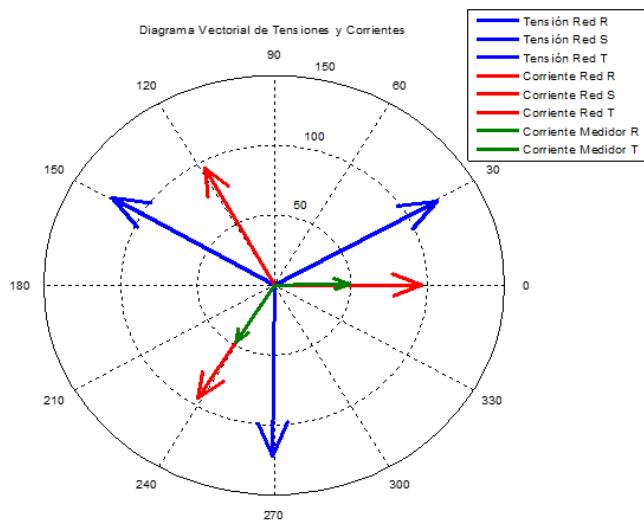
con el fin de eliminar la señal de corriente de la fase *S* al medidor para el no registro del consumo real. En la tabla 10 se demuestra que la relación de transformación de los CT no se cumple para la fase *S* ya que se puede observar que la corriente en  $i_S$  es aproximada a cero, comprobándose así que la alteración del mecanismo de hurto es efectiva.

	R	S	T
VLN[V]	122.054	122.306	122.53
VLL[V]	211.366	212.185	211.921
θV°	29.44	149.44	269.44
I[A]	96.17	95.12	95.05
θI°	00.0	118.39	260.62
i[A]	2.404	0.01	2.376
θi°	00.56	117.42	261.62

**Tabla 10.** Comparación de corrientes de red y corrientes del medidor obtenidas del equipo ZERA MT 3000.

**Fuente:** Elaboración propia.

A continuación, en la figura 22 se ilustra el diagrama vectorial de las señales de corriente en la red en el medidor y señales de tensión, en donde se observa que la magnitud de la corriente  $i_S$  es aproximadamente cero.



**Figura 22.** Diagrama vectorial de señales de corriente y tensiones obtenidas de ZERA MT 3000.

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 11.** Comparación de corrientes de red y corrientes del medidor obtenidas del equipo ZERA MT 3000.

	<b>I</b>	<b><math>\theta I</math></b>	<b>i</b>	<b><math>\theta i</math></b>	<b>DIF MAG</b>	<b>DIF ANG</b>
R	96.17	00.0	96.16	00.56	-0.01	-0.56
S	95.12	118.39	0.40	0.02	-99.9	-99.9
T	95.05	260.62	95.04	261.62	-0.01	-0.38

**Fuente:** Elaboración propia.

En la tabla 11 se hace una comparación de las magnitudes y ángulos entre las corrientes de red y las corrientes del medidor, en la cual se observa un diferencia de -99.9% entre la corriente  $I_s$  de la red y la corriente  $i_s$  del medidor, verificándose así que la implementación de la caja negra alteró la señal de corriente del medidor y, por consiguiente, no hubo registro de la energía real consumida en esta fase.

Finalmente, se procedió a hacer la comparación metrológica entre el equipo patrón y el medidor; el porcentaje de error para este caso fue -32.99%; esto se debe a que la corriente del medidor en la fase  $S$  fue anulada por la caja negra.

#### Verificación manual

Para comprobar que los datos obtenidos por el equipo patrón son verídicos con el mecanismo de hurto caja negra se procedió a realizar las pruebas manualmente, utilizando una pinza amperimétrica para obtener parámetros de corriente y de tensión, y un cronómetro para censar el giro del disco del medidor. Los cálculos de potencias se efectúan con base en mediciones de tensión y corriente de la tabla 12.

**Tabla 12.** Parámetros de corrientes de red, corrientes del medidor y tensiones medidos con pinza amperimétrica Erasmus.

<b>Fases</b>	<b>Corrientes Red [A]</b>	<b>Corrientes Medidor [A]</b>	<b>Tensiones [V]</b>	<b>FP [P.U]</b>
R	95.7	2.404	211	0.87
S	95.6	2.371	212	0.86
T	96.1	2.376	211	0.87

**Fuente:** Elaboración propia.

Para calcular la energía registrada en el medidor se obtuvieron los datos descritos en la tabla 13.

**Tabla 13.** Datos característicos del medidor.

	<b>Número de giros</b>	<b>Tiempo [s]</b>	<b>Constante</b>
Activa	1	5.75	1200 R/kWh
Reactiva	1	8.13	1500 R/kWh

**Fuente:** Elaboración propia.

Las potencias de red y del medidor se presentan en la tabla 14, los cuales permiten comprobar que el porcentaje de error es -31%.

**Tabla 14.** Potencias calculadas.

<b>Sred [kVA]</b>	23.95
<b>Smed [kVA]</b>	35.06
<b>Error [%]</b>	-31.66
<b>FP [P.U]</b>	0.87

**Fuente:** Elaboración propia.

#### Error de transformación

El cálculo del error de transformación está basado en la norma internacional (IEC 61000-4-30, 2003), la cual proporciona la forma de calcular el error de relación que introduce un transformador en la medición, como se muestra en la ecuación (1).

$$\text{Error de corriente (EC) \%} = \frac{(Kn * (Is - Ip)) \times 100}{Ip} \quad (1)$$

De donde:

$Kn$  es la relación de transformación nominal;

$Ip$  es la corriente primaria real;

$Is$  es la corriente secundaria real cuando  $Ip$  fluye, bajo las condiciones de medición.

Para verificar que el error de transformación introducido por el CT de la fase  $S$  esté dentro del rango permitido se calcula el error con las condiciones normales, como se indica a continuación.

$$EC \% = \frac{(40 * (2.37 - 95.12)) \times 100}{95.12} = -0.33\%$$

El error de relación de transformación calculado para este caso fue -0.33%, el cual está dentro de lo permitido en esta norma nacional (NTC 2205, 2009).

## ANOMALÍAS ENCONTRADAS EN LAS CELDAS DE MEDIDA SEMIDIRECTA (AE19)

La construcción de la celda de medida semidirecta ha sido estandarizada por la Norma CODENSA S.A.E.S.P. AE319, 1998; estas especificaciones deben ser tenidas en cuenta por los constructores en el momento de la instalación por parte de CODENSA S.A.E.S.P., razón por la cual estos últimos interpretan la Norma de acuerdo con sus necesidades y no todas las celdas inspeccionadas cumplen los requerimientos.

Teniendo en cuenta lo anterior y a partir de las inspecciones hechas se logró determinar varias anomalías en las celdas de medida semidirecta que permiten la manipulación de los equipos de medida y que se describen en la tabla 15.

**Tabla 15.** Diferentes anomalías de la celda AE319.

CUADRO LISTADO ANOMALÍAS CELDA SEMIDIRECTA (AE319)		
ANOMALÍA	DESCRIPCIÓN	IMAGEN
1. SOBREDIMENSIONAMIENTO EN EL ORIFICIO DE ENTRADA DE ACOMETIDA	Se observa la amplitud del orificio de entrada de la acometida a los CT, el cual permite una manipulación de la medida porque excede la capacidad requerida entre 150% y 300%.	
2. DOBLE APERTURA DE ORIFICIO DE ACOMETIDA	Presencia de doble orificio con amplitud a los CT que permite una manipulación de la medida.	
3. SOBREDIMENSIONAMIENTO DE ORIFICIO DE PARCIAL	Orificio con amplitud por el cual se introduce la parcial porque excede la capacidad requerida entre 150% y 300%.	

**CUADRO LISTADO ANOMALÍAS CELDA SEMIDIRECTA (AE319)**

ANOMALÍA	DESCRIPCIÓN	IMAGEN
4. DISEÑO DE BISAGRA EN EL EXTERIOR DE LA CELDA	Bisagra de celda externa que permite ser dessoldada para hacer la apertura de la celda y que permite la manipulación del grupo de medida.	
5. AUSENCIA DE ORIFICIO EN EL ENTREPAÑO	Se observa que el entrepaño no brinda seguridad a la medida y que el orificio se encuentra en la parte de atrás y permite la manipulación manual del grupo de medida.	

**Fuente:** Elaboración propia.

**Documentación de las sugerencias a las anomalías encontradas en las celdas de medida semidirecta AE319**

Teniendo en cuenta las anomalías en las celdas de medida semidirecta se realiza un listado de

sugerencias relacionadas en la tabla 16; las sugerencias de las anomalías 1, 2 y 3 están basadas en la carga calculada para cada uno de los servicios, de acuerdo con (Rodríguez, 2012), y así se puede estandarizar estas medidas que no son muy claras en la (Norma AE319, 1998).

**Tabla 16.** Sugerencias para afrontar las anomalías encontradas en las celdas de medida semidirecta.

**LISTADO DE ANOMALÍAS DE LA CELDA SEMIDIRECTA (AE319)**

ANOMALÍA	SUGERENCIA
SOBREDIMENSIONAMIENTO EN EL ORIFICIO DE ENTRADA DE ACOMETIDA	Para la elección del diámetro del orificio de entrada de la acometida en la celda AE319 se debe tener en cuenta la tabla 31, en donde se estandariza las medidas del orificio según el tipo de acometida previamente calculado.
DOBLE APERTURA DE ORIFICIO DE ACOMETIDA	Se debe estandarizar un solo orificio de entrada de acometida.
SOBREDIMENSIONAMIENTO DEL ORIFICIO DE PARCIAL	Para la elección del diámetro del orificio de salida de la parcial en la celda AE319 se debe tener en cuenta la tabla 31 y estandarizar las medidas del orificio según el tipo de acometida previamente calculado.
DISEÑO DE BISAGRA EN EL EXTERIOR DE LA CELDA	Instalar las bisagras de las puertas de celda AE319 internas para que no se puedan manipular y así impedir el acceso al grupo de medida.
AUSENCIA DE ORIFICIO EN EL ENTREPAÑO	Estandarizar los orificios de entrada de la acometida y orificio de parcial, y eliminar por completo el acceso por detrás del entrepaño.

**Fuente:** Elaboración propia.

## CONCLUSIONES

Inicialmente se identifica que la Ley Eléctrica 142 no hace referencia a la frecuencia con que se debe hacer inspecciones en equipos de medida de energía eléctrica, lo cual en cierta medida facilita el uso e implementación de mecanismos de hurto en Bogotá, tales como el mecanismo de hurto de caja negra, que se establece como el más implementado en el sector industrial de la ciudad de Bogotá; lo anterior debido a que anula la señal de corriente vista por el medidor y, por consiguiente, evita el registro real del consumo de energía eléctrica.

Adicionalmente se evidenció que las fallas en el diseño de celdas de medida semidirecta (Norma AE319, 1998) facilitan la implementación de mecanismos de hurto, principalmente de tipo caja negra, para lo cual se recomienda que el diseño de las celdas de medida en mención se ajuste a los requerimientos de la carga contratada.

Finalmente, se comprueba que el uso de equipos patrón facilita la detección de instalaciones anormales y que pueden tener mecanismos de hurto.

## FINANCIAMIENTO

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

## REFERENCIAS

Codensa (1998). Norma Codensa S.A. E.S.P., AE 229, Acometida Subterránea de Baja Tensión. Bogotá.

- Codensa (1998). Norma Codensa S.A. E.S.P., AE 319, Armario para instalación de Equipo de Medida y Transformador de Corriente en B.T. (Alternativas 3 y 4). Bogotá.
- Comisión de Regulación de Energía y Gas (Colombia) (1997). Resolución CREG 108, Artículo 37. Bogotá.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Icontec (2004). Norma Técnica Colombiana (NTC 2205) (29 de 09 de 2004)–Transformadores de corriente y medida del, Bogotá.
- IEC, International Standard, 61000-4-30 (2003). Electromagnetic compatibility (EMC) – Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods. Ginebra, Suiza.
- Kemmerly, J. y W. H. (2000). *Análisis de circuitos en ingeniería* (3 ed.). McGraw-Hill.
- Ministerio de Minas y Energía de Colombia (1994). Ley Eléctrica, Ley 142–Artículo 149. Bogotá.
- Ministerio de Minas y Energía (Colombia) (1994). Ley Eléctrica 143, Artículo 145. Bogotá.
- Orjuela, P. (2008). *Pérdidas de energía–enfoque operativo*. 1<sup>a</sup>. ed. Bogotá: CartoPrint Ltda.
- Rodríguez, C. (2012). *Acometidas y Medidores / Pérdidas de Energía*. 1<sup>a</sup>. ed. Quito. Society I.P. (1993).
- IEEE, 315, Standard Canadian Standard Graphic Symbols for Electrical and Electronics Diagrams (Including Reference Designation Letter) IEEE Standard Boards.
- Superintendencia de Servicios Públicos SSPD (Colombia) (2002). Concepto 111. Bogotá.
- The Mathworks, Inc. (2009). Matlab 7.8.0.347, U.S.
- ZERA MT 3000 (2008). *Manual, Equipo patrón*.





## Modelo para identificación de cargas perturbadoras de la calidad de potencia eléctrica en cuanto al fenómeno armónico en una s/e

### Model for identifying disturbing loads of electric power quality in terms of the harmonic phenomenon in s/e

Julio César Moreno Cañón\*, Charles Aguirre Buitrago\*\*, Luis Antonio Noguera Vega\*\*\*

Citation / Para citar este artículo: Moreno Cañón, J. C., Aguirre Buitrago, C., & Noguera Vega, L. A. (2014). Modelo para identificación de cargas perturbadoras de la calidad de potencia eléctrica en cuanto al fenómeno de armónicos en una S/E. Revista Tecnura, Edición especial, 65-79.

**Fecha de recepción:** 29 de noviembre de 2013 / **Fecha de aceptación:** 11 de julio de 2014

#### RESUMEN

En este documento se presenta el modelo en particular con el propósito de identificar y enfocar la carga no lineal en el sistema eléctrico de un operador de red. Debido a los nuevos requisitos y parámetros de la regulación, hoy es necesario comenzar a establecer, localizar y desactivar el usuario culpable; de lo contrario, la compañía eléctrica tendrá el deber de garantizar mejor calidad de poder. A través de la estadística, en este caso con ayuda de correlación, se describen los parámetros eléctricos y características de los usuarios.

**Palabras clave:** Calidad de potencia, cargas no lineales, Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), correlación, distorsión armónica.

#### ABSTRACT

This document presents the particular model with the purpose to identify and focus non-linear load in the electric system of a network operator. Due to the new requirements and parameters of regulation, today it is necessary to begin establishing, locating and deactivating the guilty user, otherwise, the electric company will guarantee better power quality. Through statistics, in this case with correlation support, the electrical parameters and users characteristics are described.

**Keywords:** Correlation, CREG (Colombian Comisión de Regulación de Energía y Gas), harmonic distortion, non-linear loads, quality power.

\* Ingeniero electricista. Profesional en Distribución de CODENSA S.A ESP. Bogotá, D.C. Contacto: [jmorenoca@endesacolombia.com.co](mailto:jmorenoca@endesacolombia.com.co)

\*\* Ingeniero electricista. Profesional en Distribución de CODENSA S.A ESP. Bogotá, D.C. Contacto: [chaguirre@endesacolombia.com.co](mailto:chaguirre@endesacolombia.com.co)

\*\*\* Ingeniero en Distribución y Redes Eléctricas, especialista en Informática y Automática Industrial. Docente, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, D.C. Contacto: [lanoguera@udistrital.edu.co](mailto:lanoguera@udistrital.edu.co)

## INTRODUCCIÓN

Este documento presenta el desarrollo de un modelo para la identificación y focalización de cargas perturbadoras de la calidad de potencia en cuanto al fenómeno de distorsión armónica en subestaciones de 34,5 kV y 11,4 kV, buscando satisfacer las necesidades en la calidad de la onda de tensión de usuarios particulares del sistema y dar cumplimiento a lo estipulado en la regulación actual de calidad de potencia en Colombia (Resolución CREG 016 de 2007, por la cual se modifica parcialmente la Resolución CREG 024 de 2005 que establece las normas de calidad de potencia eléctrica aplicables a los servicios de distribución de energía eléctrica) que estipula un plazo máximo de treinta (30) días hábiles para que el operador de red (OR) luego de la detección de una deficiencia en la calidad de la potencia suministrada identifique al usuario causante de la misma. Si vencido este plazo no lo ha identificado, el OR deberá proceder a corregir dicha deficiencia (Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2005).

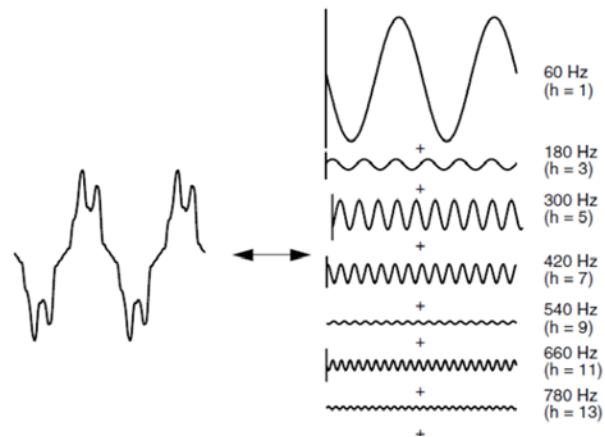
Ahora bien, se efectúa un análisis del marco bibliográfico y regulatorio a nivel mundial con el ánimo de establecer el futuro próximo de la regulación del fenómeno armónico en Colombia, asignando oportunidades de mejora y necesidades próximas en la medición, identificación y control de las perturbaciones del sistema por parte del OR.

De acuerdo con lo anterior, se desarrolla un modelo particular combinando estadística descriptiva con la conexión y desconexión de cargas (por eventos del sistema de distribución local) para focalizar los usuarios más probables de ser fuentes de perturbación armónica.

## MARCO CONCEPTUAL Y REGULATORIO

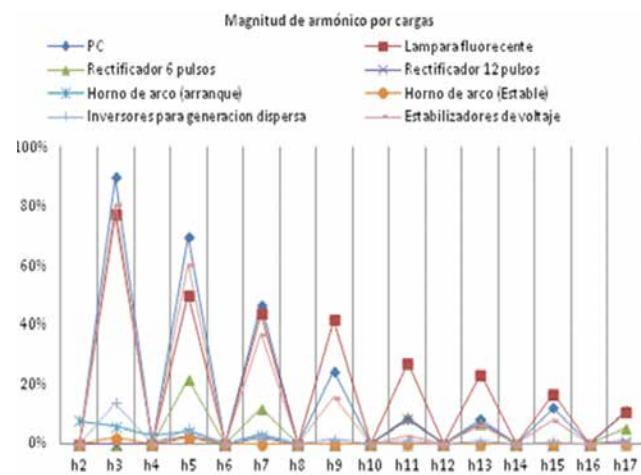
La conexión de elementos no lineales al sistema eléctrico cambia la naturaleza de la onda sinusoidal de la corriente de alimentación, generando un flujo de corrientes sinusoidales con diferente

frecuencia; este fenómeno se conoce como distorsión armónica. En la figura 1 se observa que cuando una forma de onda es idéntica en cada uno de sus ciclos, esta puede representarse como la suma de ondas sinusoidales en las que la frecuencia de cada onda es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental de la onda distorsionada; esta suma se conoce como series de Fourier.



**Figura 1.** Representación en series de Fourier de una onda distorsionada.

**Fuente:** (Dugan, Santoso, & Wayne, 2013).



**Figura 2.** Magnitudes típicas de armónicos en cargas conectadas al sistema eléctrico.

**Fuente:** Elaboración propia.

De acuerdo con la aplicación de las cargas no lineales conectadas al sistema, las causas de la generación de corrientes armónicas se pueden separar de acuerdo con el tipo de cliente para este trabajo serán los llamados industriales, comerciales y residenciales. En la figura 2 se observa la magnitud de los armónicos en porcentaje de la fundamental en algunas de las cargas más comunes en un sistema de distribución.

Las corrientes armónicas generadas por las cargas no lineales conectadas al sistema pueden impactar negativamente en una gran cantidad de equipos conectados a la red distorsionada, ocasionando pérdidas adicionales, sobrecalentamiento y sobrecargas.

En los transformadores, la distorsión armónica contribuye significativamente al sobrecalentamiento debido al efecto Joule, aumentando las pérdidas en el cobre y en el núcleo (Pereira, 2010). Respecto a los conductores expuestos a distorsión armónica en la corriente transportada, estos se ven expuestos a calentamientos por los efectos conocidos como *piel y proximidad*, que varían en función de la frecuencia y del calibre del conductor, y como resultado de este par de efectos, la resistencia efectiva de los conductores incrementa aumentando las pérdidas (IEEE, 1992).

Las componentes armónicas afectan los instrumentos de medida ocasionando errores positivos y negativos, dependiendo del tipo de medidor y de los armónicos involucrados. En general, el factor de distorsión debe ser elevado ( $> 20\%$ ) antes de que se evidencien errores significativos en los aparatos de medida (IEEE, 1992).

La comparación de los límites y controles regulatorios relacionados con la distorsión armónica a nivel mundial nos sitúa en el escenario actual y deja entrever el futuro de la regulación armónica en Colombia. Dicha comparación se logra recopilando la información regulatoria del fenómeno armónico en los países referentes latinoamericanos (Argentina, Brasil y México), además de Estados Unidos, España y Sudáfrica; clasificando sus límites, controles y penalizaciones por los niveles de tensión estipulados por la CREG 082 de 2002 (tabla 1), se encontraron diferencias entre los países en cuanto a la aplicación de penalizaciones a

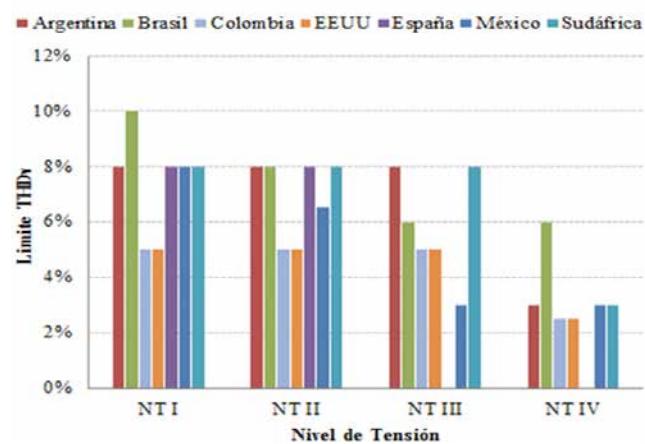
los OR, el control de las emisiones a los usuarios finales en el punto de conexión común (PCC) y los límites establecidos para la distorsión armónica de las ondas de tensión y corriente (Pereira, 2010).

**Tabla 1.** Niveles de tensión.

Nivel de tensión	Rango de tensión
I	Menor que 1 [kV]
II	Mayor o igual a 1 [kV] y menor a 30 [kV]
III	Mayor o igual a 30 [kV] y menor a 57,5 [kV]
IV	Mayor o igual a 57,5 [kV] y menor a 220 [kV]

**Fuente:** Elaboración propia.

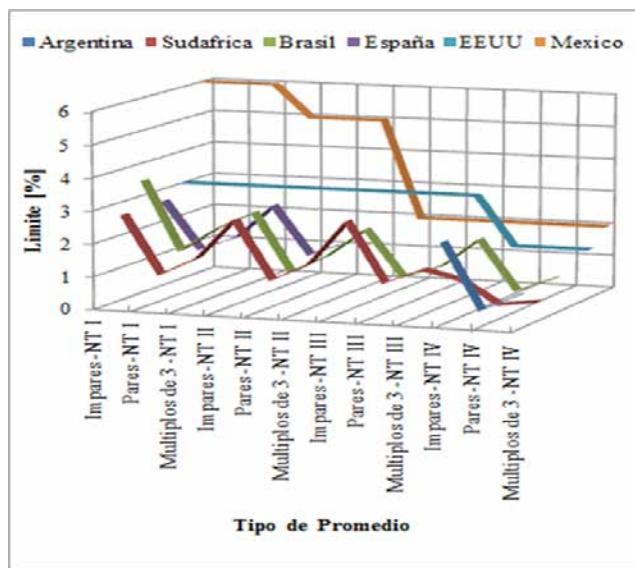
La regulación en Colombia es la única que no limita los valores individuales de distorsión armónica de tensión. Al analizar en detalle los límites regulatorios se encuentran diferentes exigencias en los países, en cuanto a la distorsión armónica total de tensión, como se puede observar en la figura 3, España no la limita para los niveles de tensión más altos, además de que los límites más exigentes son los estadounidenses junto con los colombianos (basados en la IEEE 519) y dejando los límites regulatorios de Brasil como los menos estrictos en cuanto al THDv.



**Figura 3.** Límites regulatorios para la distorsión armónica total de tensión (THDv).

**Fuente:** Elaboración propia.

Para los límites individuales de distorsión armónica en la onda de tensión (no regulados en Colombia, figura 4), se encuentra que los límites más exigentes son para los armónicos pares y los múltiplos de tres y que dichos límites se tornan más estrictos para los niveles de tensión más altos, situación que pone en desventaja el actual marco regulatorio de calidad de potencia en Colombia, el cual solo limita la distorsión armónica total de tensión (THDv).



**Figura 4.** Límites regulatorios para la distorsión armónica individual de tensión (IHDv).

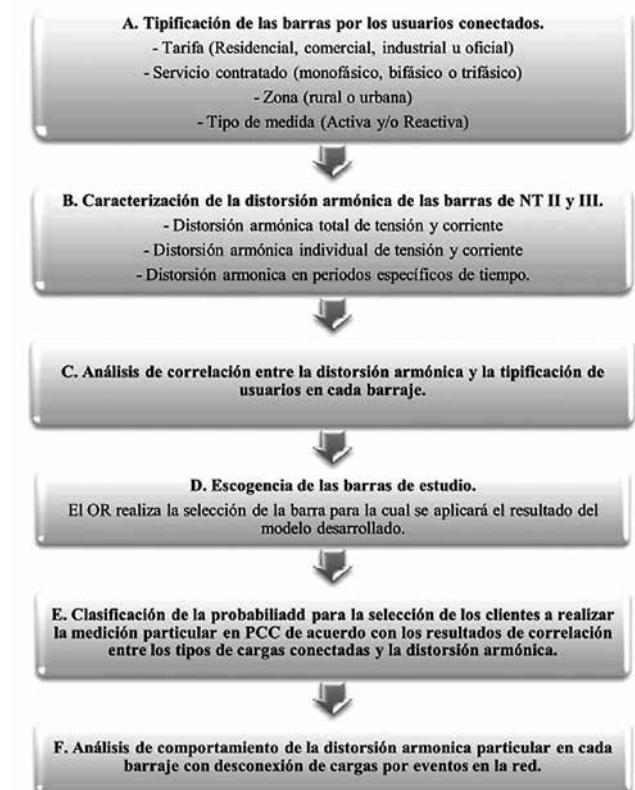
**Fuente:** Elaboración propia.

## METODOLOGÍA

De acuerdo con el desafío planteado en la regulación colombiana, luego de identificada una perturbación en la calidad de la potencia superior a los límites determinados se requiere la identificación por parte del OR, del usuario causante de la misma en un plazo no mayor que treinta (30) días hábiles para evitar asumir por completo la corrección de dicha deficiencia (Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2007) a fin de garantizar el cumplimiento regulatorio, cuando se detecta una distorsión armónica de la onda de tensión superior

a 5% (niveles de tensión I, II y III), se desarrolló un modelo que inicialmente tipifica la carga total conectada a cada barraje y la compara por medio del coeficiente de correlación momento producto de Pearson ( $r$ ) con la caracterización por estadística descriptiva de la distorsión armónica presente en cada barra, determinando así el comportamiento característico de la distorsión armónica en las redes respecto a los tipos de usuarios que la generan.

Luego son seleccionadas por parte del OR las barras críticas que requieren la aplicación del modelo y en estas se evalúa su comportamiento durante períodos de desconexión y conexión de cargas durante los diferentes eventos del sistema (maniobras de mantenimiento y fallas). El flujoograma del modelo propuesto se observa en la figura 5.



**Figura 5.** Flujoograma para el desarrollo del modelo propuesto.

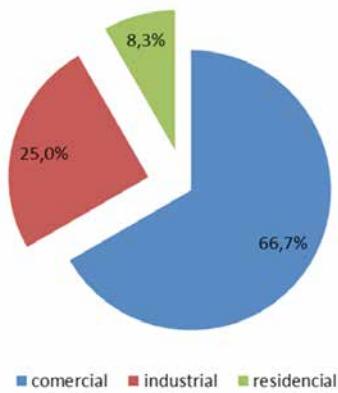
**Fuente:** Elaboración propia.

## RESULTADOS

Después de definir la metodología se procedió a desarrollar cada uno de los pasos definidos, en los cuales se analizó la información del OR.

### Tipificación de las barras por los usuarios conectados

El OR cuenta con una cantidad considerable de subestaciones AT-MT y MT-MT con tensiones de 34,5, 13,2 y 11,4 kV, de donde se alimentan más de 1 millón de usuarios; dichos usuarios se tipificaron por tarifa (residencial, comercial, industrial y oficial, que se entenderá como tipo de carga), servicio contratado (monofásico, bifásico y trifásico), zona (urbana y rural), tipo de medida (activa y/o reactiva) y nivel de tensión en PCC (NT I y NT II y III), siendo el insumo de esta información las bases de datos comerciales de la compañía; esto permite caracterizar las cargas conectadas en cada barraje.



**Figura 6.** Tipificación de clientes por tarifa en la barra 1 de 34.5 kV de la S/E.

**Fuente:** Elaboración propia.

Siguiendo las recomendaciones de la NTC 2859 se determina el tamaño de la muestra con el máximo nivel de inspección, resultando una muestra de 50 barrajes, con un nivel de confianza de 91,47% y un margen de error de 7%, para los cuales se tipificaron sus usuarios (ICONTEC, 2002); en la figura

6 se observa la tipificación de clientes en cuanto a la tarifa para una de las barras seleccionadas por muestreo; esta gráfica solo corresponde a una de las variables nombradas en el párrafo anterior.

### Caracterización de la distorsión armónica en los barrajes

Se realiza la descarga de información desde la plataforma corporativa de calidad de potencia para los barrajes seleccionados en un período de tiempo específico con intervalos de medición de 10 minutos para los siguientes parámetros:

Distorsión armónica individual de corriente del armónico 2 al 6 por fase (IH<sub>Dc</sub>).

- Distorsión armónica individual de voltaje del armónico 2 al 8 por fase. (IH<sub>Dv</sub>).
- Distorsión armónica total de voltaje y corriente por fase. (THD<sub>v</sub> y THD<sub>c</sub>).

Luego se hace la segregación de los datos obtenidos por rangos de tiempo semanales (lunes a sábado y domingo) y diarios (día y noche) y se aplica estadística para describir, explorar y comparar los datos a través de medidas de tendencia central y variación (promedio, media, moda, desviación estándar, cuartiles, máximos y mínimos), logrando así la caracterización de la distorsión armónica en cada una de las cincuenta (50) barras muestreadas.

### Análisis de correlación entre la distorsión armónica y la tipificación de usuarios en cada barraje

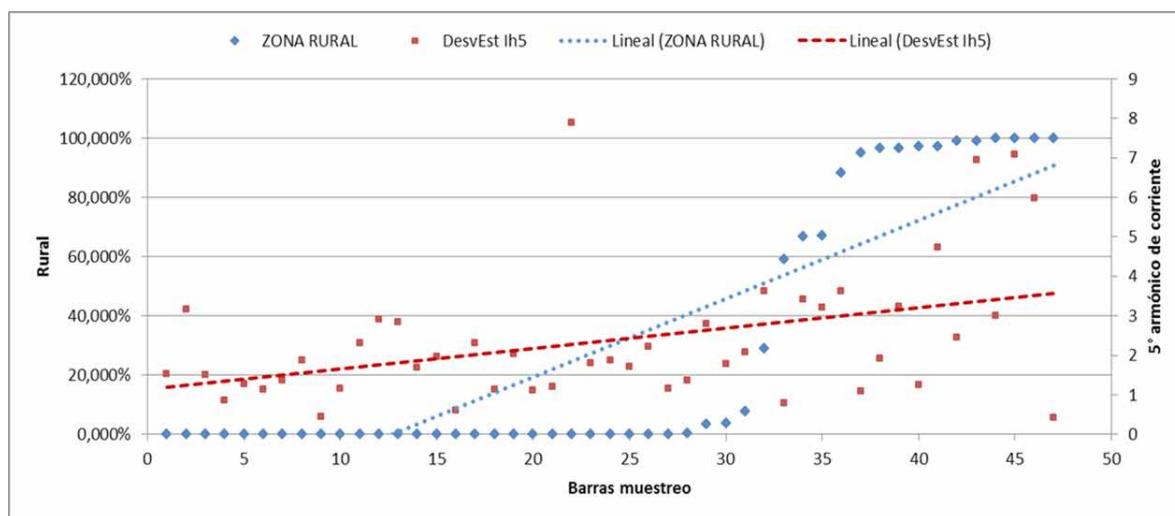
Se compila la información de la caracterización de los barrajes por los usuarios conectados y la distorsión armónica, resultando una matriz aproximada de 50 filas (cantidad de barrajes muestreados) x 161.500 columnas (características de la carga y la distorsión) para encontrar alguna relación entre las cargas conectadas y se utiliza el coeficiente de correlación producto momento de Pearson (r) (Trolla, 2009) para medir la fuerza de la relación lineal

entre los valores cuantitativos apareados  $x$  (*características de las cargas conectadas*) y (*características de la distorsión armónica*) en la muestra.

Mediante una herramienta computacional se calcula la correlación entre las características de la carga conectada y la distorsión armónica y se concluye que existe correlación lineal significativa, donde se cumple lo siguiente:

- El valor absoluto de  $r$  excede 0,361 (Triola, 2009).
- El nivel de significancia sea inferior a 0,01 [*Ibid.*]

Como representación gráfica se realizaron espectros de distorsión para las correlaciones encontradas; en la figura 7 se observa uno de ellos.



**Figura 7.** Gráfica de dispersión para la combinación Zona (rural) – Promedio del armónico 5 de corriente.

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 3.** Resumen de correlaciones entre las características de los clientes conectados y la distorsión de las barras.

Característica	$r$ (+)	$r$ (-)	Min	Max	R1	R2	R3	R4
% IHDv_7 en THDv	1φ	3φ	0%	100%	$\geq 0$ [%] $\leq 25$ [%]	$> 25$ [%] $\leq 50$ [%]	$> 50$ [%] $\leq 75$ [%]	$> 75$ [%] $\leq 100$ [%]
Dif_IHDI_5 L-S y Dom (día)	3φ	1φ	0%	3%	$\leq 0,75$ [%] $\leq 1,48$ [%]	$> 0,75$ [%] $\leq 2,22$ [%]	$> 1,48$ [%] $\leq 2,22$ [%]	$> 2,22$ [%]
Prom_V_h5	Res	Ind	0%	4%	$\leq 1,01$ [%] $\leq 2,02$ [%]	$> 1,01$ [%] $\leq 3,02$ [%]	$> 2,02$ [%] $\leq 3,02$ [%]	$> 3,02$ [%]
DesvEst_IHDv_7	Rur	Urb	0,00	0,69	$\leq 0,17$ $\leq 0,35$	$> 0,17$ $\leq 0,52$	$> 0,35$	$> 0,52$
% IHDI_3 en THDi	Rur	Urb	0%	100%	$\geq 0$ [%] $\leq 25$ [%]	$> 25$ [%] $\leq 50$ [%]	$> 50$ [%] $\leq 75$ [%]	$> 75$ [%] $\leq 100$ [%]
% IHDI_5 en THDi	Urb	Rur	0%	100%	$\geq 0$ [%] $\leq 25$ [%]	$> 25$ [%] $\leq 50$ [%]	$> 50$ [%] $\leq 75$ [%]	$> 75$ [%] $\leq 100$ [%]

**Fuente:** Elaboración propia.

De acuerdo con los resultados obtenidos del análisis de correlación ( $r$ ), se construyeron las tablas 3 y 4, en las que se hace una clasificación de probabilidad a los diferentes tipos de clientes de acuerdo con la caracterización de la distorsión armónica y así poder focalizar la medida en el PCC, disminuyendo la población y permitiendo determinar de manera más eficiente la carga perturbadora.

**Tabla 4.** Clasificación de la probabilidad para selección de clientes.

Rango	Clasificación $r$ (+)	Clasificación $r$ (-)
R1: Menor o igual al 25 %	Baja (1)	Alta (4)
R2: Entre 25 y 50 %	Media baja (2)	Media alta (3)
R3: Entre 50 y 75 %	Media alta (3)	Media baja (2)
R4: Mayor que 75 %	Alta (4)	Baja (1)

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 5.** Caracterización de cargas en barras definidas.

Característica	Barra		
	B12	B1	B2
S/E	S/E1	S/E2	S/E2
NT [kV]	34,5	13,2	13,2
Circuitos alimentados	3	2	1
Clientes OR	107	2211	4097
Tarifa	Comercial	98,13%	1,04%
	Industrial	1,87%	0,05%
	Oficial	0,00%	0,05%
	Residencial	0,00%	98,87%
Servicio Contratado	Monofásico	0,00%	0,14%
	Bifásico	0,00%	90,28%
	Trifásico	3,74%	5,92%
	Sin Información	96,26%	3,66%
Zona	Urbano	10000%	2,76%
	Rural	0,00%	97,24%
Tipo de Medida	Activa	97,20%	100,00%
	Activa y Reactiva	2,80%	0,00%
Nivel de Tensión	NT I	91,59%	100,00%
	NT II ó NT III	8,41%	0,00%

Fuente: Elaboración propia.

## Selección del barraje

De acuerdo con las necesidades del OR, se determinan como barras de estudio las siguientes:

- Barra 12 de 34,5 [kV] de la S/E1
- Barras 1 y 2 de 13,2 [kV] de la S/E2

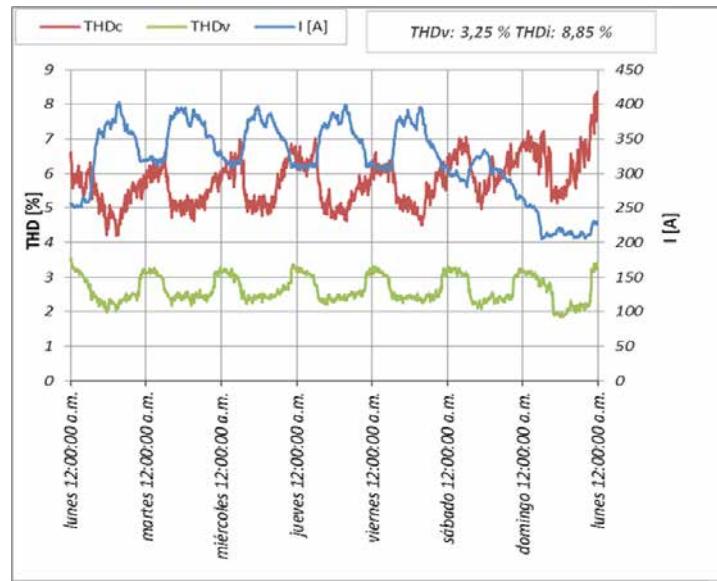
Para las barras seleccionadas se hace la tipificación de los usuarios conectados, así como la caracterización de su distorsión armónica; este resultado se observa en las tablas 5 y 6.

**Tabla 6.** Caracterización de la distorsión armónica en barras definidas.

Característica	Barra		
	B12	B1	B2
Percentil 95 del THDi	8,85%	22,54%	12,72%
Percentil 95 del THDv	3,28%	5,44%	4,53%
Percentil 95 del IHDi_3	0,66%	5,97%	11,48%
Percentil 95 del IHDi_5	8,61%	19,68%	5,13%
Percentil 95 del IHDrv_3	0,29%	0,91%	0,98%
Percentil 95 del IHDrv_5	3,25%	4,75%	3,98%
Percentil 95 del IHDrv_7	0,68%	2,76%	2,31%
% de IHDi_3 en THDi	4,40%	29,64%	78,42%
% de IHDi_5 en THDi	98,18%	89,62%	44,28%
Dif_Prom_IHDi_5 L-S y Dom (Día)	2,07%	0,04%	0,35%
Prom_IHDrv_5	2,55%	3,52%	2,88%
% de IHDrv_7 en THDv	13,54%	29,74%	34,44%
DesvEst_IHDrv_7	0,18	0,66	0,59

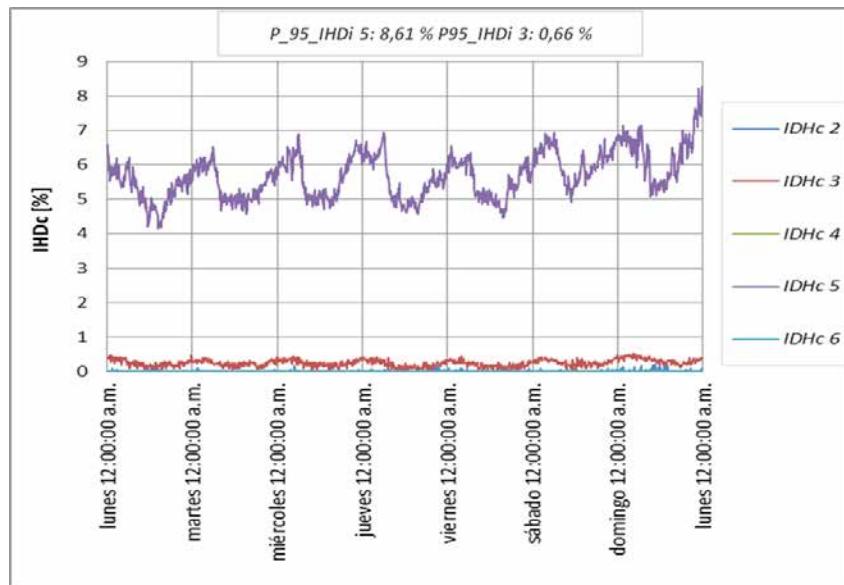
Fuente: Elaboración propia.

Como parte del análisis se efectuó el estudio de los parámetros eléctricos asociados a los barrajes de la subestación para los cuales se tuvo en cuenta el perfil de carga a partir de lo que se catalogó como una semana típica, es decir, el comportamiento promedio del barraje en condiciones normales de servicio; de esta manera se tiene una comparación entre los valores de carga y el factor de armónicos que contienen; para ello se observa el comportamiento del THDv, THDi y los individuales de corriente para el barraje de la subestación S/E1 (figuras 8 y 9).



**Figura 8.** Perfil de carga y distorsión armónica total de tensión y corriente en la barra 12 de 34,5 kV de la S/E1 (semana típica).

**Fuente:** Elaboración propia.

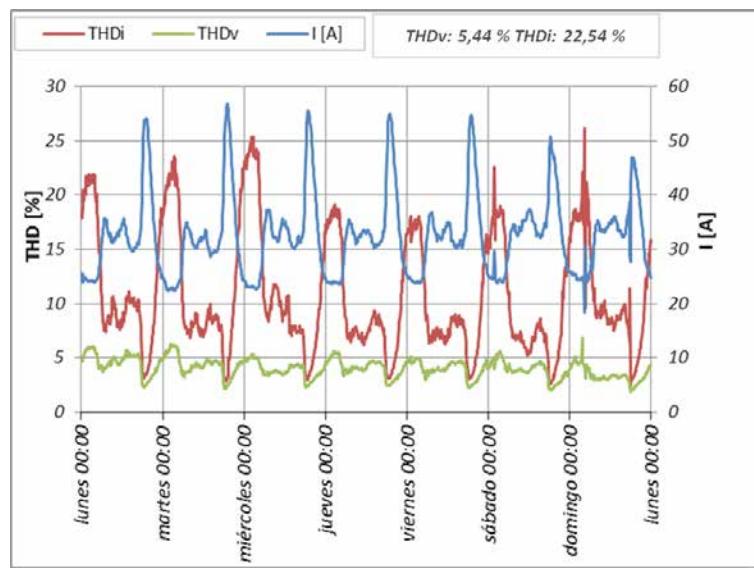


**Figura 9.** Distorsión individual de corriente en la barra 12 de 34,5 kV de la S/E1 (semana típica).

**Fuente:** Elaboración propia.

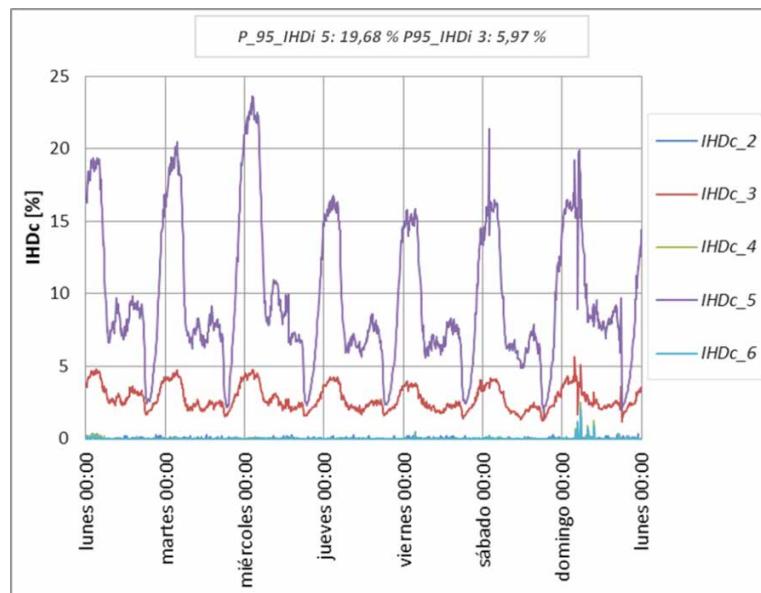
Por otro lado, se tienen los mismos criterios para la subestación S/E2 (la cual tiene dos barrajes); para el caso práctico solo se muestra el

comportamiento del barraje 1, en las figuras 10, 11 y 12.



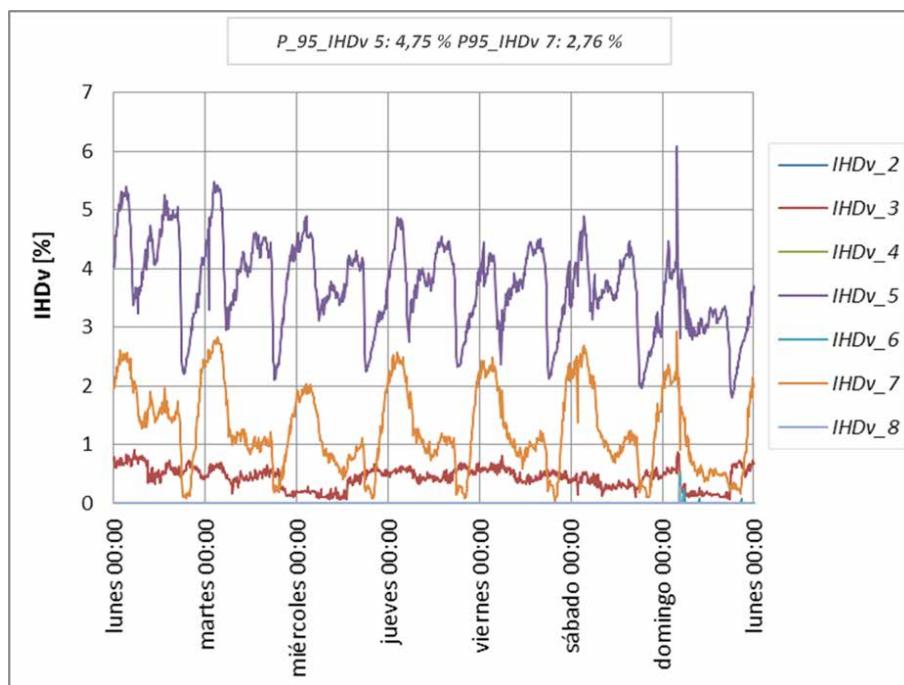
**Figura 10.** Perfil de carga y distorsión armónica total de tensión y corriente en la barra 1 de 13,2 kV de la S/E2 (semana típica).

**Fuente:** Elaboración propia,



**Figura 11.** Distorsión individual de corriente en la barra 1 de 13,2 kV de la S/E2 (semana típica).

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 12.** Distorsión individual de tensión en la barra 1 de 13,2 kV de la S/E2 (semana típica).

**Fuente:** Elaboración propia.

## Asignación de rango y clasificación de probabilidades

Como resultado de la aplicación de las tablas 3 y 4 a la caracterización armónica de cada una de las barras estudiadas, se encuentra que los clientes más probables de generar la distorsión armónica en la barra 12 de 34,5 kV de la subestación S/E1 son los clientes trifásicos, residenciales y urbanos (tabla 7); asimismo para la barra 1 de 13,2 kV de la subestación S/E2 los clientes con mayor probabilidad de ser fuentes de distorsión armónica son los clientes monofásicos, residenciales y ubicados en la zona urbana (tabla 8). Por último, en la barra 2 de 13,2 kV de la subestación S/E2 es preciso iniciar la búsqueda por los clientes monofásicos, residenciales ubicados en la zona rural, como se observa en la tabla 9.

## Análisis de eventos con afectación de cargas

De acuerdo con el modelo planteado, se complementa la priorización con un análisis del comportamiento de la distorsión armónica durante eventos en la red que por su naturaleza llevan a la desconexión y conexión de cargas (fallas y maniobras de mantenimiento) en las barras seleccionadas. Dichos eventos se dividen a su vez en etapas durante las cuales se realiza aperturas y cierres en diferentes dispositivos de maniobra que modifican las cargas afectadas.

Para efectuar este análisis se comparó el comportamiento histórico de la distorsión armónica en cada barra en los períodos de falla y el comportamiento particular en el período de tiempo en que ocurre el evento, dando como resultado cuáles son las cargas que al ser desconectadas del sistema disminuyen en mayor porcentaje la distorsión armónica.

**Tabla 7.** Clasificación de la probabilidad para selección de clientes en barraje 12 de 34.5 kV de la subestación S/E1.

Característica	Valor	Rango	Serv_Contratado		Tarifa		Zona	
			1φ	3φ	Res	Ind	Rural	Urb
% IHDv_7 en THDv	13,54%	R1	Baja (1)	Alta (4)				
Dif_IHDC_5 L-S y Dom (día)	2,07%	R3	Media Baja (2)	Media Alta (3)				
Prom_IHDv_5	2,55%	R3			Media Alta (3)	Media Baja (2)		
DesvEst_IHDv_7	0,18	R2					Media Baja (2)	Media Alta (3)
% IHDC_3 en THDc	4,40%	R1					Baja (1)	Alta (4)
% IHDC_5 en THDc	98,18%	R4					Baja (1)	Alta (4)
Total			3	7	3	2	4	11

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 8.** Clasificación de la probabilidad para selección de clientes en barraje 1 de 13.2 kV de la S/E2.

Característica	Valor	Rango	Serv_Contratado		Tarifa		Zona	
			1φ	3φ	Res	Ind	Rural	Urb
% IHDv_7 en THDv	29,74%	R2	Media Baja (2)	Media Alta (3)				
Dif_IHDC_5 L-S y Dom (día)	0,04%	R1	Alta (4)	Baja (1)				
Prom_IHDv_5	3,52%	R4			Alta (4)	Baja (1)		
DesvEst_IHDv_7	0,66	R4					Alta (4)	Baja (1)
% IHDC_3 en THDc	29,64%	R2					Media Baja (2)	Media Alta (3)
% IHDC_5 en THDc	89,62%	R4					Baja (1)	Alta (4)
Total			6	4	4	1	7	8

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 9.** Clasificación de la probabilidad para selección de clientes en barraje 2 de 13.2 kV de la S/E2.

Característica	Valor	Rango	Serv_Contratado		Tarifa		Zona	
			1φ	3φ	Res	Ind	Rural	Urb
% IHDv_7 en THDv	34,44%	R2	Media Baja (2)	Media Alta (3)				
Dif_IHDC_5 L-S y Dom (día)	0,35%	R1	Alta (4)	Baja (1)				
Prom_IHDv_5	2,88%	R3			Media Alta (3)	Media Baja (2)		
DesvEst_IHDv_7	0,59	R4					Alta (4)	Baja (1)
% IHDC_3 en THDc	78,42%	R4					Alta (4)	Baja (1)
% IHDC_5 en THDc	44,28%	R2					Media Alta (3)	Media Baja (2)
Total			6	4	3	2	11	4

**Fuente:** Elaboración propia.

En las figuras 13, 14 y 15 se observan los cambios en la distorsión armónica al ocurrir un evento en la red de distribución, y con ayuda de la puntuación Z (Triola, 2009) se hace la comparación requerida y se puede dar una clasificación al impacto en la distorsión armónica; para esto se toman los eventos en los barrajes escogidos, determinando el detalle como día de la semana y rango de duración; estas variables son las que permiten realizar la comparación del comportamiento armónico durante estos eventos y las mediciones en los mismos rangos de tiempo en un histórico de seis meses de mediciones. De este modo las variaciones negativas en las gráficas denotan una disminución importante en la distorsión y los clientes afectados durante estos eventos tienen gran posibilidad de ser quienes afectan la calidad de la potencia; por esto se resaltan dentro de la primera

clasificación efectuada mediante el modelo por correlación.

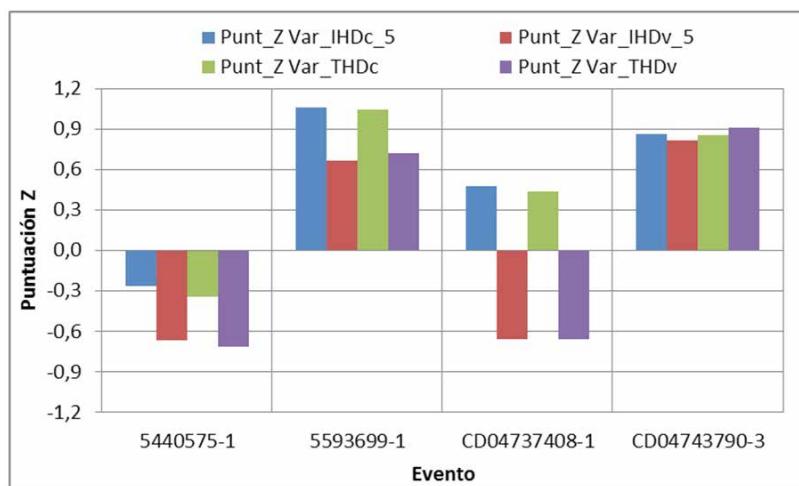
En la tabla 10 se observan los eventos con afectación a clientes conectados en las tres barras de estudio, de los cuales se determinan como relevantes los eventos en donde la puntuación Z es inferior a menos dos (-2), por lo que siendo consecuentes con el teorema de Chebyshev, el valor de la distorsión armónica en el momento de la falla se encuentra dentro de 25% de los valores menos probables y alejados más de dos desviaciones estándar de la media.

Con base en lo anterior, de los eventos analizados el único que permite determinar a los clientes afectados como posibles fuentes de distorsión armónica es el ocurrido sobre la barra 1 de la subestación S/E2 cuyo número de evento es CD04771562 en su primera etapa (CD04771562-1).

**Tabla 10.** Eventos con afectación de clientes en las barras seleccionadas.

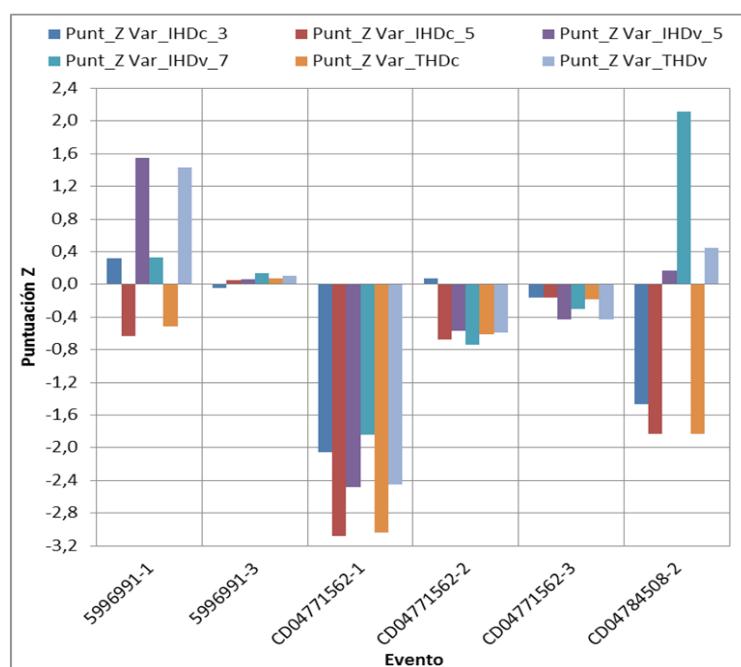
Barra	Evento-Etapa	CCDD Afectados	Fecha Evento	Duración [min]
B12	5440575-1	1	23/06/2013 07:40	450
B12	5593699-1	1	28/07/2013 09:23	169
B12	CD04737408-1	6	08/06/2013 16:02	76
B12	CD04743790-3	5	15/07/2013 12:21	1973
B1	5996991-1	1	17/11/2013 08:52	20
B1	5996991-3	1	18/11/2013 10:07	31
B1	CD04771562-1	15	02/11/2013 09:00	81
B1	CD04771562-2	28	02/11/2013 10:20	57
B1	CD04771562-3	17	02/11/2013 11:18	3229
B1	CD04784508-2	154	29/12/2013 09:24	37
B2	CD04774550-1	34	13/11/2013 14:24	3446
B2	CD04774550-3	34	17/11/2013 11:50	346

**Fuente:** Elaboración propia.



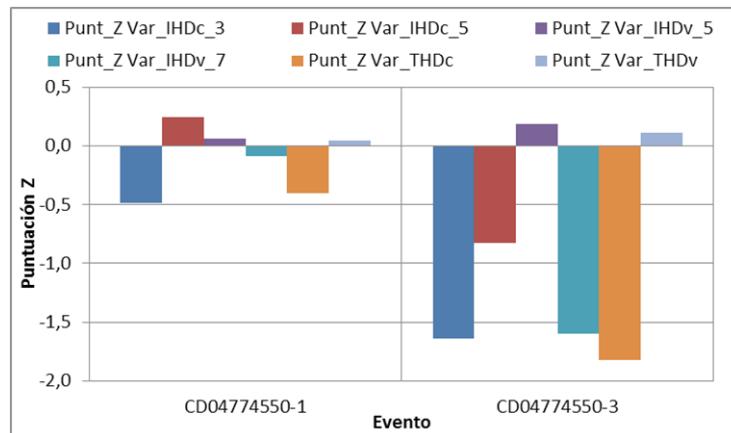
**Figura 13.** Puntuación Z de los valores de distorsión armónica durante los eventos ocurridos en la barra 12 de 34,5 kV de la S/E1.

**Fuente:** Elaboración propia.



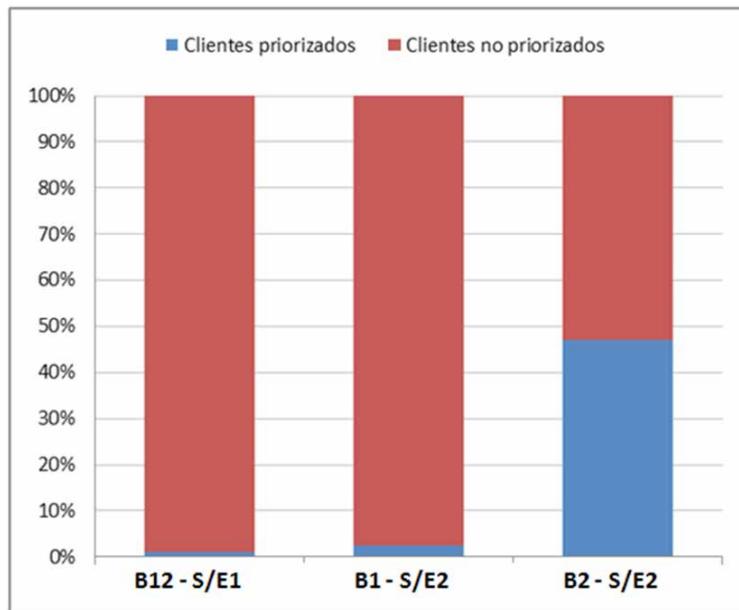
**Figura 14.** Puntuación Z de los valores de distorsión armónica durante los eventos ocurridos en la barra 1 de 13,2 kV de la S/E2.

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 15.** Puntuación Z de los valores de distorsión armónica durante los eventos ocurridos en la barra 2 de 13,2 kV de la S/E2.

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 16.** Porcentaje de clientes priorizados para realizar la medida de calidad de potencia en PCC para las barras seleccionadas.

**Fuente:** Elaboración propia.

Con el análisis de la puntuación Z calculada para cada una de las fallas se puede proceder a realizar el cruce de los centros de distribución asociados a la falla representativa, para de estos escoger los clientes que tengan las características

relacionadas en la tabla 8 y así poder cerrar el proceso con una priorización precisa que permita obtener la eficiencia en las medidas en PCC para encontrar cargas generadoras de distorsión armónica.

## Análisis del modelo

Al analizar y ejecutar el modelo propuesto se obtuvo para la barra 12 de 34,5 kV de la S/E1, la población sobre la cual se puede priorizar la medición de calidad de potencia en PCC es de 1 cliente de 107 posibles; asimismo para la barra 1 de 13,2 kV de la S/E2 se priorizará la medida a 54 de los 2211 clientes conectados en dicha barra; por último, en la barra 2 de 13,2 kV en 1932 clientes de 4097 posibles es conveniente iniciar la medida. Lo anterior se refleja gráficamente en la figura 16.

## CONCLUSIONES

El método de correlación es una muy buena herramienta para focalizar variables y permitir interpretar sus efectos, relaciones y comportamiento ya que permite de manera eficiente evaluar la relación entre dos o más variables sin importar la escala de cada rango de datos por analizar.

Del análisis de las correlaciones relacionadas con el servicio contratado de los clientes observado en la figura 7 se concluye que al aumentar los clientes monofásicos y disminuir los trifásicos aumenta el porcentaje del armónico de tensión 7 y la diferencia del porcentaje del armónico de corriente 5 calculado de lunes a sábado, y el calculado los domingos disminuye.

Al aplicar el análisis mediante puntuación Z de los eventos con afectación de clientes, se puede reconocer fácilmente si las cargas desconectadas en cada una de las etapas de los eventos generan una disminución importante en la distorsión armónica, permitiendo sesgar aún más la cantidad de clientes que serán priorizados para la medida. En caso de requerirse se puede aumentar el rango de tiempo durante el cual se evalúen los eventos para tener mayor cantidad de probabilidad de encontrar una carga que al desconectarse disminuya de manera relevante la distorsión armónica.

Mediante la aplicación del modelo se logró dar prioridad en la medida en PCC a 0,93% del total de los clientes conectados a la barra de 34,5 kV (barra 12 de la S/E1), a 2,44% del total de los clientes conectados a la barra 1 de la S/E2 y a 47,16% de los clientes conectados a la barra 2 de la S/E2.

Para el OR la aplicación del modelo propuesto mejora sustancialmente su imagen corporativa y optimiza la utilización de recursos para la ubicación de usuarios perturbadores de la calidad de potencia por distorsión armónica, garantizando la ubicación estratégica de los equipos de medida, reduciendo sustancialmente los tiempos de ubicación y permitiendo tener respuestas oportunas tanto a los entes regulatorios como a los propios usuarios del sistema.

## FINANCIAMIENTO

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

## REFERENCIAS

- Comisión de Regulación de Energía y Gas (2005). CREG-024.
- Comisión de Regulación de Energía y Gas (2007). CREG-017.
- Dugan, M.; Santoso, & Wayne (junio de 2013). [www.digitalengineeringlibrary.com](http://www.digitalengineeringlibrary.com). Recuperado el 21 de marzo de 2014.
- ICONTEC (3 de abril de 2002). Procedimiento de muestreo para inspecciones de atributos. Colombia.
- IEEE (1992). Recommended Practices and requirements for harmonics control in electrical power systems.
- Pereira, U. T. (2010). Diagnóstico de la calidad de potencia en la actividad de distribución de energía eléctrica. Pereira.
- Triola, M. (2009). *Estadística*. Pearson Educación.





## Using the delaunay triangulation and voronoi diagrams for navigation in observable environments

### Uso de la triangulación de delaunay y los diagramas de voronoi para navegación en ambientes observables

Fernando Martínez Santa\*, Fredy Hernán Martínez Sarmiento\*\*, Edwar Jacinto Gómez\*\*\*

Citation / Para citar este artículo: Martinez Santa, F., Jacinto Gomez, E., & Martinez, F. (2014). Using the delaunay triangulation and Voronoi diagrams for navigation in observable environments. Revista Tecnura, Edición especial, 81-87.

**Fecha de recepción:** 31 de marzo de 2013, **Fecha de aceptación:** 16 de mayo de 2014

#### Abstract

The navigation system of mobile robot should have the capability of environment cognition, action decision, motion control, and state monitoring. This paper proposes a prediction algorithm route based on Voronoi diagrams, applicable for mobile robots with range sensors operating in indoor and unknown environments. The proposed control law is a hybrid navigation strategy composed of Voronoi diagrams and Delaunay triangulation, which is used to avoid the routes that may eventually block the advance of the robot. An efficient implementation of the control law is presented. Simulation results validate the efficacy of the proposed modified control law.

**Key words:** Autonomous robots, obstacle avoidance, robot navigation, Voronoi diagrams.

#### Resumen

El sistema de navegación de un robot móvil debe tener la capacidad de reconocer su medio, la acción de decisión, el control de movimiento, y la supervisión de sus variables de estado. En este artículo se propone un algoritmo de predicción de ruta basado en los diagramas de Voronoi, aplicable a robots móviles con sensores de rango que operan en ambientes interiores y desconocidos. La ley de control propuesta es una estrategia de navegación híbrida compuesta por los diagramas de Voronoi y la triangulación de Delaunay, que se utiliza para evitar las rutas que pueden llegar a bloquear el avance del robot. Se presenta una aplicación eficaz de la ley de control. Los resultados por simulación validan la eficacia de la ley de control propuesta.

**Palabras clave:** Diagramas de Voronoi, evasión de obstáculos, navegación robótica, robots autónomos.

\* Ingeniero en Control Electrónico e Instrumentación, magíster en Ingeniería Electrónica y de Computador. Docente, Universidad Distrital Francisco José de caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: [fmartinezs@udistrital.edu.co](mailto:fmartinezs@udistrital.edu.co)

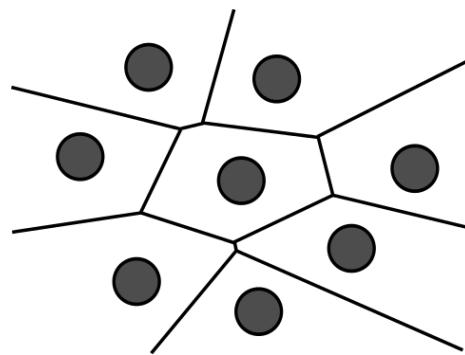
\*\* Ingeniero Electricista, especialista en Gestión de Proyectos de Ingeniería, candidato a doctor en Ingeniería. Docente, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: [fhmartinezs@udistrital.edu.co](mailto:fhmartinezs@udistrital.edu.co)

\*\*\* Ingeniero en Control Electrónico e Instrumentación, magíster (C) en Ciencias de la Información y Comunicaciones. Docente, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: [ejacintog@udistrital.edu.co](mailto:ejacintog@udistrital.edu.co)

## INTRODUCTION

The route planning strategies for autonomous mobile robots have been fairly treated in many references (LaValle, 2006; Zhang *et al.*, 2007; Afzulpurkar & Thanh, 2008; Mannadiar, 2010; Bobadilla *et al.*, 2012). We seek to avoid obstacles using global strategies: the first and most used ones are artificial potential fields (Guanghui *et al.*, 2012; Bin-qiang *et al.*, 2011) or algorithms specifically purely geometric triangulation (Kallmann, 2005; Xu *et al.*, 2009; Demyen & Buro, 2006) and many other cell-based geometry such as Voronoi diagrams (Dong *et al.*, 2010; Shao & Lee, 2010), as well as the Delaunay method (Hongyang *et al.*, 2008) that is also interesting. Each one of the above methods have their own difficulties and require specific criteria, such as the method based on artificial potential fields that suggests the challenge of local minima, while triangulation algorithms have problems in the decision and prediction less than the possible routes, and in some cases the algorithms to choose the best route are necessary as Dijkstra's (Dong *et al.*, 2010). In this research, these techniques and some taken from image processing are applied, some of these navigation strategies have been studied by the research group to check its performance and behavior; in the near future comparisons will be made with each of them, in this specific job we choose a combination of Voronoi diagrams with the use of the Delaunay triangulation, implementation and simulation.

Voronoi diagrams are part of the most significant route planning structures in computational geometry. These diagrams basically start from the comparison between elements near in a plan (Okabe *et al.*, 2000). In this method is essential to consider the route as far as possible of the obstacles. So in a 2-dimensional space, all points that are equidistant from two barriers are considered part of the Voronoi diagram (figure 1).



**Figure 1.** Voronoi diagram, cell division stage (Dong *et al.*, 2010).

The Voronoi diagram is denoted as a set of points  $P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$  in the plan, or in any  $m$ -dimensional space. In this set a particular classification is done, which consists in verify the Euclidean distance of each point regarding to the other points, calculating the distance  $d(p, q)$ , distance defined as shown in equation (1):

$$d(p, q) = \sqrt{(p_x - q_x)^2 + (p_y - q_y)^2} \quad (1)$$

Furthermore, it is defined  $V(p_i)$  as the Voronoi cell for  $p_i$ , which becomes the set of  $q$  points in the plan which are closer to  $p_i$  than any other element. Therefore, the Voronoi cell of  $p_i$  is defined as shown in equation (2):

$$V(p_i) = \{q \mid p_i q \leq p_j q, \forall j \neq i\} \quad (2)$$

This defines the Euclidean distance between  $p$  and  $q$ . Finally, it is defined the Voronoi diagram of  $P$ , called  $Vor(P)$ , as the plan which has been divided into  $n$  Voronoi cells  $V(p_i)$ , one for each point in  $P$  (Okabe *et al.*, 2000).

This paper is organized as follows: Section 2 presents the basic concepts of Voronoi diagrams as base navigation algorithm. In Section 3, the steps to implement the algorithm are presented, and in Section 4, the results and simulations with different environments are shown. Section 5, the paper is concluded.

## PROBLEM FORMULATION

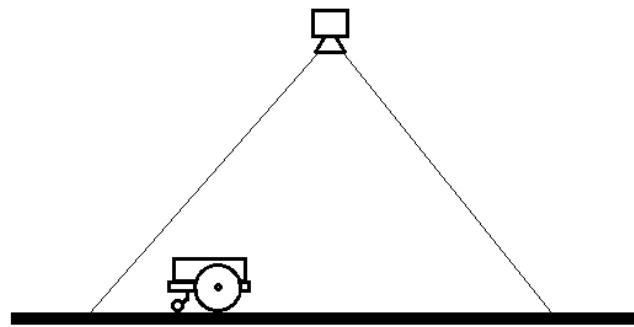
The problem is to discard the use of onboard sensors (on the robot). The use of images to the environment taken with a camera is considered, instead. From these images, the information of the robots and obstacles are extracted; then, this information to implement the routing prediction algorithm is used. Therefore, the central control unit is responsible to calculate the navigation path and to control the movement of the robot, that is always possible to sense and known the environment. This means that the position of the robot and the obstacles in the environment are always known.

Let  $W \subset \mathbf{R}^2$  be the closure of a contractible open set in the plan that has a connected open interior with obstacles that represent inaccessible regions. Let  $\mathcal{O}$  be a set of obstacles, in which each  $O \subset \mathcal{O}$  is closed with a connected piecewise-analytic boundary that is finite in length. Furthermore, the obstacles in  $\mathcal{O}$  are pairwise-disjoint and countably finite in number. Let  $E \subset W$  be the free space in the environment, which is the open subset of  $W$  with the obstacles removed, and the boundary,  $\partial E$ , of  $E$  is the image of a piecewise-analytic closed curve.

The goal is to plan optimal navigation routes through the free space  $E$  using a global algorithm. We also use an internal algorithm to determine the best path; i.e., an algorithm that eliminates local minima, paths that block the movement of the robot, and very long paths.

The path planning should be done by image processing (figure 2). The proposed navigation algorithm (which is supported on Voronoi diagrams) must calculate the optimal route from the navigation information extracted from the images, and with the starting and arrival (or target) points.

An improvement to the design of paths with Voronoi diagrams are proposed, particularly addressing the question of the possible closed paths using Delaunay triangulation as a solution, in addition a recursive algorithm that verifies that the selected path is the shortest of the paths defined by Voronoi is implemented.



**Figure 2.** Camera as environment sensor.

## NAVIGATION ALGORITHM

Voronoi diagrams as paths prediction method have a lower risk of collision for robot navigation within an environment, since it has a projection of free space  $E$  on a one-dimensional curves network. Formally, it is defined as a retraction (Ortega, 2010) with preservation of continuity. If the set  $C_l$  defines the unobstructed positions of an environment, the retraction function  $R_T$  builds a continuous subset  $C_v$  of  $C_l$  (equation (3)) (Ollero, 1995).

$$RT(q): C_l \rightarrow C_v / C_v \subset C_l \quad (3)$$

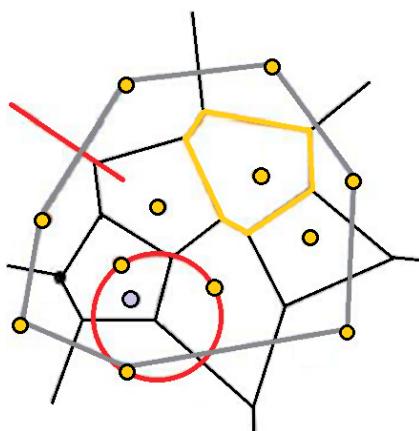
Thus, it is said that there is a path from a starting point  $q_a$  to another end point  $q_f$ , which is free of obstacles, if and only if there is a continuous curve from  $RT(q_a)$  to  $RT(q_f)$ .

### Obstacles represented as points

Considering the obstacles of a map as points (figure 3), the following properties can be defined (Ortega, 2010):

- Two points  $p_i$  and  $p_j$  are neighbors if they share an edge. An edge is the perpendicular bisector of the segment  $pp_j$ .
- A vertex is a point equidistant from three generators (if it is more than three, then degenerate cases are had) and it is the intersection of three edges.

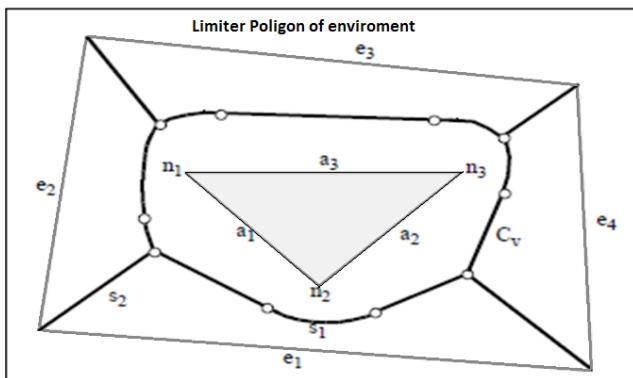
- A Voronoi region is a convex polygon or an unbounded region.
- A Voronoi region is unbounded if its generating point belongs to the convex hull of the point cloud.



**Figure 3.** Voronoi diagram and properties (Ortega, 2010).

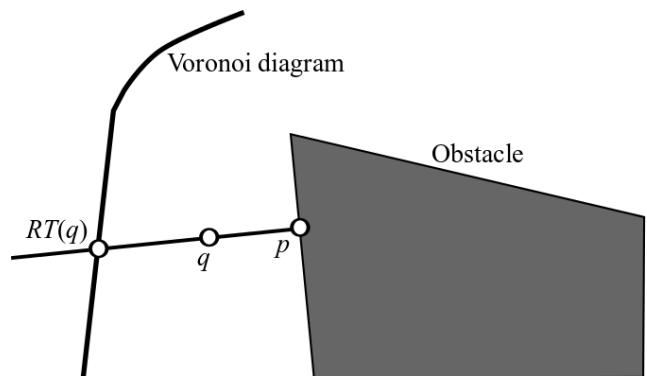
### 3.2 Obstacles represented as polygons

The retraction function  $RT$  definition involves construction of the Voronoi diagram (Rombaut et al., 1991). In order to make more realistic the obstacles representation, and according to the formulation of the problem, the obstacles are interpreted not as points but as polygons. Thus, the Voronoi diagram is formed by two kinds of segments: rectilinear and parabolic.



**Figure 4.** Retraction of free space E on Voronoi diagram (Ollero, 1995).

Figure 4 shows the Voronoi diagram  $C_v$ , and is represented by the demarcated lines. The environment  $W$  is delimited by polygon edges  $\{e_1, e_2, e_3, e_4\}$ , the triangular obstacle vertices  $\{n_1, n_2, n_3\}$  and the triangular obstacle edges  $\{a_1, a_2, a_3\}$ . In the figure two kinds of lines that compose the Voronoi diagram can be seen. The segment  $s_1$  is the locus of equidistant points between the edge  $e_1$ , and the vertex  $n_2$ . Similarly, the rectilinear segment  $s_2$  is defined in the same way, but with regard to the edges  $e_1$  and  $e_2$ . Given a configuration that does not belong to  $C_v$  there is a unique nearest point  $p$  belonging to a vertex or edge of an obstacle  $O$ . The function  $RT(q)$  is defined as the first cut with  $C_v$  of the line linking  $p$  with  $q$  (figure 5) (Ollero, 1995).



**Figure 5.** A configuration  $q$  in the Voronoi diagram (Ollero, 1995).

For path planning, the Voronoi algorithm tries to find the sequence of line segments for connecting  $RT(q_a)$  with  $RT(q_f)$ . The algorithm (Ollero, 1995):

- Calculate the Voronoi diagram.
- Calculate  $RT(q_a)$  and  $RT(q_f)$ .
- Find the sequence of segments  $\{s_1, \dots, s_p\}$  such that  $RT(q)$  belongs to  $s_1$  and  $RT(q_f)$  belongs to  $s_p$ .
- If it finds such a sequence, then it delivers the path. Otherwise it indicates error condition.

## METHODOLOGY AND IMPLEMENTATION OF THE ALGORITHM

Application was performed in MatLab, using some techniques of basic image processing (Cuevas *et al.*, 2010). As a first step, the image is required from a file or from a camera located on the environment. The image is pre-processed and converted to a binary matrix. When having this initial file, the obstacles within the environment are labeled and listed, the position of these obstacles are stored as well as its dimensions. From this moment the central unit has all the information about  $E$  and the boundary  $\partial E$  of  $E$ .

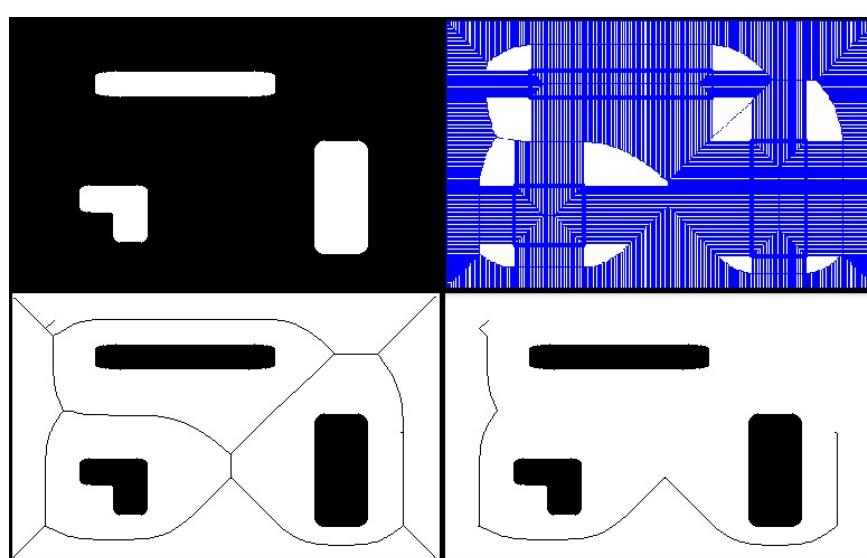
The next step is the construction of the Voronoi diagram. The environment function that calculates the Voronoi cells is applied, this function gives as a result a series of navigation solutions. With the Voronoi diagram, and with the information about the obstacles, the Voronoi diagram the starting and target points are added. Using Euclidean distance, these points are determined on where they are connected.

Finally, the optimal paths for navigation must be determined. The Delaunay triangulation to verify the robot to navigate at a distance  $r$  from obstacles is applied. This distance  $r$  is calculated as the radius of a circle that circumscribes the robot. For the selection of the final path, a recursive method that compares the different routes using the Euclidean distance is applied (figure 6).

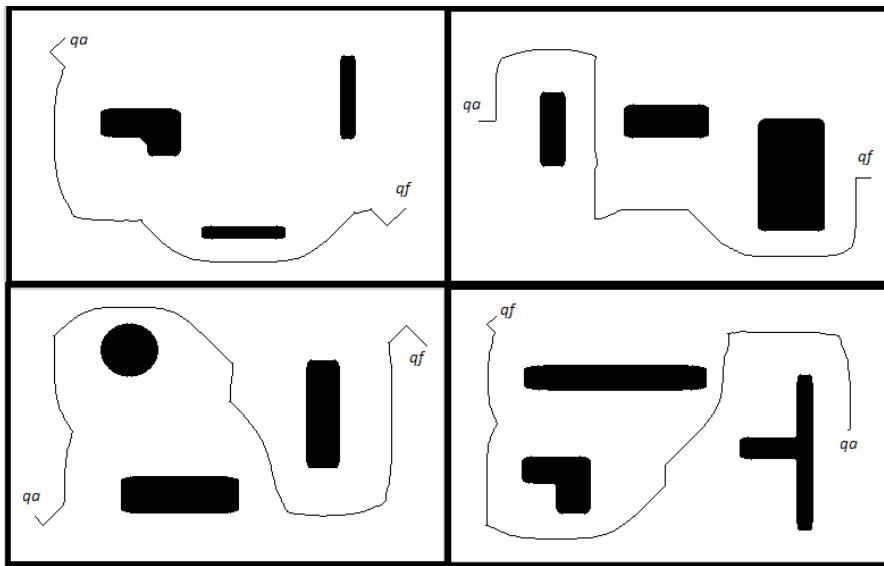
## RESULTS

The algorithm was tested on a total of 20 different lab environments, making a total of 40 trials. In each of these tests, the start and target points were randomly selected. In the algorithm, the robot was taken as a circle of radius  $r = 10.5$  cm according to the geometry of the laboratory robots. The environment used was a rectangle of 7 m high and 5.5 m wide.

Some of the most significant tests are shown in figure 7. In this figure the Voronoi diagram with the path chosen by the algorithm for four different cases is shown.



**Figure 6.** Steps in the proposed algorithm.



**Figure 7.** These are four different environments with the navigational paths calculated by the proposed algorithm.

## CONCLUSIONS

This paper proposes a hybrid scheme for robot navigation combining two geometric navigation strategies. The modification and verification of Voronoi diagrams with the Delaunay triangulation algorithm avoids possible routes impending collisions, and leaves the road ready for implementing an algorithm using a single Euclidean metric. This gives as a general result that the algorithm chooses, in most cases, the obstacle peripheral roads within the scene, eventually shipping lanes are full of obstacles away with smooth curves and a reasonable distance.

This paper presents an implementation of predicting cell routes, which makes the computational cost be low and these results can be easily measured. The measured times with different scenarios are between 1 and 3 s, using an Intel Core i7 with 8 Gigabytes Ram running Windows 7 64 bits and Mat Lab R2011a. This is a time extremely low, but plotted against delivery routes are not the most optimal, often routes are entirely peripheral.

Such algorithms are based on a central unit which makes its implementation easy because it simply performed without using external sensors, only a low-resolution camera and a personal computer with basic characteristics, in this case only scenarios were applied to static, but as future work it could be implemented for dynamic applications.

The performance of the proposed algorithm was verified through several simulations.

## ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the Universidad Distrital Francisco José de Caldas, in part through CIDC, and partly by the Faculty of Technology. The views expressed in this paper are not necessarily endorsed by Universidad Distrital. The authors thank the research groups DIGITI and ARMOS for the evaluation carried out on prototypes of ideas and strategies.

## FINANCIAMIENTO:

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

## REFERENCES

- Afzulpurkar, N. & Thanh, N. T. (2008). Path planning for a mobile robot in a dynamic environment. In IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics ROBIO 2008, 2115-2120.
- Bin-qiang, Y.; Ming-fu, Z. & Yi, W. (2011). Research of path planning method for mobile robot based on artificial potential field. In 2011 International Conference on Multimedia Technology ICMT, 3192-3195.
- Bobadilla, L.; Martínez, F.; Gobst, E.; Gossman, K. & LaValle, S. M. (2012). Controlling wild mobile robots using virtual gates and discrete transitions. In American Control Conference ACC2012, 743-749.
- Cuevas, E.; Zaldívar, D. & Pérez, M. (2010). Procesamiento digital de imágenes con Matlab y Simulink. México: Alfaomega Grupo Editor.
- Demyen, D. & Buro, M. (2006). Efficient triangulation-based pathfinding. In Proceedings of the 21st National Conference on Artificial Intelligence, AAAI American Association for Artificial Intelligence, 942-947.
- Dong, H.; Li, W.; Zhu, J. & Duan, S. (2010). The path planning for mobile robot based on Voronoi diagram. In 2010 3rd International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems ICINIS, 446-449.
- Guanghui, L.; Yamashita, A.; Asama, H. & Tamura, Y. (2012). An efficient improved artificial potential field based regression search method for robot path planning. In 2012 International Conference on Mechatronics and Automation ICMA, 1227-1232.
- Hongyang, Y.; Hufang, W.; Yangzhou, Ch. & Guiping, D. (2008). Path planning based on constrained Delaunay triangulation. In 7Th World Congress on intelligent control and automation 2008, 5168-5173.
- Kallmann, M. (2005). Path planning in triangulations. In Proceedings of the Workshop on Reasoning, Representation, and Learning in Computer Games, International Joint Conference on Artificial Intelligence IJCAI, 49-54.
- LaValle, S. M. (2006). Planning algorithms. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press.
- Mannadiar, R. (2010). Optimal coverage of a known arbitrary environment. In 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA, 5525-5530.
- Okabe, A.; Boots, B.; Sugihara, K. & Chiu, S. N. (2000). Spatial Tessellations: Concepts and Applications of Voronoi Diagrams. England: John Wiley & Sons, Ltd.
- Ollero, A. (1995). Planificación de trayectorias para Robots Móviles. España: Universidad de Málaga.
- Ortega, L. (2010). El Diagrama de Voronoi. España: Universidad de Jaen.
- Rombaut, M.; Segovia, A.; Mezil, D. & Preciado, A. (1991). Displacements of a mobile robot in a known environment. In IMACS-IFAC Symposium MCTS.
- Shao, M. & Lee, J. Y. (2010). Development of autonomous navigation method for nonholonomic mobile robots based on the generalized Voronoi diagram. In 2010 International Conference on Control Automation and Systems ICCAS, 309-313.
- Zhang, L.; Kim, Y. J. & Manocha, D. (2007). A hybrid approach for complete motion planning. In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS 2007, 7-14.
- Xu, D.; Zhang, F. & Yao, Y. (2009). Constructing visibility graph and planning optimal path for inspection of 2D workspace. In IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems ICIS 2009, 693-698.







## Identificación de lesiones cerebrales de esclerosis múltiple en imágenes de resonancia magnética mediante análisis de textura

### Identification of multiple sclerosis brain lesions in magnetic resonance imaging using texture analysis

César Augusto Aldana Ramírez\*, Nelson Fabián Orozco Higuera\*\*, Samuel Barreto Melo\*\*\*

Citation / Para citar este artículo: Aldana Ramírez, C. A., Orozco Higuera, N. F., & Barreto Melo, S. (2014). Identificación de lesiones cerebrales de esclerosis múltiple en imágenes de resonancia magnética mediante análisis de textura. Revista *Tecnura*, Edición especial, 89-101.

**Fecha de recepción:** 27 de julio de 2013, **Fecha de aceptación:** 16 de mayo de 2014

#### Resumen

La esclerosis múltiple (EM) es una enfermedad neurodegenerativa que ataca al sistema nervioso central (SNC), produce lesiones desmielinizantes y causa secuelas funcionales en adultos jóvenes, especialmente mujeres. Su diagnóstico y seguimiento se realizan a través de la resonancia magnética. En la actualidad, el análisis de texturas se ha convertido en una herramienta útil para la detección de este tipo lesiones. Por tal razón, en este artículo se busca identificar lesiones de EM utilizando los métodos de matrices de co-ocurrencia de nivel de gris y transformada wavelet (TW), y como métodos de clasificación redes neuronales (ANN) y máquinas de soporte vectorial (SVM) en imágenes de resonancia magnética (RMI) en secuencia FLAIR de 5 pacientes con diagnóstico de la enfermedad. La combinación apropiada de medidas de matrices de co-ocurrencia y wavelets permitieron obtener precisiones superiores a 96% para las máquinas de soporte vectorial y 90% para las redes neuronales, lo que demuestra

que el uso combinado de dichas medidas es superior en la detección de estas lesiones.

**Palabras clave:** análisis de textura, esclerosis múltiple, máquinas de soporte vectorial, redes neuronales, transformada wavelet.

#### Abstract

Multiple sclerosis (MS) is a neurodegenerative disease that attacks central nervous system, produces demyelinating lesions and causes functional consequences in young adults, especially women. MS diagnosis and monitoring are carried out using magnetic resonance imaging. Currently, texture analysis has become a useful tool for detecting this kind of lesions. That's why this paper aims to identify MS lesions using gray level co-occurrence matrix and wavelet transform, and artificial neural networks and support vector machine are used as classification methods in FLAIR sequence magnetic resonance images from 5 patients with MS diagnosis. Appropriate combination of co-occurrence matrix and

\* Ingeniero biomédico. Especialista en bioingeniería. Bogotá, Colombia. Contacto: cealdana@uan.edu.co

\*\* Médico cirujano. Especialista en bioingeniería. Bogotá, Colombia. Contacto: nelfanor@yahoo.com

\*\*\* Matemático; magíster en docencia de la matemática, magíster en teleinformática. Docente, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: sbarreto@udistrital.edu.co

wavelets allowed obtaining high precisions above 96% for support vector machine and 90% for artificial neural network, showing the superiority of joining that measurements to detect MS lesions.

**Key words:** texture analysis, multiple sclerosis, neural networks, support vector machines, wavelet transforms.

## INTRODUCCIÓN

La esclerosis múltiple (EM) es una enfermedad crónica, neurodegenerativa, que lleva a desmielinización del SNC en múltiples áreas (Zhang *et al.*, 2008). Su manifestación clínica es variable; usualmente inicia con un curso remitente recurrente en el que los pacientes presentan “ataques” caracterizados por disfunciones locales y transitorias del SNC, tales como entumecimiento o debilidad de una extremidad, incoordinación, vértigo o disfunción visual (García-Lorenzo, 2013) y puede occasionar discapacidad física y cognitiva desde un grado leve hasta un grado severo de total incapacidad (según la evolución de la enfermedad).

Esta enfermedad es más común en mujeres, su incidencia es baja en la niñez y se incrementa rápidamente después de los 18 años de edad, tiene un pico entre los 25 y 35 años y decae lentamente, convirtiéndose en una enfermedad rara después de los 50 años. Se estima que en el mundo existen entre 1.3 y 2.5 millones de casos, de los cuales aproximadamente 350.000 se presentan en Europa Occidental. De acuerdo con investigaciones publicadas en el año 2007, la incidencia y prevalencia de la enfermedad se ha incrementado a nivel mundial en los últimos años. Colombia es considerada una zona de baja incidencia (1.48 a 4.98 casos por cada 100.000 habitantes); sin embargo, la potencial discapacidad de pacientes en edad productiva hace que los estudios relacionados con la EM tengan gran relevancia (Pradilla, 2007).

En la actualidad el diagnóstico de la EM se fundamenta en el hallazgo de lesiones de la sustancia blanca que se diseminan a través del espacio y del tiempo, basado en criterios clínicos, radiológicos y de laboratorio. En 85% de los casos la enfermedad se inicia en forma remitente-recurrente,

con síntomas localizados en el cerebro, nervio óptico o médula espinal. La técnica más utilizada para el diagnóstico y seguimiento de la enfermedad es la RM, dadas sus características de resolución espacial, específicamente en secuencias T2 y la secuencia en inversión-recuperación de fluido atenuado (FLAIR, por sus siglas en inglés), en las que las lesiones de EM se observan como áreas discretas con incremento de la intensidad, lo que permite hacer una identificación más eficaz en comparación con otras técnicas empleadas (Boudraa, 2000).

Considerando el creciente número de casos reportados a nivel mundial, la escasez de profesionales entrenados con las habilidades de determinar los casos de EM y la variabilidad de la aparición de las lesiones, se implementan como estrategias de apoyo para el diagnóstico, herramientas informáticas que permitan la identificación de lesiones de EM a través de métodos cuantitativos y con alta precisión, buscando minimizar la subjetividad de conceptos diagnósticos. Esto ha generado que la búsqueda de métodos computacionales haya llegado a ser un campo de investigación activo en los últimos años (Lladó *et al.*, 2012).

Entre los métodos más prometedores, por su poder de discriminación en lesiones tempranas y su costo computacional, se encuentra el análisis de texturas, el cual ha sido ampliamente aplicado en imágenes médicas (Zhang, 2008, Boudraa *et al.*, 2000, Lladó *et al.*, 2012, Filipuzzi *et al.*, 2012, Yamamoto *et al.*, 2010); ejemplo de ello es la segmentación de estructuras anatómicas, diagnóstico de distrofia en músculo esquelético, diferenciación de tejido sano y patológico en el cerebro humano, clasificación de lesiones de cérvix (Castellano *et al.*, 2004), mediciones de textura en imágenes de ecocardiografía para diagnóstico asistido de

cardiomiopatías, clasificación de tejidos normales en imágenes tomográficas (Dettori *et al.*, 2012). En EM, los trabajos están enfocados en segmentación semiautomática (Ghazel *et al.*, 2006), la detección temprana de la enfermedad (Zhang *et al.*, 2008), detección y caracterización de lesiones utilizando algoritmos automáticos (Goldberg-Zimring *et al.*, 1998) y análisis de texturas para tumores intracraneales (Herlidou-Meme *et al.*, 2003).

La textura es una propiedad inherente a todas las superficies y provee un vocabulario para describir las variaciones en la intensidad de la superficie, incluyendo algunas que no son perceptibles por el sistema visual humano (de ahí la importancia en la detección de lesiones de EM, especialmente en lesiones tempranas) (Zhang *et al.*, 2008). Aunque no existe una definición formal de textura, intuitivamente se puede asociar a algunas propiedades de la imagen como suavidad, rugosidad, regularidad y profundidad de campo. La textura de una imagen puede definirse como un descriptor de la variación local de brillo de píxel a píxel, en una vecindad o si se quiere, un atributo que representa la distribución de los niveles de gris de los píxeles en una determinada región (Bharati, 2004). Los métodos usados en el procesamiento de imágenes para describir la textura de una región son: estructurales, estadísticos y espectrales. Las técnicas estructurales tratan de la composición de primitives de imágenes (descripción de texturas basadas en líneas paralelas regularmente espaciadas). Las técnicas estadísticas proporcionan características de texturas como suavidad, rugosidad, granulosidad y otras similares, y las técnicas espectrales se utilizan principalmente para detectar la periodicidad global de la imagen mediante la identificación de picos de alta energía del espectro (González, Woods, 2002).

Este trabajo se realiza con el propósito de identificar cambios patológicos que indiquen lesiones de esclerosis múltiple en imágenes cerebrales de resonancia magnética, utilizando los métodos de matriz de co-ocurrencia y transformada wavelet para el análisis de textura. El artículo está

organizado como sigue: la sección 2 aborda la metodología empleada, la 3 los resultados obtenidos y su análisis, 4 las conclusiones y los trabajos futuros, 5 los agradecimientos y finalmente 6, las referencias bibliográficas.

## METODOLOGÍA

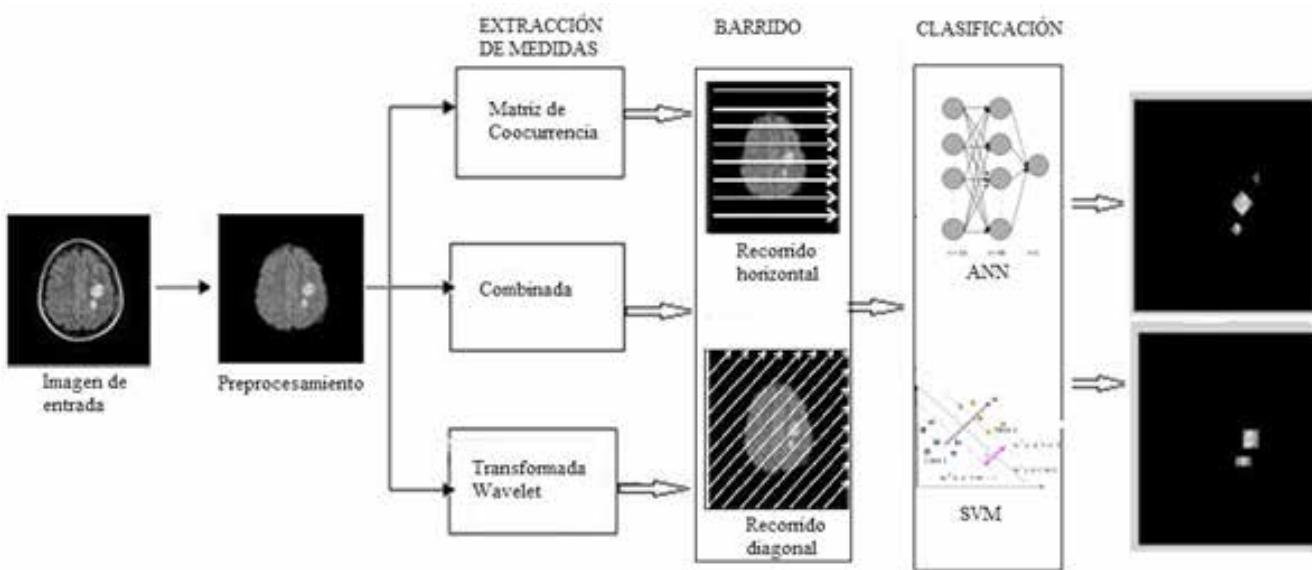
### Base de datos

Para el desarrollo del trabajo fueron suministradas 100 imágenes de RM provenientes de 5 pacientes (20 imágenes por cada uno) con diagnóstico previo de EM, en formato DICOM, de 600 x 600 píxeles. Las imágenes se adquirieron con un resonador Phillips de 1.5 T, con TR 8000 ms y TE 125 ms en secuencia FLAIR. Finalmente, se utilizaron 55 imágenes (11 por paciente), debido a que en estas se presentaron el mayor número de lesiones. Todas las imágenes fueron suministradas por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de San Juan, Argentina, y la Fundación Escuela de Medicina Nuclear (FUESMEN) (Filipuzzi *et al.*, 2012).

En la figura 1 se muestra el diagrama que resume el proceso aplicado a cada imagen, para identificar el tejido cerebral lesionado. Inicialmente se realizó el preprocesamiento que se describe en el numeral 2.2, posteriormente se procedió a la extracción de medidas provenientes de las matrices de coocurrencia de nivel de gris y transformada wavelet. El análisis se llevó a cabo mediante dos recorridos, *denominados horizontal y diagonal*. Finalmente, para la clasificación se utilizaron 2 métodos: redes neuronales (NNA) y máquinas de soporte vectorial (SVM).

### Preprocesamiento

Para eliminar componentes de hueso del cráneo, se marcaron los bordes de las imágenes con color rojo utilizando un editor de gráficos y se rellenan las regiones internas para obtener máscaras binarias que se aplicaron a las imágenes, como lo describe Gómez (2000).



**Figura 1.** Resumen de la metodología aplicada.

**Fuente:** Elaboración de los autores.

## Procesamiento

Para la identificación de las lesiones de EM en tejido cerebral se utilizaron matrices de coocurrencia y transformada wavelet para la obtención de medidas con clasificadores basados en NNA y SVM, los cuales se mencionan a continuación.

### Matrices de coocurrencia de nivel de gris

Se aplicó el método de matrices de coocurrencia de niveles de gris, las cuales se construyen considerando la relación entre pares de píxeles y tabulando la frecuencia de varias combinaciones de niveles de gris dentro de una imagen o una región de interés (Kassner et al., 2010).

Dada una imagen  $f(x,y)$ , con un grupo de niveles de gris  $-Ng$ , la matriz  $h_{d,\theta}(i,j)$  se define como la entrada tal que  $(i,j)$  es igual al número de veces que  $f(x_1,y_1)=i$  y  $f(x_2,y_2)=j$  donde  $(x_2,y_2)$  es la suma de  $(x_1,y_1)$  y  $(d \cos \theta, d \sin \theta)$ . De esta manera, una matriz de coocurrencia de nivel de gris se computa para una distancia  $d = 1, \dots, n$  píxeles en cada dirección  $\theta = 0, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{4}$ . Catorce características de textura pueden obtenerse para matrices

de coocurrencia de nivel de gris en 2D para cada combinación de  $d$  y  $\theta$  (Haralick et al., 1973).

Posteriormente se seleccionó un subconjunto de características debido a que hasta un pequeño grupo de  $3d$  y  $4\theta$  puede producir muchas más características de textura que las convenientes para el número de casos positivos que serán sometidas a clasificación. Por ello, si el número de características no se reduce antes de la clasificación, el modelo estadístico reflejará más ruido o error aleatorio que los datos (Kassner et al., 2010). Para este caso, se construyeron 4 matrices de coocurrencia de nivel de gris para regiones establecidas en  $25 \times 25$  píxeles de cada imagen en las 4 direcciones principales y  $d = 1$ . Dichas características se describen formalmente en las ecuaciones (1-4):

$$f_1 = \sum_i \sum_j \{p(i,j)\}^2 \quad (1)$$

$$f_2 = \sum_{n=0}^{Ng-1} n^2 \left\{ \sum_{i=1}^{Ng} \sum_{j=1}^{Ng} p(i,j) \right\}, |i-j| = n \quad (2)$$

$$f_3 = \frac{\sum_i \sum_j (i, j)p(i, j) - \mu_x \mu_y}{\sigma_x \sigma_y} \quad (3)$$

$$f_4 = -\sum_i \sum_j p(i, j) \log(p(i, j)) \quad (4)$$

### Wavelet

La transformada wavelet se basa en pequeñas ondas de frecuencia variable y duración limitada, con lo que se revela la información frecuencial de una imagen y la información temporal, en contraste con la transformada de Fourier que provee solo información frecuencial y pierde la información temporal en el proceso de transformación (González et al., 2002; Barreto, 2004; Barreto et al., 2012).

En 2 dimensiones, se requiere una función de escalado  $\varphi(x, y)$  y las tres funciones wavelets de la ecuación (5).

$$\psi^H(x, y), \psi^V(x, y), \psi^D(x, y) \quad (5)$$

Cada una es el producto de una función de escalado unidimensional y la correspondiente wavelet  $\psi$  (González et al., 2002). Excluyendo los productos que proporcionan resultados unidimensionales como  $\varphi(x)\psi(x)$  los productos dan como resultado la función de escalado separable de la ecuación (6).

$$\varphi(x, y) = \varphi(x)\varphi(y) \quad (6)$$

Y las wavelet "direccionalmente sensibles" de las ecuaciones (7-9).

$$\psi^H(x, y) = \psi(x)\varphi(y) \quad (7)$$

$$\psi^V(x, y) = \varphi(x)\psi(y) \quad (8)$$

$$\psi^D(x, y) = \psi(x)\psi(y) \quad (9)$$

Estas wavelets miden variaciones de las intensidades de los niveles de gris a lo largo de diferentes direcciones (González et al., 2002). El valor

de energía de estos coeficientes son los utilizados para la clasificación de las lesiones de EM. Para el trabajo actual, se realizaron pruebas sobre las familias de wavelets: Haar, Daubechies 6, Daubechies 9 y Coiflet 3. Finalmente, se eligió la wavelet de Haar, por su longitud y los resultados obtenidos en pruebas iniciales.

### Clasificación

Luego de obtener las medidas anteriormente mencionadas, se procedió a realizar la clasificación a partir de dos sistemas: NNA y SVM.

#### Redes neuronales

Una NNA es un sistema de procesadores paralelos conectados entre sí en forma dirigida. Cada elemento de procesamiento (neuronas) se representa como un nodo, que establece una estructura jerárquica y tratando de emular la fisiología del cerebro busca nuevos modelos de procesamiento para solucionar problemas concretos. Existen variaciones de topologías, que se clasifican según criterios de número de niveles o capas, número de neuronas por nivel y formas de conexión. (Serrano et al., 2009).

En este trabajo se utilizaron redes neuronales *feed forward* de 3 capas, conformadas por: 16, 48 y 1 neuronas, respectivamente, para el caso de medidas de matrices de coocurrencia; 4, 48 y 1 para medidas obtenidas a partir de wavelets y 20, 48 y 1 para medidas combinadas. Se efectuó el entrenamiento con grupos de 10 segmentos reconocidos como lesión y otros 10 reconocidos como tejido sano pertenecientes a los cortes de los 3 primeros pacientes, mediante el método *Conjugate Gradient with Polak-Ribiere Restarts*. Los cortes de los dos pacientes restantes se utilizaron para la validación.

#### Máquinas de soporte vectorial

Una SVM se fundamenta en la minimización del riesgo estructural (SRM) (Labrador, 2009), planteando el uso de hiperplanos como elementos discriminadores lineales, para separar las clases dadas

con el mayor margen posible  $m$ , fijado un parámetro  $\gamma$ , al cual se le asocia un error de clasificación  $\sigma$ , como se muestra en la figura 2.

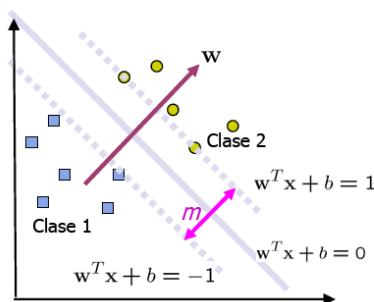
Maximizar el margen  $m$  es un problema de programación cuadrática y puede resolverse introduciendo multiplicadores de Lagrange. Sin ningún conocimiento del mapeo, la SVM encuentra el hiperplano óptimo utilizando el producto punto con funciones en el espacio de características llamadas kernels, los cuales pueden ser lineales, polinomial de grado  $d$ , cuadrático, con base radial gaussiano o de perceptrón multicapa y se encuentran disponibles en Matlab. La solución del hiperplano óptimo puede escribirse como la combinación de unos pocos puntos de entrada denominados vectores de soporte (Betancourt, 2005).

Se utiliza una SVM para clasificación considerando el caso como linealmente separable, es decir, se puede utilizar como frontera de decisión el hiperplano  $h(x_i)$  de la ecuación (10).

$$h(x) = w^T x + b = 0 \quad (10)$$

Donde  $w$  y  $x \in \mathbb{R}^d$ , siendo  $d$  la dimensión del espacio de entrada.

En un conjunto de puntos rotulados para entrenamiento (figura 2) con coordenadas  $(y_1, x_1), \dots, (y_i, x_i)$ , cada punto de entrenamiento  $x_i \in \mathbb{R}^n$  pertenece a una de las dos clases (lesión o no lesión), a la que se le ha dado una etiqueta  $y_i \in \{-1, 1\}$  para  $i = 1, 2, \dots, l$ .



**Figura 2.** Principio máquina soporte vectorial. G. Betancourt, Las máquinas de soporte vectorial, *Scientia et Technica*, año XI, No. 27, abril 2005.

Se cumplirá, según el lado en el que se encuentre el hiperplano definido en las ecuaciones (11-12).

$$w^T x + b > 0, \text{ para } y_i = 1, i = 1, \dots, n \quad (11)$$

$$w^T x + b < 0, \text{ para } y_i = -1, i = 1, \dots, n \quad (12)$$

Para resolver el problema, se considera que los vectores de soporte cumplen con las condiciones de las ecuaciones (13-14).

$$h(x_i) = 1, \text{ para } y_i = 1, \quad (13)$$

$$h(x_i) = -1, \text{ para } y_i = -1, \quad (14)$$

Para este caso linealmente separable se puede encontrar un único hiperplano óptimo, para el cual el margen de proyecciones de los puntos de entrenamiento  $x$  de las dos clases (lesión y no lesión) es maximizado (Betancourt, 2005). En este trabajo se utilizó una máquina de soporte vectorial con kernel lineal y 3 vectores de soporte.

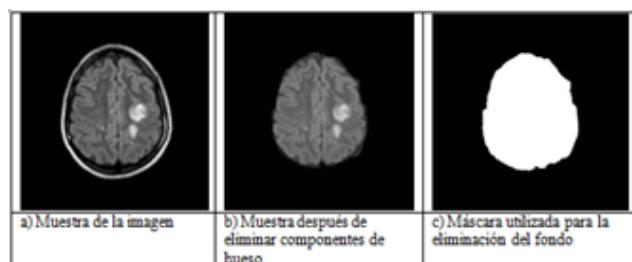
Finalmente, para evaluar el desempeño del sistema con análisis de texturas, transformada wavelet y clasificación con NNA y SVM, se calculó la precisión ( $P$ ) comparando los segmentos de salida del clasificador identificados como lesión y no lesión de la imagen con base en las lesiones marcadas originalmente de los registros de las imágenes adquiridas, a partir de la ecuación (15).

$$P = \frac{VP + VN}{VP + FP + VN + FN} \cdot 100\% \quad (15)$$

Donde VP, verdaderos positivos, VN verdaderos negativos, FP falsos positivos y FN falsos negativos.

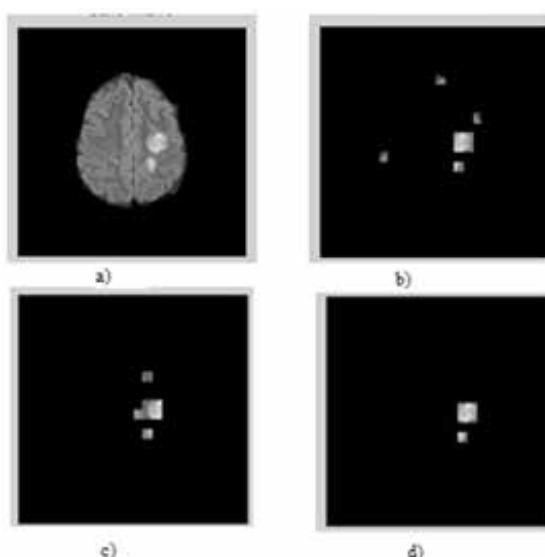
## RESULTADOS Y ANÁLISIS

La figura 3 muestra el resultado del preprocesamiento. Mediante la utilización de la máscara observada en c) se elimina el hueso de la cavidad craneana y el espacio meníngeo, conservando el tejido cerebral para aplicar el análisis de textura y la clasificación.



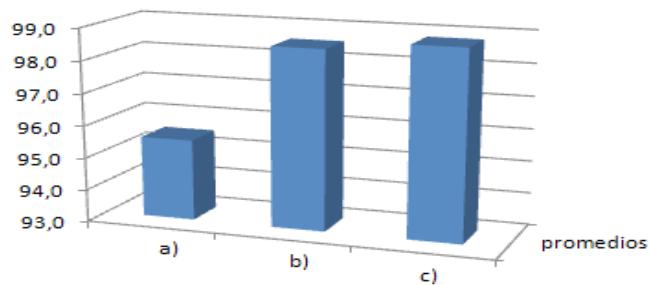
**Figura 3.** Proceso de eliminación de hueso.

**Fuente:** Elaboración de los autores.



**Figura 4.** Resultado recorrido horizontal al aplicar ANN a) imagen original, b) tejido lesionado identificado con matrices de coocurrencia, c) tejido lesionado identificado con wavelets, d) tejido lesionado identificado con medidas combinadas.

**Fuente:** Elaboración de los autores.

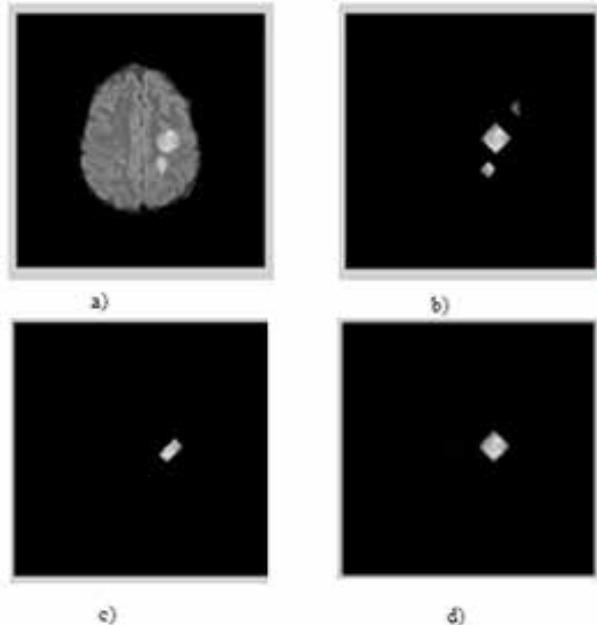


**Figura 5.** Promedios con redes neuronales en recorrido directo para Caso a) matrices de coocurrencia, b) wavelets, c) medidas combinadas.

**Fuente:** Elaboración de los autores.

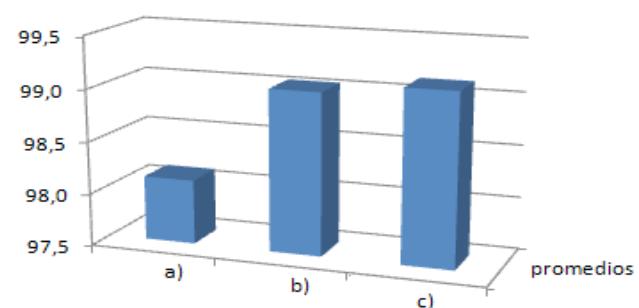
En la figura 4 se presentan los resultados comparativos para la utilización de ANN en recorrido horizontal en una imagen con contenido de lesión en el hemisferio izquierdo del paciente. Se observa que la lesión fue bien definida para las 3 modalidades empleadas; sin embargo, las medidas de matrices de coocurrencia muestran falsos positivos en zonas correspondientes a los bordes del tejido. La figura 5 muestra los promedios de las precisiones obtenidas para las imágenes analizadas en recorrido horizontal utilizando NNA. Se puede observar que la precisión de las medidas combinadas es superior tanto a la aplicación de medidas wavelets como las medidas obtenidas de las matrices de coocurrencia. Estas últimas presentan la menor precisión en el grupo de pacientes.

La figura 6 muestra los resultados utilizando ANN, esta vez en recorrido diagonal. Se aprecia



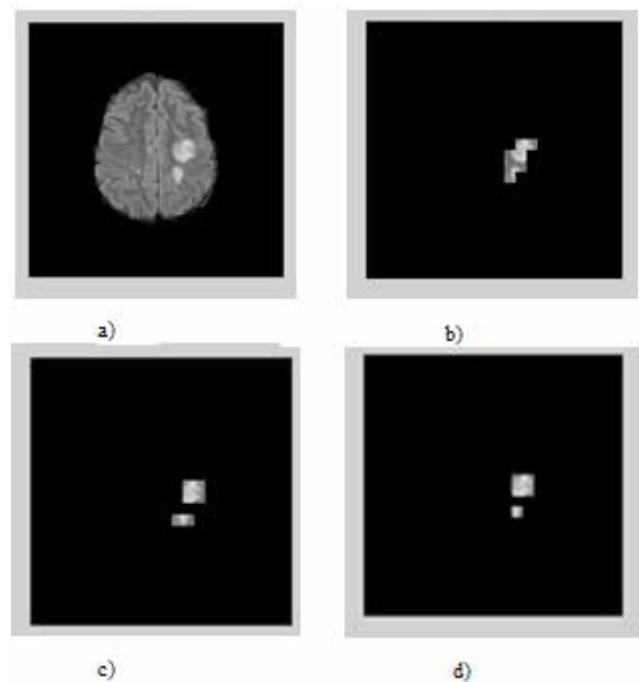
**Figura 6.** Resultado recorrido diagonal al aplicar ANN, a) imagen original; b) tejido lesionado identificado con matrices de coocurrencia; c) tejido lesionado identificado con wavelets; d) tejido lesionado identificado con medidas combinadas.

**Fuente:** Elaboración de los autores.



**Figura 7.** Promedios con ANN en recorrido diagonal para: a) matrices de coocurrencia; b) wavelets; c) medidas combinadas.

**Fuente:** Elaboración de los autores.



**Figura 8.** Resultado recorrido horizontal al aplicar SVM, a) imagen original; b) tejido lesionado identificado con matrices de coocurrencia; c) tejido lesionado identificado con wavelets; d) tejido lesionado identificado con medidas combinadas.

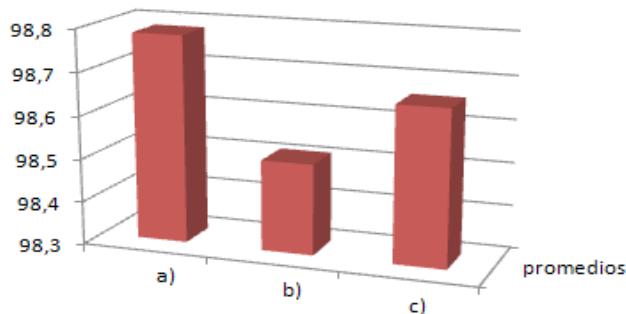
**Fuente:** Elaboración de los autores.

para esta imagen en particular, que los falsos positivos bajaron, aumentando de esta manera la precisión en comparación con el recorrido aplicado para la figura 5. Sin embargo, algunos sectores de la lesión no fueron identificados, especialmente en la aplicación de wavelets.

En la figura 7 se puede observar que la tendencia vista en la figura 5 se mantiene, siendo de nuevo las medidas combinadas superiores en precisión a las medidas individuales. Con relación a los resultados obtenidos mediante el recorrido horizontal, este recorrido aumenta la precisión superando 98% en promedio para cada método empleado.

La figura 8 muestra la localización de las lesiones utilizando SVM en recorrido horizontal. Para este caso, no se observan falsos positivos en los bordes del tejido y la lesión fue identificada por las 3 modalidades.

Los resultados mostrados en la figura 9 indican que el recorrido directo aplicando clasificación con SVM supera los resultados obtenidos con el mismo recorrido aplicando ANN. Es destacable que los porcentajes de precisión de las matrices de coocurrencia y wavelets se encuentran en un rango cercano, lo cual es contrario a lo encontrado en el caso de las ANN, siendo incluso el porcentaje promedio de las matrices de coocurrencia.

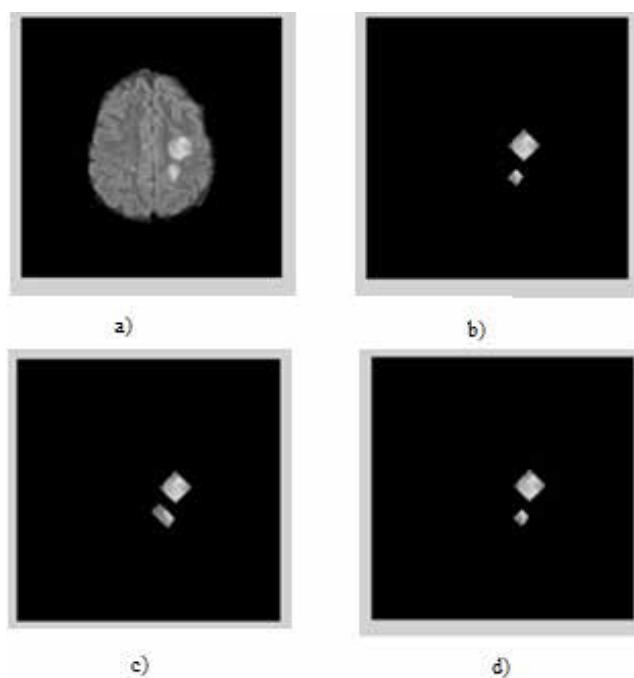


**Figura 9.** Valores promedio de utilización de SVM en recorrido directo para: a) matrices de coocurrencia; b) wavelets; c) medidas combinadas.

**Fuente:** Elaboración de los autores.

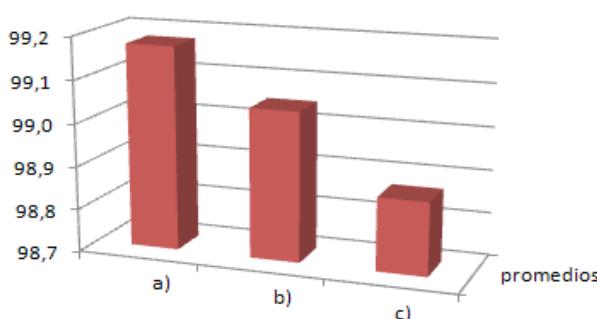
La figura 10 muestra el uso de SVM en recorrido diagonal y como en el caso anterior, no se observan falsos positivos en los bordes de la imagen, además de una buena localización espacial para las lesiones del tejido.

Por su parte, en la figura 11, al igual que en el recorrido horizontal se observa una mayor precisión comparándolo con la aplicación de NNA. La tendencia muestra que las SVM se acoplan mejor a las matrices de coocurrencia que a las medidas de la transformada wavelet, ya que la primera llega a porcentajes superiores a 99% y logra identificación perfecta en múltiples imágenes.



**Figura 10.** Resultado recorrido diagonal al aplicar SVM; a) imagen original; b) tejido lesionado identificado con matrices de coocurrencia; c) tejido lesionado identificado con wavelets; d) tejido lesionado identificado con medidas combinadas.

**Fuente:** Elaboración de los autores.



**Figura 11.** Valores promedio de utilización de SVM en recorrido diagonal para: a) matrices de coocurrencia; b) wavelets; c) medidas combinadas.

**Fuente:** Elaboración de los autores

Al comparar los métodos y procedimientos utilizados en este trabajo para la identificación de lesiones de EM en tejido cerebral, se observó que los recorridos de análisis de las imágenes completas pueden sustituir a los utilizados en estudios previos, en los cuales el procesamiento se realizó sobre regiones de interés (ROI) como el planteado en Zhang et al. (2008) y Loizou (2009), teniendo en cuenta los resultados de precisión superiores a 90% y el desempeño de los algoritmos utilizados al reconocer lesiones de forma, intensidad y tamaño diferentes.

La utilización de un tamaño de ventana de 25 x 25 píxeles resultó conveniente para el análisis de las imágenes, ya que detectó satisfactoriamente la mayoría de las lesiones cerebrales de EM, con excepción de aquellas de tamaños inferiores a 10 x 9 píxeles. Este tamaño de ventana también fue reportado por Louzou (2009) y Louzou (2010) para las ROI, mientras que en Wang et al. (2007) se presentó un análisis de ROI con tamaño de ventanas de 32 x 32; sin embargo, ninguno reveló información sobre el tamaño mínimo detectable de una lesión.

Se corrobora mediante los resultados obtenidos con la transformada wavelet de Haar, que debido a su longitud resultó adecuada en el análisis de este tipo de imágenes que presentan cambios o transiciones repentinas, por las mismas características del tejido cerebral y las lesiones encontradas en

la EM. Tales hallazgos habían sido reportados en Dettori et al. (2007), en donde evaluaron 3 familias (Haar, Daubechies 4 (D4) y Coiflet 6). Es destacable que este trabajo se realizó sobre imágenes tomográficas, con lo que la transformada de Haar aparece como un algoritmo apropiado para la evaluación de lesiones diferentes en varios tipos de imágenes médicas.

La combinación de medidas obtenidas de las matrices de coocurrencia con wavelets fue suficiente para obtener altos porcentajes de diferenciación entre las lesiones de EM y tejido sano (superior a 98% para SVM y 95% para NNA) sin la utilización de medidas de primer orden ni medidas correspondientes a las matrices de *run-length* planteados en Zhang et al. (2008). Asimismo, es indudable que al utilizar SVM como clasificador se obtienen porcentajes de identificación de lesiones superiores a las NNA planteadas con menores tiempos de ejecución. El menor rendimiento de las NNA se presenta en zonas correspondientes a los bordes del tejido, en donde ocurre el mayor número de falsos positivos; sin embargo, su capacidad de detección de segmentos con lesiones no activas o en proceso de formación cuyas intensidades eran más bajas que las lesiones activas, fue considerable.

No se encontraron reportes en la literatura consultada que muestren el uso de recorridos diagonales como herramienta para mejorar la identificación de las lesiones. Es importante mencionar que esta forma de recorrer la imagen ayuda a definir segmentos de lesiones circulares de manera más acertada que el recorrido horizontal.

## CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Es posible identificar lesiones de EM en imágenes cerebrales de RM en secuencia FLAIR y localizarlas espacialmente con precisión superior a 90%, utilizando métodos de análisis de textura. De acuerdo con los resultados de precisión, esta identificación mejora dependiendo del método de análisis y clasificación.

La alta variabilidad en las características de las lesiones como forma, tamaño, intensidad y localización, entre otras, hacen que la tarea de identificación presente dificultades y requiera diferentes opciones de recorrido en su análisis. Por los resultados obtenidos con los recorridos horizontal y diagonal, se observó que el diagonal definió con mayor precisión lesiones de forma circular. Por tanto, sería favorable la implementación de otros recorridos tales como el radial, en abanico o en espiral de la imagen completa, de tal modo que lesiones de menor tamaño y diversas formas sean detectadas. En ese sentido, la utilización de la transformada de Radón, por el tipo de recorrido que realiza, podría minimizar errores de clasificación, particularmente en las regiones de los bordes.

Asimismo, el uso de métodos de segmentación con bancos de filtros en frecuencia o filtros Gabor, por sus características de eliminación de ruido y preservación de orientaciones, serían muy útiles en el análisis de textura, especialmente en etapas de preprocesamiento.

Por otro lado, la utilización de una base diferente a las wavelets, tal como las bandelets, las cuales indican las direcciones locales en las que los niveles de gris tienen variaciones regulares (Le Pennec, Mallat, 2005), lo que sería sensible a las texturas de las lesiones de EM y, por consiguiente, podría mejorar su identificación.

Es indudable que en las tareas de reconocimiento las SVM superan a las redes neuronales en precisión y tiempo de implementación, puesto que estas últimas, de acuerdo con los resultados mostrados, son menos sensibles a los cambios producidos en los bordes de las lesiones que las primeras, convirtiéndolas en una buena elección como método de clasificación.

El costo computacional que se tiene para el análisis de cada imagen de forma completa y no por ROI como se realiza en la mayoría de los trabajos previos, se ve compensado por la disminución en el tiempo de la selección de dichas regiones, que además requiere experiencia en este tipo de imágenes.

Para lograr una optimización de los algoritmos planteados, utilizando los mismos principios, se propone implementar un sistema que discrimine sustancia blanca de apariencia normal (WMNA) (Zhang, 2008), la denominada sustancia blanca de apariencia sucia, la sustancia gris de apariencia normal y la lesión, lo que permitiría evaluar cambios menos evidentes para el sistema visual humano y con ello proporcionar un diagnóstico temprano de la enfermedad.

Es necesario trabajar con pacientes en Colombia, recopilando inicialmente un banco de imágenes médicas (dado que esta base de datos fue facilitada desde Argentina), con lo cual sea posible realizar un seguimiento a los cambios de textura en las lesiones a través del tiempo y, con ello, mejorar la capacidad de clasificación.

Asimismo, un trabajo importante por desarrollar estaría relacionado con la obtención de imágenes de RM con diferentes secuencias, tales como T2 o T1 con medio de contraste, que son las más utilizadas en Colombia para el diagnóstico de EM. Se plantea incluir imágenes de cordón espinal.

Una reconstrucción en 3D de las lesiones permitiría hacer un seguimiento no solo del desarrollo de la lesión a nivel de volumen, sino también una visualización que permita evaluar el comportamiento de dichas lesiones a un tratamiento específico.

En la revisión bibliográfica hecha para el desarrollo del trabajo no se encuentran publicaciones colombianas que aborden el tema del análisis de textura en imágenes diagnósticas para EM, lo que abre un camino para la utilización de los recursos computacionales y de software como herramientas de apoyo al diagnóstico médico, principalmente en casos en donde no se cuente con personal especializado.

## AGRADECIMIENTOS

A la bioingeniera Florencia Rodrigo, de la Universidad Nacional de San Juan, Argentina, por permitir utilizar la base de imágenes de RNM con las que se realizó el proyecto.

Al ingeniero Javier González, docente de la Facultad de Ingeniería Electrónica de la Universidad Santo Tomás, por sus aportes y orientaciones en el desarrollo del trabajo.

## FINANCIAMIENTO

Para la realización de este artículo de investigación no se contó con financiamiento puesto que se efectuó como parte del trabajo de grado de los autores, dentro de la especialización en Bioingeniería de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

## REFERENCIAS

- Barreto, S. (2004). Análisis Comparativo de las Multiwavelets y Wavelets escalares en lo que respecta a los criterios de calidad y Compresión de Imágenes. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Tesis de grado).
- Barreto, S.; E. Betancourt; M. Lesmes (2012). *Transformación de Imágenes a Través del Álgebra Lineal*. Bogotá: Editorial U.D.
- Betancourt, G. (abril 2005). Las máquinas de soporte vectorial. *Scientia et Technica*, año XI, No. 27.
- Bharati, M.; J. Jay Liu, et al. (2004). Image texture analysis: methods and comparisons. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, vol. 72, pp. 57-7.
- Boudraa, Abdel-Ouahab Sidi; Mohammed Réda Dehak; Yue-Min Zhu; Chahin Pachai; Yong-Gang Bao; Jérôme Grimaud. Automated segmentation of multiple sclerosis lesions in multispectral MR imaging using fuzzy clustering. *Computers in Biology and Medicine*, vol. 30, Issue 1, 15 January 2000, pp. 23-40. [http://dx.doi.org/10.1016/S0010-4825\(99\)00019-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0010-4825(99)00019-0)
- Castellano, G.; L. Bonilha; L.M. Li; F. Cendes. Texture analysis of medical images. *Clinical Radiology*, vol. 59, Issue 12, December 2004, pp. 1061-1069. <http://dx.doi.org/10.1016/j.crad.2004.07.008>
- Dettori, Lucia; Lindsay Semler. A comparison of wavelet, ridgelet, and curvelet-based texture classification algorithms in computed tomography. *Computers in Biology and Medicine*, vol. 37, Issue 4, April 2007, pp. 486-498. <http://dx.doi.org/10.1016/j.combiomed.2006.08.002>
- Filipuzzi, M.; R. Rodrigo; E. Laciari, et al. Clasificación automática de lesiones de esclerosis múltiple mediante métodos de conjunto en imágenes de resonancia magnética. Universidad Nacional de San Juan, Facultad de Ingeniería. Gabinete de Tecnología Médica. <http://ofisy.aigroup.com.ar/tric/tric-v/papers>
- García-Lorenzo, D.; S. Francis; S. Narayanan, et al. Review of automatic segmentation methods of multiple sclerosis white matter lesions on conventional magnetic resonance imaging. *Medical Image Analysis*, vol. 17, pp. 1-18, 2013.
- Ghazel, M.; A. Traboulsee; R. Ward. Semi-Automated Segmentation of Multiple Sclerosis Lesions in Brain MRI using Texture Analysis. *IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology*, vol. 6, No. 10, 2006.
- Goldberg-Zimring, D.; A. Achiron; S. Miron, et al. Automated detection and characterization of multiple Sclerosis lesions in brain MR images. *Magnetic resonance imaging*, vol. 16, No. 3, pp. 311-318, 1998.
- Gómez, E. (2000). Caracterización de frutos maduros de café mediante visión artificial. Manizales: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería, 47 pp. (Tesis: ingeniero electrónico).
- González, R.; R. Woods (2002). *Tratamiento Digital de Imágenes*. Delaware: Editorial Wilmington.
- Haralick, R.; K. Shanmugam; I. Dinstein. Textural Features for Image Classification. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, vol. SMC-3, No. 6, pp. 610-621, 1973.
- Herlidou-Même, S.; J.M. Constans; B. Carsin, et al. MRI texture analysis on texture test objects, normal brain and intracranial tumors. *Magnetic Resonance Imaging*, vol. 2, pp. 989-993, 2003.
- Kassner, A.; R.E. Thornhill. Texture Analysis: A Review of Neurologic MR Imaging Applications. *American Journal of Neuroradiology*, vol. 31, No. 5, pp. 809-816, 2010.
- Labrador, P. Reconocimiento de patrones utilizando máquinas de soporte vectorial (SVM). Universidad

- Nacional Abierta, San Cristóbal (Venezuela), 2009 (proyecto de grado).
- Le Pennec, E.; S. Mallat. Sparse Geometric Image Representations With Bandelets. *IEEE transactions on image processing*, vol. 14, No. 4, 2005.
- Lladó, Xavier; Arnau Oliver; Mariano Cabezas; Jordi Freixenet; Joan C. Vilanova; Ana Quiles; Laia Valls; Lluís Ramió-Torrentà; Àlex Rovira. Segmentation of multiple sclerosis lesions in brain MRI: A review of automated approaches. *Information Sciences*, vol. 186, Issue 1, 1 March 2012, pp. 164-185. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ins.2011.10.011>.
- Loizou, C.P. Quantitative Analysis of Brain White Matter Lesions in Multiple Sclerosis Subjects. *9th International Conference on Information Technology and Applications in Biomedicine*. Noviembre 2009.
- Loizou, C.P. Texture Image Analysis of Normal Appearing White Matter Areas in Clinically Isolated Syndrome that Evolved in Demyelinating Lesions in Subsequent MRI scans, *Multiple Sclerosis Disease Evolution*. 2010.
- Pradilla, G.; F. León. Esclerosis múltiple en Colombia: cerrando la brecha. Disponible en: [http://www.acnweb.org/acta/2007\\_23\\_1\\_3.pdf](http://www.acnweb.org/acta/2007_23_1_3.pdf)
- Serrano, A.; E. Soria; J. Martín. Redes neuronales artificiales. Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Curso de Doctorado, pp. 15-19, 2009-2010.
- Wang, L.; N. Li; X. Zhou, et al. Texture Characteristic Analysis of MRI for Exploratory Study on Early Diagnosis of Multiple Sclerosis. *IEEE/ICME International Conference on Complex Medical Engineering*. pp. 652-655, 2007.
- Yamamoto, D.; H. Arimura; S. Kakeda, et al. Computer-aided detection of multiple sclerosis lesions in brain magnetic resonance images: False positive reduction scheme consisted of rule-based, level set method, and support vector machine. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, vol. 34, pp. 404-413, 2010.
- Zhang, J.; L. Wang; L. Tong. Feature "Reduction and Texture Classification in MRI-Texture Analysis of Multiple Sclerosis". *IEEE/ICME International Conference on Complex Medical Engineering*, pp. 752-757, 2007.
- Zhang, J.; L. Tong; L. Wang, et al. Texture analysis of multiple sclerosis: a comparative study. *Magnetic Resonance Imaging*, vol. 26, pp. 1160-1166, 2008.





## Metodología de evaluación de usabilidad de interfaces humano-máquina

### Usability evaluation methodology of human-machine interfaces

Luini Leonardo Hurtado Cortés\*, Jhon Alejandro Forero Casallas\*\*

Citation / Para citar este artículo: Hurtado Cortés, L. L., & Forero Casallas, J. A. (2014). Metodología de evaluación de usabilidad de interfaces humano-máquina. Revista Tecnura, Edición especial, 103-113.

**Fecha de recepción:** 29 de noviembre de 2013 / **Fecha de aceptación:** 11 de julio de 2014

#### RESUMEN

Este artículo presenta la aplicación y validación de una metodología para la evaluación de la usabilidad de interfaces humano-máquina (IHM) en sistemas de supervisión industrial. Inicialmente, se presentan los aspectos fundamentales de evaluación de usabilidad de sistemas basados en software. Luego, se describe la metodología, que utiliza un sistema de adquisición de datos para supervisión y control de procesos (SCADA), un sistema de registro de eventos (EVENT LOGGER), un programa de clasificación de eventos en criterios de usabilidad, y un sistema adaptativo de inferencia neuro-difusa (ANFIS). La metodología fue aplicada a varias interfaces de operador para la monitorización de una planta. Finalmente, para comprobar la validez de la metodología se realizó una prueba de hipótesis frente a otras dos metodologías tradicionales: *inspección* por el experto e *indagación a los usuarios*. Se determinó que la metodología propuesta tiene equivalencia con las otras dos, pero tiene la ventaja de ser completamente automatizada. Los resultados permitirán ser retomados para su aplicación generalizada en el diseño de interfaces humano-máquina en cualquier

sistema tecnológico para mejorar las prestaciones de la evaluación.

**Palabras clave:** Interfaz humano-máquina, sistemas de supervisión, sistemas neuro-difusos, usabilidad.

#### ABSTRACT

This paper presents the implementation and validation of an Usability Evaluation methodology of Human-Machine Interfaces (HMI) in industrial supervision systems. Initially, the basic aspects of Usability Evaluation of software-based systems are presented. Then, the methodology; which uses a Supervisory Control and Data Acquisition system (SCADA), an event log system (EVENT LOGGER), a classification program of events in usability criteria, and an Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) is described. The methodology was applied to various operator interfaces for plant monitoring. Finally, to check the validity of the methodology, a hypothesis test was performed against two other traditional methods: *expert inspection* and *user inquiry*. It was determined that the proposed methodology is equivalent to the other two, but its advantage is being fully automated. The results will be considered

\* Ingeniero mecánico, especialista en automática e informática industrial, magíster en ingeniería-automatización industrial; doctor en ingeniería-automática. Docente, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: llhurtadoc@udistrital.edu.co

\*\* Ingeniero mecánico, especialista en automatización industrial, magíster en ingeniería-automatización industrial. Docente, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: jaforero@udistrital.edu.co

for widespread application in the design of Human-Machine Interfaces in any technological system to improve the performance of the evaluation.

**Keywords:** Human-Machine Interface, Neuro-fuzzy Systems, Supervision Systems, Usability.

## INTRODUCCIÓN

Existen diversas perspectivas teóricas y empíricas que encierra el término usabilidad para sistemas interactivos. Para ello, en primer lugar se referencia desde lo expuesto por el estándar ISO 9241 de 1998, que describe los requisitos ergonómicos para trabajo de oficina con terminales de despliegue visual y explica algunos de los principios básicos subyacentes (ISO 9421, 1998). El estándar define la usabilidad como “la extensión para la que un producto puede ser usado por usuarios específicos, para lograr metas específicas con efectividad, eficacia y satisfacción en un contexto de uso específico”; además plantea aquellos factores que tienen un efecto en la usabilidad de productos software.

Según el estándar de Requisitos y Evaluación de Calidad de Productos de Software o SQuaRE (por sus siglas en inglés), la usabilidad es analizada en términos de su comprensibilidad, aprendizaje, operabilidad, atractividad y complacencia. En este estándar la usabilidad es un atributo de la calidad del software, siendo la calidad del software definida por el estándar como “un conjunto de atributos que se manifiestan por el esfuerzo necesario para el uso y por la valoración individual de tal uso por un conjunto de usuarios involucrados” (ISO 25000, 2005).

Para el caso de productos de software, se plantean teorías que centran los modelos en personas (Norman, 1986)(Wickens, 2012)(Anderson, 2012) y teorías de evaluación de usabilidad de las interfaces (Rodeiro, 2001)(Lorés, 2001)(Dix, 2004).

Por otra parte, se analiza la *evaluación*, la cual consiste en probar algo, tanto para saber si funciona correctamente como si no, si cumple con las expectativas o no, o simplemente para conocer cómo funciona una determinada herramienta

o utensilio; la evaluación de la usabilidad es una actividad que comprende un conjunto de metodologías y técnicas que analizan la usabilidad de un sistema en diferentes etapas del ciclo de vida del software (Granollers, Lóres, & Cañas, 2005). De la misma forma, se debe comprender que es necesario complementar la evaluación desde la perspectiva del usuario utilizando métodos de indagación y desde la perspectiva del experto, utilizando métodos de inspección. Un excelente trabajo de revisión sobre varios aportes al concepto de usabilidad y su evaluación se recoge en (Ankit & Sanjay, 2012), allí, en una de las referencias se plantean diez factores de usabilidad y veintiséis criterios de evaluación (Seffah, Donayaee, Kline, & Padda, 2006), que posteriormente son agrupados y plasmados en una taxonomía (Rios, Vásquez, Mosqueira, & Moret, 2010).

Recientemente se ha hecho evidente la preocupación por la evaluación de la usabilidad y calidad del software de uso industrial. Se han propuesto enfoques mediante el uso de redes neuronales artificiales, que agilizan la evaluación en contextos particulares (Da Ponte & Da Silveira, 2008), dado que existen dificultades a la hora de recoger los datos necesarios para analizar el comportamiento de los usuarios frente a las interfaces. Otros enfoques han sido el desarrollo de taxonomías para facilitar la identificación y recogida de las variables asociadas a los datos de interacción de los usuarios con el software, tales como rutas de navegación y agrupación de caracteres, y determinar así el comportamiento de los usuarios durante la interacción con la interfaz (Hanna, Richards, & Jacobson, 2012). Igualmente, la utilización de la teoría inventiva para la resolución de problemas (TRIZ), que combina reglas del diseño de la interacción, métodos múltiples de evaluación de la usabilidad, recolectores de tendencias de la evolución de la interacción (Filippi & Barattin, 2013), modelos formales de tareas basados en TaMoGolog (Rukh, 2012), la teoría de la actividad (Cao, Lijue, & Shijian, 2013), y otros relacionados con la combinación de teoría del diseño y los sistemas

de información en la interacción humano-computador (Spagnoletti & Tarantino, 2013).

Sin embargo, desde el punto de vista de interfaces para monitorización y supervisión de plantas de procesos, aún son escasos los aportes sobre metodologías de evaluación de usabilidad, debido a la separación existente entre las operaciones automatizadas de los procesos y su interpretación a través de la interfaz para la toma de decisiones por parte del operador. Una aproximación para tal integración es la metodología de modos de marchas y paros o guía GEMMA (Ponsa, Vilanova, & Díaz, 2007) que combina sistemas de eventos discretos DES y actividades humanas; así el operador humano puede cumplir un rol dentro de las acciones de los dispositivos automáticos sobre el proceso. La misma guía se aplica posteriormente sobre un simulador para el entrenamiento de operadores (Ponsa, Amante, & Díaz, Evaluación de la usabilidad para la tarea de supervisión humana en sala de control industrial, 2009). Otra propuesta metodológica involucra nuevas tendencias en supervisión de procesos como aportes preliminares para la construcción de sistemas de supervisión holónicos (ente autónomo y cooperativo) que relacionan aspectos formales (modelos) con aspectos tecnológicos (interfaces de operador) (Zapata, Cardillo, & Chacón, 2011), pero no plantea la manera de evaluar la usabilidad de tal conjunción.

Los enfoques anteriores están orientados a permitir al equipo de desarrollo de software recopilar y analizar automáticamente los usuarios y sus actividades y el comportamiento del sistema para el reconocimiento de problemas de usabilidad y problemas de funcionalidad de interfaces en forma eficiente y eficaz. Como consecuencia, se espera que las interfaces se ajusten mejor a la dinámica de los sistemas socio-técnicos en diferentes niveles (es decir, individual, grupal, organizacional, institucional, etc.), esto no es posible sin la aplicación de métodos que permitan soportar la evaluación. Los métodos de evaluación pueden clasificarse de varias maneras (Granollers, MPIu+a. Una metodología que integra la ingeniería del software, la

interacción persona ordenador y la accesibilidad en el contexto de equipos de desarrollo multidisciplinares, 2004), como se resume en la tabla 1.

En cuanto al lugar de realización, se distinguen dos categorías generales:

- Los que se realizan en el laboratorio. El objetivo del evaluador, a veces, es comprobar aspectos sin que precise ayuda de los usuarios. Este tipo de comprobaciones las realiza, normalmente, en su entorno de trabajo, o sea, en el laboratorio, en donde puede además traer usuarios para un estudio particular.
- Los que se hacen en el entorno natural o habitual del escenario en donde se realizan las tareas por evaluar. Esta situación se produce cuando el evaluador hace su trabajo en el lugar natural en donde se realiza la escena, el lugar de interacción habitual del usuario.

En cuanto al tipo de técnica, se distinguen tres categorías:

- Métodos de inspección: su principal característica es que unos expertos examinan aspectos de la interfaz del sistema relacionados con la usabilidad y la accesibilidad que la misma ofrece a sus usuarios. Estos métodos tienen en cuenta las opiniones, juicios, informes de los inspectores sobre elementos específicos de la interfaz como factor fundamental de la evaluación de la usabilidad. Son populares en el ámbito de las empresas de producción de servicios software, pues permiten identificar, clasificar y contabilizar un gran número de errores potenciales de usabilidad a precio relativamente bajo.
- Métodos de indagación: la información acerca del agrado del usuario, quejas, necesidades e identificación de requisitos, son informaciones indispensables sobre todo en etapas tempranas del proceso de desarrollo para que proporcionen información relacionada con el uso y las posibilidades de acceso de un producto. Este tipo de métodos se realiza hablando con los usuarios, observándolos, usando

el sistema en trabajo real, y obteniendo respuestas a preguntas verbalmente o por escrito.

- **Métodos de prueba:** En estos métodos, los usuarios representativos trabajan en tareas concretas utilizando el sistema (o el prototipo) y los evaluadores utilizan los resultados para ver cómo la interfaz de usuario da soporte a los usuarios con sus tareas.

En cuanto a la automatización, se pueden distinguir entre métodos:

- **Automáticos:** son aquellos métodos que disponen de mecanismos (hardware y/o software) que facilitan la comprobación de los aspectos por validar. Los métodos automáticos resultan altamente eficientes puesto que se realizan muy rápidamente y los resultados provienen de los propios parámetros, sin apreciaciones subjetivas. Una de las características que hacen más atractivos estos métodos es la posibilidad de realizar tests remotamente (Bartek & Cheatham, 2012); (Dray & Siegel, 2004) a través de internet. Su desventaja es que se usan en sistemas ya finalizados y no en etapas tempranas del ciclo de vida del desarrollo.
- **Manuales:** al contrario de los métodos anteriores, no disponen de mecanismos que automatizan su realización. Estos consumen más recursos: tiempo, evaluadores, etc., pero pueden evaluar aspectos que se “salen del patrón” y pueden realizarse en cualquier etapa del desarrollo y con cualquier clase de prototipo.

Según el tipo de participantes en la evaluación, se pueden distinguir los siguientes métodos:

- **Con usuarios y/o implicados:** Son los métodos en los que se evalúa el sistema con la intervención directa de usuarios representativos, pudiendo también participar en las sesiones personas que sin ser usuarios finales tienen la condición de implicados del sistema.
- **Métodos sin usuarios y/o implicados:** Estos métodos los aplican solo expertos evaluadores con

ayuda de guiones, pautas o documentos que permiten hacer un seguimiento de los que han hecho los usuarios mientras utilizaban el sistema.

**Tabla 1.** Clasificación de los métodos de evaluación de la usabilidad.

Clasificación de los métodos de evaluación de usabilidad	
Lugar	Laboratorio
	Entorno real
Técnica	Inspección
	Indagación
Participantes	Prueba
	Con usuarios
	Sin usuarios
Automatización	Automáticos
	Manuales

**Fuente:** Granollers, 2004.

De acuerdo con la anterior clasificación, en este trabajo la evaluación de la usabilidad de la interfaz de supervisión se realizó en un laboratorio, utilizando métodos de inspección por un experto e indagación a los usuarios y se convalidó con el método automático propuesto como se explica a continuación.

## MATERIALES Y MÉTODOS

*A. Lugar de realización:* La metodología se aplicó en dos lugares, una sala de automatización de procesos que funciona como un entorno natural de supervisión de procesos y una sala especialmente equipada para efectuar evaluaciones como un laboratorio de usabilidad.

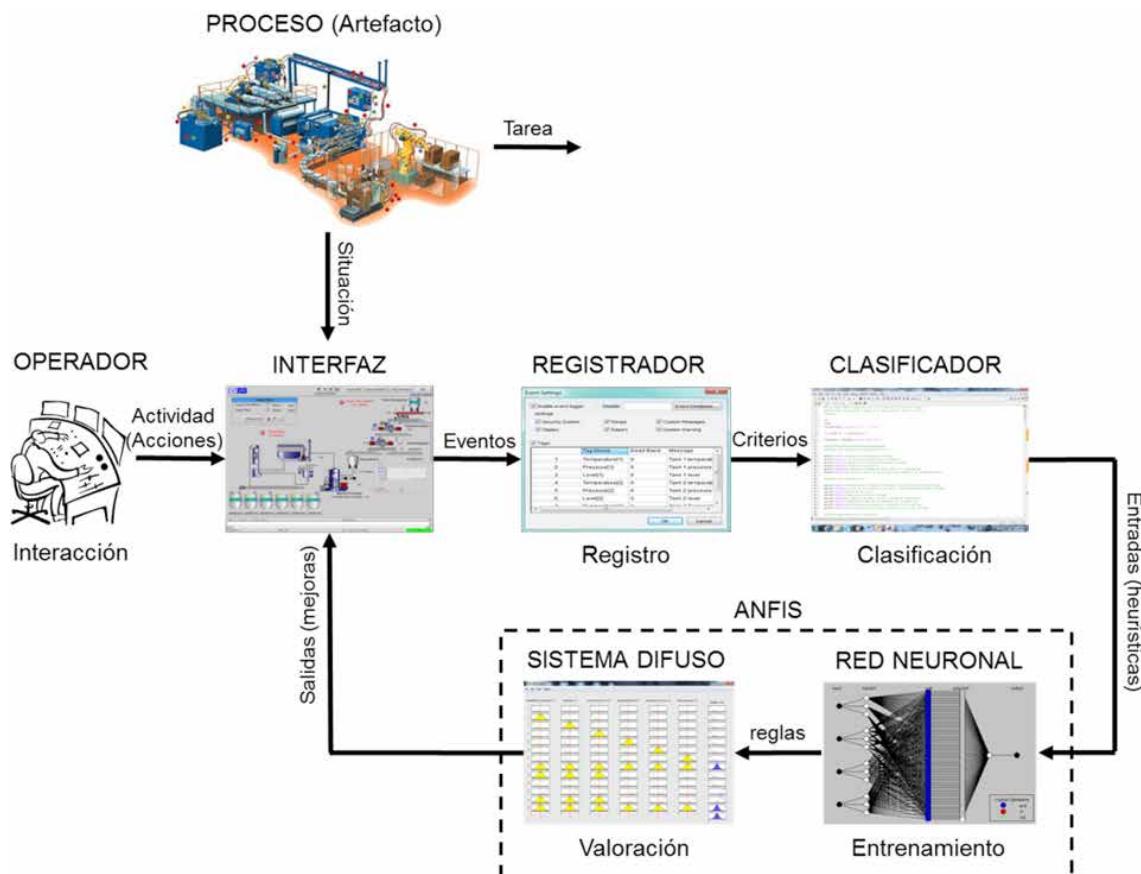
*B. Participantes:* para la evaluación de laboratorio se utilizaron 12 estudiantes distribuidos en tres grupos y para la evaluación en la sala de automatización, se utilizaron 3 operadores de salas de control de proceso. Los estudiantes, de los programas de ingeniería entre 8º. y 10º. semestres tienen competencias en procesos industriales relacionados con fluidomecánica, termotransferencia,

máquinas, modelamiento, control y simulación de procesos industriales y automatización. Los operadores, por su experiencia trabajaron individualmente. El período de experimentación fue una hora. Además del diseño de la metodología, los autores de este trabajo actuaron como facilitadores de la evaluación.

*C. Escenarios:* Para la realización de las pruebas se utilizó un proceso de dosificado de líquidos, en donde es posible generar situaciones de manera programada y controlada; las condiciones del proceso cambian gradualmente, a través de la interfaz de supervisión, el operador debe identificar la situación y sus consecuencias antes de tomar las acciones correctivas necesarias.

*D. Descripción de la metodología:* La metodología de evaluación de Usabilidad de Interfaces Humano-Máquina desarrollada consta de un sistema de adquisición de datos para supervisión y control de procesos para el diseño de las pantallas de interacción con el operador, un sistema de registro de eventos de interacción, un programa que clasifica los eventos en criterios de usabilidad y un sistema de inferencia neuro-difuso adaptativo (ver la figura 1).

El sistema de adquisición de datos para supervisión y control que se utilizó fue una versión de demostración del paquete *InduSoftWebStudio* (*IWS*), que permite construir con todas las funciones del



**Figura 1.** Esquema general del sistema de evaluación de usabilidad de Interfaces de Supervisión de Procesos.

**Fuente:** Elaboración propia.

sistema de supervisión. Este paquete cuenta con una base de datos de etiquetas de proyecto para gestionar datos en tiempo de ejecución, incluyendo tanto variables internas como escaneado E/S para dispositivos sensores y accionamientos, controladores configurables para comunicarse en tiempo real con controladores lógicos programables, dispositivos E/S remotos y otros dispositivos de adquisición de datos, pantallas de interfaces animadas y cuadros de mando; y módulos opcionales, como registro de alarmas, registro de eventos, registro de tendencias, procedimientos, informes, lógica programable, programadores, un sistema de seguridad y una completa base de datos de interfaces. Con este paquete se desarrolló una interfaz de supervisión de un proceso de dosificado de líquidos, con varias pantallas como la que se muestra en la figura 2.

Por su parte, el registrador de eventos ofrece la trazabilidad de las acciones del operador durante la interacción con la interfaz o de la actividad interna de la aplicación, como cambios en la seguridad del sistema, operaciones de apertura/cierre de pantallas, operaciones de ejecución de

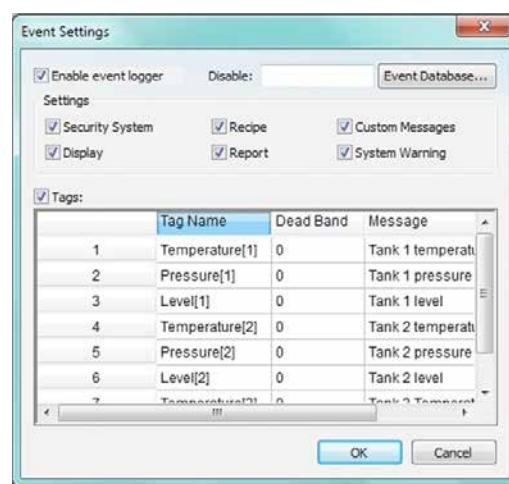
procedimientos o de informes, mensajes personalizados y alertas del sistema. Asimismo, cualquier cambio de valor de etiquetas, incluyendo mensajes personalizados (ver la figura 3).

Cada acción del operador tiene un código estandarizado como evento, el registro de los eventos es almacenado en archivos de la base de datos del IWS. Un programa explora los eventos correspondientes a las acciones del operador y los clasifica en diez criterios de usabilidad de interfaces definidos en (Seffah, Donayaee, Kline, & Padda, 2006) (ver la tabla 2). Las acciones tomadas por el registrador de eventos constituyen una base de conocimiento. Los criterios son utilizados por el sistema adaptativo de inferencia neuro-difusa en forma de vectores. El sistema de inferencia utiliza la base de conocimiento heurístico de las acciones de los operadores de procesos para el entrenamiento de una red neuronal. El entrenamiento genera un sistema de inferencia difuso, en donde cada regla se establece de acuerdo con la distribución normal del número de acciones del operador durante la interacción con el proceso.



**Figura 2.** Pantalla de interfaz para la supervisión de procesos.

**Fuente:** (InduSoft, 2012).



**Figura 3.** Módulo de registro de acciones del operador o de actividad interna de la aplicación.

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 2.** Relación de las acciones del operador y los criterios de usabilidad.

Acciones del operador	Eventos del sistema	Criterios de usabilidad
Reinicio del sistema	Account Logon y Logon/Logoff	Recuperación de errores
Seguimiento de una secuencia para el cumplimiento de una tarea	Account Management/User account management	Eficacia
Seguimiento de varias secuencias para el cumplimiento de varias tareas	Detailed Tracking	Productividad o multitarea
Verificación de la comunicación y actualización de datos del proceso	DS Access	Eficiencia o velocidad de respuesta
Activación de íconos dentro de las pantallas	Object Access	Accesibilidad o interactividad
Tiempo transcurrido sin realizar acciones	Policy Change	Confianza
Activación de pantallas después de la aparición de una señal de alarma	Account Management/security group management	Seguridad o fiabilidad
Modificación de textos y color de pantallas	Privilege Use	Satisfacción o flexibilidad
Modificación de objetos de pantallas	System	Coherencia

**Fuente:** Elaboración propia.

Para cada criterio de usabilidad se han definido tres funciones de pertenencia, baja, media y alta. En este caso se utilizó un sistema difuso que se basa en las reglas de Takagi-Sugeno, que usan una función lineal de las entradas al modelo como consecuente de las reglas. Tal estructura está en capacidad de representar una clase general de sistemas estáticos o dinámicos no lineales. La red neuronal se entrena con diez capas, cada capa con el número de neuronas correspondientes al número de entradas. La red neuronal utiliza el principio de retropropagación, en donde se ajusta el valor de los pesos en función del error generado. Esta técnica permite tener un método de optimización que se encuentra al definir el gradiente del error y minimizarlo con respecto a los parámetros de la red neuronal. El sistema completo es utilizado para determinar si la interfaz posee una alta, media o baja usabilidad.

*E. Procedimiento:* el sistema completo se ejecuta como una aplicación complementaria a la Interfaz humano-máquina durante la interacción con los operadores por un período de una hora. El sistema almacena los resultados de la evaluación que luego son comparados con los resultados de la evaluación por los métodos de inspección e indagación.

## RESULTADOS

Para el entrenamiento de la red neuronal se utilizaron 100 datos, una capa oculta de 10 neuronas y el algoritmo de retro-propagación de Levenberg-Marquardt. Para comprobar la validez de la metodología automatizada (A), se efectuó una prueba de hipótesis frente a otras dos metodologías tradicionales: *inspección* por un experto (E) e *indagación* a los usuarios (U). Se tabularon los datos de la experimentación de interacción entre los operadores y las interfaces IHM de supervisión de un proceso de control de flujo, nivel, temperatura y presión de líquidos. Las valoraciones arrojadas por el sistema desarrollado sirvieron para clasificar las interfaces como de baja, media o alta usabilidad.

Con los datos obtenidos se desea suponer que por las valoraciones dadas, los métodos son aproximados. Entonces la hipótesis nula es que en promedio las valoraciones son iguales o estadísticamente existen diferencias significativas que permitan afirmar que el promedio de los tres métodos no es el mismo. Para probar esta hipótesis se elaboraron tablas de Anova.

En la tabla de Anova la fuente de variación tiene dos componentes, el factor y el error. Esta

fuente de variación se descompone en una suma de cuadrados, la suma de cuadrados del factor, expresada como una diferencia de cuadrados y la suma de cuadrados del error, otra diferencia de cuadrados. Los grados de libertad del factor es  $c-1$  y los grados de libertad del error es  $n-c$ , donde  $c$  es el número de columnas (3) y  $n$  es el numero de datos (30). Igualmente, se calculó el cuadrado medio como la suma de cuadrados entre el grado de libertad, tanto para el factor como para el error. En la última columna se calcula la estadística de

prueba  $f$ , como el cuadrado medio del factor entre el cuadrado medio del error (ver la tabla 3).

Haciendo las operaciones y tomando de una tabla de valores críticos de distribución  $f$  para 5% de área de rechazo, se ubica la relación entre 3 grados de libertad para el factor y 27 grados de libertad para el error; así se obtiene un valor crítico de 2,95. La estadística de prueba para la usabilidad baja es 0,09, para media es 2,01 y para alta es 0,38. Esto indica que la hipótesis no se descarta, es decir, en promedio las valoraciones son las mismas. Con

**Tabla 3.** Operaciones de Anova.

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	$SCfactor = \sum \frac{C_i^2}{k_i} - \frac{(\sum x)^2}{n}$	$c - 1$	$CMfactor = \frac{SCfactor}{c - 1}$	$\frac{CMfactor}{CMerror}$
Error	$SCerror = \sum x^2 - \sum \frac{C_i^2}{k_i}$	$n - c$	$CMerror = \frac{SCerror}{n - c}$	

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 4.** Anova para usabilidad baja.

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	0,40	3	0,13	
Error	38,14	27	1,41	0,09

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 5.** Anova para usabilidad media.

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	6,69	3	2,23	
Error	29,95	27	1,11	2,01

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 6.** Anova para usabilidad alta.

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	f
Factor	0,77	3	0,26	
Error	18,32	27	0,68	0,38

**Fuente:** Elaboración propia.

ello, se deduce que la metodología propuesta tiene equivalencia con dos metodologías tradicionales, la inspección de un experto y la indagación a los usuarios, pero tiene la ventaja de que es completamente automatizada. Las tablas de Anova 4, 5 y 6 muestran los cálculos y la estadística de prueba obtenidos para los datos de la evaluación de usabilidad baja, media y alta de las interfaces.

Es importante aclarar que esta metodología está en función de la interacción con el operador, pero el comportamiento del operador puede obedecer a otras variables no tenidas en cuenta en la metodología. Por ejemplo, los operadores pueden manifestar diversos comportamientos o realizar varias actividades que no están ligadas directamente con el proceso, incluso la actividad de interacción con las pantallas de una interfaz puede generar aburrimiento entre los operadores. Estos elementos, aunque importantes, no se consideran dentro de esta metodología.

El desempeño del operador durante la interacción a través de la interfaz tiene una relación directa con el conocimiento que tenga del proceso, haciéndolo más eficaz o menos productivo a la hora de efectuar una tarea y/o tomar decisiones. Varias de las tareas asignadas a los operadores se rigen bajo ciertos patrones de secuencias a seguir, luego depende del operador y su habilidad para memorizar y realizar  $n$  veces la misma acción, la cantidad de veces que se siga la misma secuencia en determinado tiempo. Los trabajos futuros están orientados a utilizar la metodología aquí presentada en varias aplicaciones, incluso de otros campos diferentes a la supervisión de procesos industriales, dado que actualmente existe un mercado diverso de productos con un alto grado de interacción con el usuario. Igualmente, para el proceso de evaluación de usabilidad de interfaces y/o productos interactivos es importante la incorporación de buenas aplicaciones informáticas para la captura y análisis de registro de datos; por ello, este también es un campo de exploración.

## CONCLUSIONES

La usabilidad se reconoce como un factor de calidad importante para sistemas interactivos incluidas las interfaces de usuario de una gran variedad de dispositivos. El diseño de aplicaciones, de modo que logren efectivamente sus propósitos en términos de facilidad de uso, no es una tarea fácil, ante la existencia de varios métodos y técnicas para la evaluación de la usabilidad que no ha sido posible integrarlas en un sencillo marco conceptual que facilite su uso por los desarrolladores. La metodología desarrollada hace parte de las técnicas automatizadas de acuerdo con la clasificación presentada en este artículo. Sin embargo, incorpora a los usuarios (operadores) para extraer información durante la interacción en tiempo de ejecución en actividades de supervisión de procesos, lo cual constituye una innovación frente a técnicas tradicionales del mismo tipo.

La literatura tiende a definir la usabilidad en términos excesivamente breves y ambiguos y describe su aplicación en términos informales. Esta es una de las razones principales por las cuales predominan los diferentes enfoques y orientaciones en el estudio de la usabilidad. Aunque no existe una concepción universal sobre criterios reales de evaluación de la usabilidad de sistemas interactivos, con la aproximación presentada por varios autores se logró establecer una relación entre las acciones del operador sobre la interfaz y los eventos de interacción establecidos en el software de supervisión de procesos.

Con la estadística de prueba se determinó que la metodología es eficiente para actividades de interacción con interfaces de usuario, porque utiliza elementos que se encuentran incorporados y probados en el software de supervisión y se complementan con una técnica de inteligencia artificial que igualmente ha mostrado sus bondades en otras aplicaciones.

El objeto de la evaluación de usabilidad de interfaces es utilizar los resultados para realizar una

retroalimentación, con el fin de mejorar los diseños y, por ende, la interactividad con el usuario. La metodología desarrollada le permite a un inexpero en usabilidad agilizar la evaluación para proponer las mejoras que den lugar a la optimización de la interacción con los procesos.

## AGRADECIMIENTOS

Los resultados hacen parte del proyecto “Desarrollo de una metodología de evaluación de usabilidad de Interfaces Humano-Máquina (IHM) para la mejora del proceso de toma de decisiones en tareas de supervisión industrial”, financiado por la Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales.

## FINANCIAMIENTO:

Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales.

## REFERENCIAS

- Anderson, J. R. (2012). *Cognitive Psychology and its Implications*. New York, USA: Worth Publishers.
- Ankita, M., & Sanjay, K. (2012). Usability Evaluation Methods: A Literature Review. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 4(2), (2012)., 590-599.
- Bartek, V., & Cheatham, D. (1 de septiembre de 2012). *IBM, DeveloperWorks*. Obtenido de: Experience remote usability testing, part 1: Examine study results on the benefits and downside of remote usability testing: <http://www.ibm.com/developerworks/library/wa-rmusts1>
- Cao, X.; Lijue, W., & Shijian, L. (2013). Research on Contextual Design in Human-Computer Interaction Under the Framework of Activity Theory. *Proceedings of the 2012 International Conference on Information Technology and Software Engineering* (pp. 853-868). Beijing: Springer-Verlag.
- Da Ponte, M., & Da Silveira, A. (2008). A Methodology for Evaluation the Usability of Software for Industrial Automation Using Artificial Neural Networks: Case Study—Eletrobrás. *International Conference on Computational Intelligence for Modeling, Control and* (pp. 430-435). Vienna: IEEE.
- Dix, A. F. (2004). *Human-Computer Interaction*. Madrid, España: Pearson.
- Dray, S., & Siegel, D. (2004). Remote possibilities?: international usability testing at a distance. *Interactions*, 10-17.
- Filippi, S., & Barattin, D. (2013). Integrating Systematic Innovation, Interaction Design, Usability Evaluation and Trends of Evolution. En: A. Chakrabarti, *Sustainable product development, CIRP Design 2012* (pp. 301-311). London: Springer-Verlag.
- Granollers, T. (2004). *MPi+u.a. Una metodología que integra la ingeniería del software, la interacción persona ordenador y la accesibilidad en el contexto de equipos de desarrollo multidisciplinares*. Lleida, España: Universidad de Lleida.
- Granollers, T.; Lóres, V., & Cañas, J. (2005). *Diseño de sistemas interactivos centrados en el usuario*. Barcelona, España: Editorial UOC, Colección Informática.
- Hanna, N.; Richards, D., & Jacobson, M. (2012). Automatic Acquisition of User Models of Interaction to Evaluate the Usability of Virtual Environments. *Lectures Notes in Computer Science*, 43-57.
- InduSoft (1 de septiembre de 2012). *InduSoft Web Studio*. Obtenido de: InduSoft Web Studio, Product Features: <http://www.indusoft.com/>
- ISO 25000 (2005). *ISO 25000, Calidad del producto software*. Navarra, España: International Organization of Standardizations.
- ISO 9421 (1998). *Requisitos ergonómicos para trabajos de oficina con pantallas de visualización de datos (PVD), Parte 11: Guía sobre usabilidad*. Navarra, España: International Organization of Standardization.
- Lorés, J. J. (2001). *Introducción a la Interacción Persona-Ordenador*. Lleida, España: Jesús Lorés.
- Norman, D. (1986). *Cognitive engineering*. New Jersey, EUA: Norman & Draper.
- Ponsa, P.; Amante, B., & Díaz, M. (2009). Evaluación de la usabilidad para la tarea de supervisión humana en sala de control industrial. *Revista RIAI, Revista*

- Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 84-93.
- Ponsa, P.; Vilanova, R., & Díaz, M. (2007). Introducción del Operario Humano en el Ciclo de Automatización de Procesos Mediante la Guía GEMMA. *Información Tecnológica*, 21-30.
- Ríos, D.; Vásquez, A.; Mosqueira, E., & Moret, V. (2010). Usability: A Critical Analysis and a Taxonomy. *Ríos, D., Vásquez, A., Mosqueira, E. y Moret, V. International Journal of Human Computer-Interaction*, 53-74.
- Rodeiro, J. (2001). *Representación y Análisis de la componente visual de la interfaz de usuario*. Tesis doctoral. Vigo, España: Universidad de Vigo.
- Rukh, H. (2012). Incorporating Usability Evaluation in Software Development Environments. *KI-künstliche Intellinez*, 197-200.
- Seffah, A.; Donayaee, M.; Kline, R., & Padda, H. (2006). Usability measurement and metrics: A consolidated model. *Software Quality Control*, 159-178.
- Spagnoletti, P., & Tarantino, L. (2013). User Centered Systems Design: The Bridging Role of Justificatory Knowledge. En: R. Baskerville, M. De Marco, & P. Spagnoletti, *Designing Organizational Systems. Lectures Notes in Information Systems and Organization* (pp. 105-121). Berlin: Springer-Verlag.
- Wickens, C. (2012). *Engineering Psychology and Human-Computer Performance*. New Jersey, EUA: Pearson.
- Zapata, G.; Cardillo, J., & Chacón, E. (2011). Aportes Metodológicos para el Diseño de Sistemas de Supervisión de Procesos Continuos. *Información Tecnológica*, 97-114.





## Refrigeración de gabinetes de transmisión de datos por tubos de calor

### Refrigeration of data transmission boxes by heat pipe systems

Jorge Andrés Gaitán Triana\*, Camilo Andrés Arias Henao\*\*

Citation / Para citar este artículo: Gaitán Triana, J. A., & Arias Henao, C. A. (2014). Refrigeración de gabinetes de transmisión de datos por tubos de calor. Revista *Tecnura*, Edición especial, 115-124.

**Fecha de recepción:** 29 de noviembre de 2013 / **Fecha de aceptación:** 11 de julio de 2014

#### RESUMEN

El proyecto de refrigeración de gabinetes de telecomunicaciones por medio de tubos de calor propone el diseño matemático y posterior simulación de un sistema de refrigeración por tubos de calor para disipar la energía generada por equipos de telecomunicaciones presentes en los gabinetes, evaluando la posible aplicación del modelo matemático en diferentes ambientes de Colombia. Este sistema de refrigeración permite disipar grandes cantidades de energía térmica en comparación con su sección de paso; además, no se requiere conectar los tubos a la red eléctrica (en algunos ambientes), lo que genera independencia de esta última.

Inicialmente se determina el modelo matemático que describe el funcionamiento del tubo, dependiendo de las necesidades de refrigeración. Este modelo es una ecuación de transferencia de calor que describe el paso de energía en las diferentes partes del tubo. Luego, en la simulación se presenta el comportamiento del sistema para un año típico, en el cual se obtienen datos de temperatura en el interior del gabinete, energía retirada por el banco de tubos, reducción del consumo de electricidad, entre otros datos. La simulación se aplica a diferentes

ambientes de Colombia para evaluar el potencial del sistema en las regiones ecuatoriales.

Los resultados obtenidos en el proyecto tras la simulación en Trnsys 17 señalan la obtención de una temperatura relativamente estable en el funcionamiento de los equipos de telecomunicaciones refrigerados con los tubos de calor en la ciudad de Bogotá. En la simulación para ambientes más cálidos, como son las ciudades de Barranquilla y Cali, se logró una significativa reducción en la temperatura interior del gabinete, que es de aproximadamente 50%.

**Palabras clave:** Cambio de fase, capilaridad, estado transitorio, flujo de calor, resistencia térmica.

#### ABSTRACT

The cooling telecom cabinets project by heat pipes proposes the mathematical design and subsequent simulation of the refrigeration system by heat pipes for the dissipation of the energy generated by the telecommunications equipment in cabinets, evaluating the possible application of this mathematical model in different environments of Colombia. This cooling system allows dissipating large amounts of thermal energy compared to its flow section, moreover; it is not necessary to connect the pipes to the

\* Ingeniero mecánico, estudiante de último semestre de pregrado en ingeniería mecánica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Contacto: [jagaitant@correo.udistrital.edu.co](mailto:jagaitant@correo.udistrital.edu.co)

\*\* Ingeniero mecánico. Magíster en ingeniería mecánica, candidato a doctor en ingeniería energética; docente, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: [carias@udistrital.edu.co](mailto:carias@udistrital.edu.co)

grid (in some environments), generating independence from the latter.

Initially it is determined the mathematical model that describes the operation of the tube depending on the cooling requirements. This model is a heat transfer equation which describes the energy flow in the different parts of the tube. Then, the simulation shows the performance of the system for a typical year, in which it is obtained data related to the temperature inside the cabinet, removed energy by the tube bank, reduction in electricity consumption, among other data. The simulation is applied to different

environments in Colombia in order to evaluate the potential of the system in the Equatorial regions.

The results of the simulation in Trnsys 17 point out the obtaining of a relatively stable temperature in the operation of telecommunications equipment cooled with heat pipe in Bogotá city. In the simulation for warmer environments, such as Barranquilla and Cali, it was achieved a significant reduction in the temperature inside the cabinet that is approximately 50%.

**Keywords:** Capillarity, heat flux, phase shift, thermal resistance, transient.

## INTRODUCCIÓN

Los sistemas electrónicos y de transmisión de datos requieren una adecuada temperatura para lograr un desempeño óptimo y una larga vida; para esto, se implementan sistemas de refrigeración que utilizan electricidad como fuente de energía, llevando a un aumento en el gasto económico.

La refrigeración por tubos de calor es un sistema que logra conducir grandes cantidades de calor a través de una sección de paso pequeña, ocupando poco espacio y, dependiendo de las condiciones climáticas y de funcionamiento, pueden independizarse de la red eléctrica, debido a que su flujo de energía es producido por el diferencial de temperaturas entre el ambiente y la zona a refrigerar.

Estos sistemas de refrigeración logran aportar soluciones a las nuevas políticas ambientales en el mundo ya que reducen los consumos de electricidad y su fluido de trabajo puede ser agua, alcoholes y fluidos amigables con el medio ambiente, constituyéndose así en una opción para los problemas energéticos y de contaminación.

El objeto de estudio se centra en determinar el potencial de los tubos de calor para refrigeración en gabinetes de transmisión de datos. Para esto se definirán los sistemas termodinámicos involucrados especificando los flujos de energía y

el desplazamiento del fluido en sus diferentes fases para seleccionar así los materiales a utilizar en el modelo matemático y simular el comportamiento del gabinete y los tubos, obteniendo al final el potencial teórico del sistema de tubos de calor.

En la simulación del gabinete en las tres diferentes ciudades se encontró que se hace una reducción significativa de las temperaturas, estando en un promedio de 50% con respecto a las temperaturas máximas que superan 100 °C, por la generación externa y las ganancias por condiciones ambientales. Al final se concluye que siendo un sistema de refrigeración pasivo que no consume energía de fuentes externas, se logra reducir la temperatura externa en un porcentaje considerable.

## DESARROLLO

### Diseño analítico del tubo de calor

En el diseño del tubo de calor, lo primero que se debe hacer es definir el sistema térmico (Jones & Dugan, 1997) con las cargas que se desea refrigerar, los flujos energéticos, el ciclo de vapor generado para la refrigeración y el diferencial de temperaturas entre el ambiente y el lugar que se va a refrigerar.

En la figura 1 se aprecia un esquema del sistema térmico, en donde se definen los límites, el desplazamiento del fluido en estados líquido y gaseoso; los flujos energéticos que se representan en los extremos del tubo (National Aeronautics and Space Administration, 1979).

En los gabinetes de transmisión de datos, se extraerá energía del aire presente en el sistema por medio del evaporador del tubo de calor, y el condensador estará al aire libre; con esto se conseguirá refrigerar el gabinete, evitando el consumo de electricidad en otro tipo de sistemas de refrigeración; además, al no poseer elementos móviles se evita la adición de ruido al sistema, ya que para estas aplicaciones se debe tener un máximo de dB en el día de 55 y 50 en la noche.

### Determinación del tubo

Para determinar el tubo de calor más indicado para la aplicación en los gabinetes de transmisión de datos debemos especificar: las temperaturas de operación del sistema, la carga energética que se desea disipar, el espacio, la geometría y la orientación del banco de tubos.

Se tomará un rango de temperatura de operación de 10 a 60 °C (son las temperaturas extremas a las que se verá sometido el fluido de trabajo) para el diseño de los tubos, y la temperatura dentro del gabinete será de aprox. 30 °C para tener un

óptimo desempeño de los equipos de telecomunicaciones; el flujo de calor que se desea retirar es de 5000 Btu/h (aprox. 1465 W).

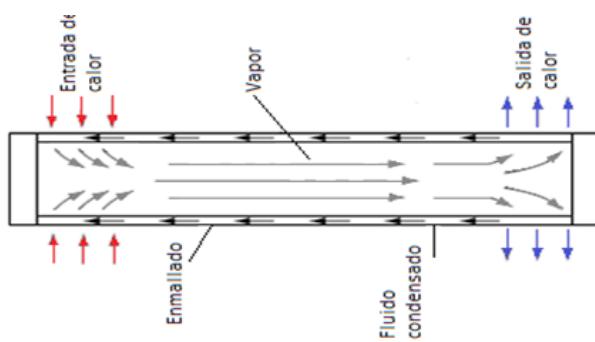
Después de definir las condiciones de funcionamiento del sistema de tubos de calor, se designará el cobre como material para la construcción de los tubos, ya que este metal tiene una conductividad térmica alta y es compatible con varios fluidos de trabajo.

El espacio para la implementación de los tubos de calor se restringe a 5 cm de espesor, lo cual determina el diámetro máximo de los tubos. Se seleccionarán diámetros comerciales para facilitar una posible construcción (ver la figura 2).

Se seleccionó tubería de cobre de  $\frac{1}{4}$  in (para la parte interna), debido a su fácil adquisición y manejo, además por sus dimensiones se adapta al espacio en el gabinete en donde se instalará. Esta tubería nos da un área de sección de vapor de  $1,642 \times 10^{-5} \text{ m}^2$  ( $r = 2,286 \text{ mm}$ ). La tubería externa será de 3/8 de pulgada.

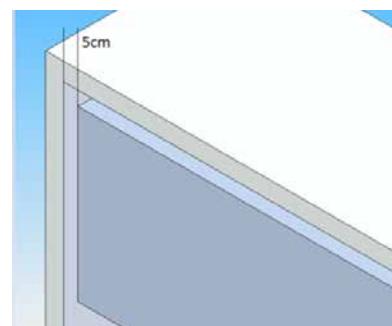
### Fluido de trabajo

Para determinar los posibles fluidos de trabajo se debe considerar que estos sean compatibles con el material del tubo, ya que se podrían presentar problemas de oxidación, generación de burbujas por reacciones químicas y degradación del tubo. A continuación se indican algunos fluidos



**Figura 1.** Esquema térmico.

**Fuente:** Elaboración propia.

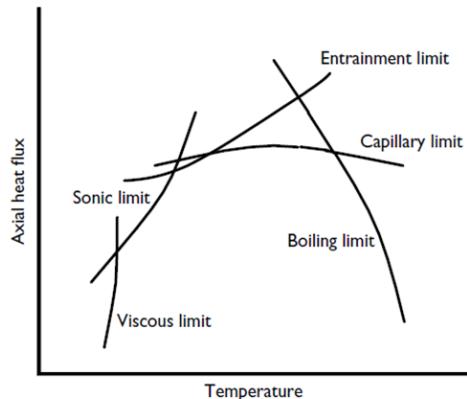


**Figura 2.** Esquema del espacio en donde se instalarán los tubos.

**Fuente:** Elaboración propia.

compatibles con el cobre: acetona, amoniaco, agua, Dow-A y Dow-E. Se seleccionará el agua debido a su mayor conductividad térmica.

En los tubos de calor encontramos diferentes tipos de limitaciones, las cuales nos delimitan la cantidad de energía que puede retirar el sistema. En la figura 3 se aprecian las curvas de límites.



**Figura 3.** Límites en el flujo de calor.

**Fuente:** Reay, Kew, & McGlen (2006).

Para la temperatura más baja ( $T_l = 10$  °C) la limitación sónica determina el menor flujo de calor axial (Reay, Kew, & McGlen, 2006), el cual viene representado por la ecuación (1):

$$\dot{q}_s = \rho_v h_{fg} \sqrt{\frac{\gamma RT_v}{2(\gamma + 1)}} \quad (1)$$

Donde (Miranda Barreras, 2005):

- $\dot{q}_s$  = Límite sónico ( $\text{W/m}^2$ )
- $\rho_v$  = Densidad del vapor ( $\text{kg/m}^3$ )
- $R$  = Constante del gas ( $\text{kJ/kgK}$ )
- $T_v$  = Temperatura de vapor (K)
- $\gamma$  = Cociente de los calores específicos
- $h_{fg}$  = Calor latente ( $\text{kJ/kg}$ )

El valor de  $R$  es  $0,462 \text{ kJ/kgK}$

Se calcula el límite sónico con las propiedades del agua:

$$\dot{q}_s = 3,767 \times 10^6 \text{ W/m}^2$$

Determinado el potencial del tubo en la temperatura más baja de operación, ahora se calcula el máximo flujo de energía posible a la temperatura más alta ( $T_h$ ) para el amoniaco, que es determinado por el límite de arrastre. Para calcular este parámetro se debe hacer referencia al número de Weber (We), ecuación (2) (Miranda Barreras, 2005), el cual establece la relación entre las fuerzas de inercia y las de tensión superficial.

$$W_e = \frac{\rho_v c_v^2 L}{2\pi\sigma} \quad (2)$$

Donde:  $\rho_v$  = densidad del vapor;  $c_v$  = velocidad del vapor;  $\sigma$  = tensión superficial de la interface líquido-vapor;  $L$  = longitud característica.

Para poder calcular el máximo flujo de calor, se considera que este ocurre cuando las fuerzas de inercia se igualan a las de tensión superficial, entonces  $W_e = 1$ . De acuerdo con la anterior suposición, el límite se calcula con la ecuación (3) (Miranda Barreras, 2005):

$$\dot{Q}_{ent} = \pi r_v^2 h_{fg} \sqrt{\frac{2\pi\rho_v\sigma}{z}} \quad (3)$$

Se hace referencia a  $z$  como la dimensión característica de la interface líquido-vapor y puede tomarse como  $0,036 \text{ mm}$ . El límite de arrastre se evalúa con la temperatura más alta.

$$h_{fg} = \text{J/kg}; \sigma = \text{N/m}; z = \text{kg/m}^3; r_v = \text{m}; z = \text{m}$$

Después del cálculo con la ecuación (3) obtenemos el siguiente resultado:

$$\dot{Q}_{ent} = 1424,5W$$

El mayor flujo de calor del fluido a máxima temperatura es de 1424,5 W.

Se determina usar agua como fluido de trabajo, ya que de los posibles fluidos es el de mejor comportamiento.

#### Enmallado del tubo de calor

Para la selección del enmallado se escogerá esferas empacadas, que es un tipo de enmallado compuesto por esferas sinterizadas, el cual posee el mayor flujo de calor de los enmallados homogéneos, además logra vencer fuerzas gravitacionales.

Se utilizarán esferas sinterizadas de 0,458 mm de diámetro con una conductividad térmica de 31 W/mK y una porosidad  $\epsilon = 0,63$ . (Patiño & Figueiroa, 2004).

La conductividad efectiva ( $k_{ef}$ ) representa la capacidad de transferencia de calor del conjunto relleno-fluido. Para esto se utiliza la ecuación (4) (Miranda Barreras, 2005).

$$k_{ef} = \frac{\kappa_1[(2\kappa_1 + \kappa_w) - 2(1 - \epsilon)(\kappa_1 - \kappa_w)]}{[2\kappa_1 + \kappa_w + (1 - \epsilon)(\kappa_1 - \kappa_w)]} \quad (4)$$

Donde:

- $\kappa_1$  = conductividad del fluido agua (0,611 W/mK)
- $\kappa_w$  = conductividad del material del relleno aluminio (31 W/mK)

#### Modelo matemático

El tubo de calor es un dispositivo que transfiere energía de una temperatura más alta a una más baja, por este motivo se representa con una ecuación de transferencia de calor, en donde el coeficiente global de transferencia de calor se calcula con la sumatoria de las inversas de las resistencias térmicas de cada sección por donde circula el flujo energético. En la figura 4 se aprecia un esquema de las resistencias térmicas que representan al tubo y en la tabla 1 se describen las convenciones utilizadas.

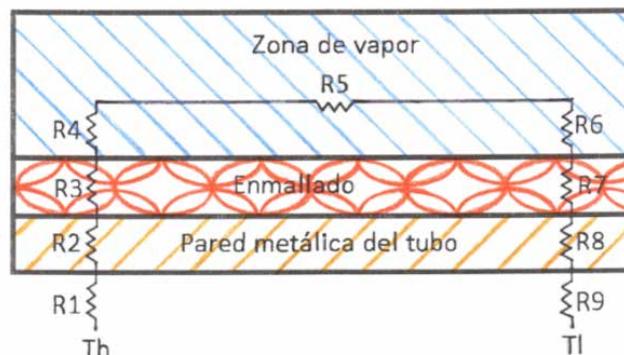


Figura 4. Esquema de resistencias térmicas.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1. Representación de las resistencias a través del tubo.

Representación	Significado
R1	Resistencia por convección entre el aire caliente y el tubo en el evaporador.
R2	Conducción por la pared metálica por el lado del evaporador.
R3	Conducción por el relleno por el lado del evaporador.
R4	Convección entre relleno y vapor en el evaporador.
R5	Flujo axial por el vapor.
R6	Convección entre vapor y relleno en el condensador.
R7	Conducción por el relleno en el evaporador.
R8	Conducción por la pared del tubo en el condensador.
R9	Convección en el exterior entre la pared y un flujo frío.

Fuente: Elaboración propia.

Para simplificar los cálculos las resistencias térmicas se multiplicarán por el área transversal para manejar resistencias específicas. Además se supondrá que las resistencias convectivas son muy pequeñas y se omitirán en los cálculos, de manera que entonces los cálculos se reducen a:

- A través de la pared del evaporador

$$r_{we} = \frac{r_0 \varepsilon_w}{2k_w L_e} \quad (5)$$

- A través del relleno del lado del evaporador

$$r_{re} = \frac{r_0^2 \varepsilon_r}{2k_r r_i L_e} \quad (6)$$

- La resistencia específica axial

$$r_v = \frac{\pi r_0^2 F_v T_v L_{ef}}{\rho_v h_{fg}} \quad (7)$$

- A través del relleno del lado del condensador

$$r_{rc} = \frac{r_0 \varepsilon_r}{2k_r L_c} \quad (8)$$

- A través de la pared del condensador

$$r_{wc} = \frac{r_0^2 \varepsilon_w}{2k_w r_i L_c} \quad (9)$$

- La resistencia total

$$r_{TC} = \frac{1}{U_{TC}} = r_{we} + r_{re} + r_v + r_{rc} + r_{wc} \quad (10)$$

Para el cálculo de las resistencias se debe tener en cuenta:

$r_0$  = radio exterior 0,0048 m

$r_i$  = radio interior del tubo 0,0039 m

$\varepsilon_w$  = grosor de la pared del tubo  $9 \times 10^{-4}$  m

$\varepsilon_r$  = grosor del relleno 0,00069 m

$k_w$  = conductividad de la pared del tubo 401 W/mK

$L_e$  = longitud del evaporador 0,05 m

$L_c$  = longitud del condensador 0,2 m

$L_a$  = longitud zona adiabática 1 m

$L_{ef}$  = longitud efectiva 1,0417 m

$F_v$  = coeficiente de fricción 13,6 s/m<sup>4</sup>

$T_v$  = temperatura de vapor 300,15 K

$\rho_v$  = densidad del vapor 0,025 kg/m<sup>3</sup>

$h_{fg}$  = calor latente 2437 kJ/kg

Se calculan las resistencias específicas con los valores antes mencionados utilizando el programa

HEATPIPE, el cual utiliza la ecuación (5) para la conductividad a través de la pared del tubo, la ecuación (6) para la conductividad a través del relleno, la ecuación (7) es la generada axialmente por conducción y convección en el tubo; en la zona del condensador encontramos la ecuación (8) para el relleno al lado del condensador y la ecuación (9) para la pared del tubo; finalmente, la ecuación (10) es la sumatoria de todas las demás resistencias. Los resultados calculados se resumen a continuación:

$$r_{we} = 1,0773 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

$$r_{re} = 9,347 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

$$r_v = 2,643 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

$$r_{rc} = 2,336 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

$$r_{wc} = 0,345^{-6} \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

$$r_{TC} = 1,6048 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

$$r_{TC} = r_{we} + r_{re} + r_v + r_{rc} + r_{wc}$$

$$U_{TC} = \frac{1}{r_{TC}} = 62313 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Mediante la ecuación (11) se calcula el área de transferencia de calor:

$$A_t = \pi r_0^2 \quad (11)$$

Por último, la ecuación (12) (Incopera & De Witt, 1999) es la ecuación de transferencia de calor con la cual se simula el tubo:

$$\dot{Q} = A_t U_{TC} (T_{we} - T_{wc}) \quad (12)$$

$T_{we}$  = temperatura de la pared en el evaporador

$T_{wc}$  = temperatura de la pared en el condensador

$$\dot{Q} = (7,238 \times 10^{-5} \text{ m}^2) (62313 \text{ W/m}^2\text{K}) (30^\circ\text{C} - T_{wc})$$

Para determinar la máxima cantidad de energía que puede retirar el tubo de calor, se calculan las diferentes limitaciones; en la tabla 2 se resumen los resultados obtenidos en el programa HEATPIPE, el cual hace un cálculo iterativo.

**Tabla 2.** Resumen de limitaciones.

Tipo de limitación	Limitación (W)
Capilar	531
Viscosa	4831
Sónica	248,43
Arrastre	143,16
Ebullición	Mayor que 10000

Fuente: Elaboración propia.

## METODOLOGÍA

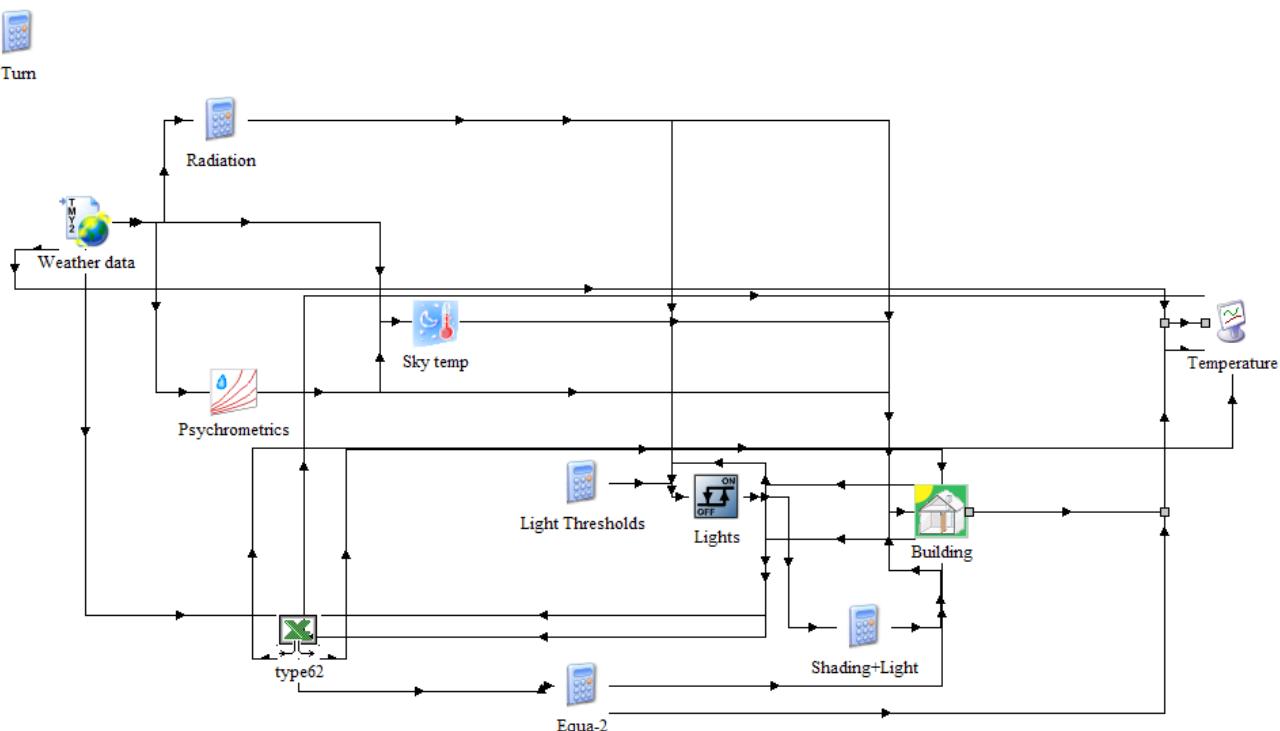
### Desarrollo del modelo computacional

La simulación del sistema de tubos de calor se efectuará mediante el software TRNSYS, el cual permite hacer un análisis en estado transitorio, visualizando temperaturas y flujos de calor que son los datos representativos del sistema.

Para representar el gabinete en TRNSYS se utiliza la unidad 56 (University of Wisconsin-Madison, 2004), en la cual se introducen las dimensiones, se define el material de las paredes, las infiltraciones de aire, las ganancias energéticas y entradas para refrigeración. En la figura 6 se aprecia el montaje de las unidades.

Para introducir los tubos de calor, primero se programa la ecuación de transferencia de calor que representa el sistema en Microsoft Office Excel 2007, limitando el flujo máximo de calor 143,16 W por tubo. Después de esto se introduce al entorno de TRNSYS por medio de la unidad type 62 mostrada en la figura 5.

Se programa el archivo para que represente el flujo de calor de 6 tubos de las mismas características (insertando una nueva ecuación), dando como resultado la refrigeración del gabinete de transmisión de datos.

**Figura 5.** Montaje de las unidades en TRNSYS.

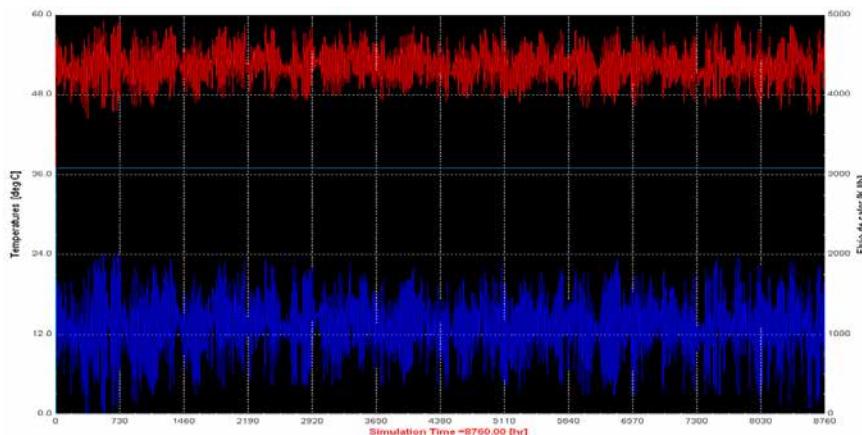
Fuente: University of Wisconsin-Madison (2004).

## RESULTADOS

El diseño del sistema de refrigeración por tubos de calor se evaluará en tres ciudades diferentes, Bogotá, Cali y Barranquilla, pues cada una de ellas presenta diferencias climáticas; en esta forma se podrá apreciar el potencial de los tubos de calor.

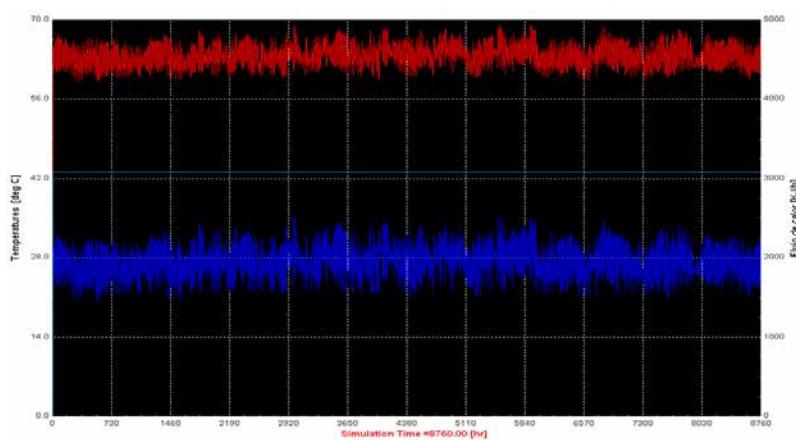
En la simulación del sistema con 6 tubos se logró disminuir la temperatura dentro del sistema a un promedio de 54 °C para la ciudad de Bogotá,

como se aprecia en la figura 6. En esta gráfica se observa que el comportamiento de la temperatura dentro del sistema es similar a la temperatura ambiente, esto se debe a que los tubos están disipando 143 W (constante), que es su límite, lo que da como resultado una refrigeración invariable. Aunque no se logra satisfacer la necesidad de mantener 30 °C constantes, sí se logra una reducción de temperatura que oscila en 50% de la temperatura del gabinete sin equipos de refrigeración (promedio de 110 °C sin equipos).



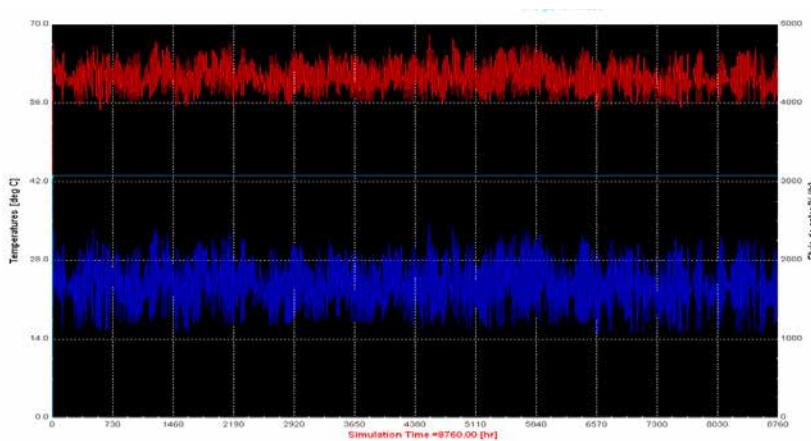
**Figura 6.** Bogotá. Temperatura ambiente (azul). Temperatura interior (rojo). Refrigeración (azul claro).

**Fuente:** University of Wisconsin-Madison (2004).



**Figura 7.** Barranquilla. Temperatura ambiente (azul). Temperatura interior (rojo). Refrigeración (azul claro).

**Fuente:** University of Wisconsin-Madison (2004).



**Figura 8.** Cali. Temperatura ambiente (azul). Temperatura interior (rojo). Refrigeración (azul claro).

**Fuente:** University of Wisconsin-Madison (2004).

El comportamiento en las temperaturas de la ciudad de Bogotá es muy similar al que se presenta en las simulaciones hechas para Barranquilla (figura 7) y Cali (figura 8), con la diferencia de que las temperaturas interiores son en promedio 62 y 60 °C, respectivamente.

La temperatura dentro del gabinete tiende a comportarse de modo muy parecido a la temperatura ambiente, pero con variaciones muy marcadas (figura 7, línea roja), lo cual se produce por la relación cíclica con la que efectúa el cálculo el programa Trnsys. Los flujos de energía son constantes porque el sistema se diseñó para que refrigerara todo el tiempo (8760 h), y así evitar inconvenientes de interpolaciones cíclicas.

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se logra una reducción significativa de la temperatura en el interior de los gabinetes, como apreciamos en las gráficas 7, 8 y 9. Aunque no se logran temperaturas óptimas (30 °C), se mejora las condiciones de operación sin necesidad de consumir energía de la red eléctrica.

La ecuación que representa los tubos de calor es dependiente de un diferencial de temperaturas (Ec. 12), por esta razón la temperatura dentro del

sistema debe ser superior a la ambiente para poder disipar la carga requerida.

Para lograr mejores resultados en ciudades de climas diferentes a Bogotá, es necesario realizar diseños particulares debido a que manejan diferenciales de temperatura diferentes.

Al aumentar la longitud del evaporador y la del condensador y reducir la longitud de la zona adiabática se obtendrán mejores resultados, ya que al efectuar el cálculo de las resistencias térmicas la longitud del evaporador y del condensador son inversamente proporcionales a la resistencia, aumentando la conductividad térmica del tubo; por el contrario, la longitud de la zona adiabática es directamente proporcional a la resistencia específica axial, lo que genera que la conductividad térmica disminuya.

El fluido de trabajo es uno de los parámetros más importantes del diseño, ya que es el que realiza el proceso; por esto se debe tener en cuenta que su temperatura de operación sea la correcta (Reay, Kew, & McGlen, 2006); además, cuanto mayor sea la conductividad del fluido, mayor será la conductividad efectiva en el relleno del tubo.

## FINANCIAMIENTO

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

## REFERENCIAS

Incopera, F., & De Witt, D. (1999). *Fundamentos de Transferencia de Calor* (Cuarta ed.). Mexico D.F., Mexico: Prentice Hall.

Jones, J., & Dugan, R. (1997). *Ingeniería Termodinámica*. Mexico D.F.; Mexico: Prentice-Hall.

Miranda Barreras, Á. L. (2005). *Tubos de calor. Una tecnología para el siglo XXI*. Barcelona, España: Ediciones CEAC.

National Aeronautics and Space Administration. (1979). *Heat Pipe Design Handbook*. Towson, Maryland, Estados Unidos: B & K Engineering.

Patiño, L., & Figueroa, R. (2004). Convección de calor en el flujo de fluidos a través de un lecho de empaque de bauxita activada. *Revista Facultad De Ingeniería, U.T.A.*, 12(2), 27-34.

Reay, D., Kew, P., & McGlen, R. (2006). *Heat Pipes Theory, Design and Applications* (5 ed.). Middlesex, Massachusetts, Estados Unidos: Butterworth-Heinemann.

University of Wisconsin-Madison, S. (2004). *TRNSYS 17, Multizone Building Modeling with Type 56 and TRNBuild* (Vol. 6). Madison, Wisconsin, Estados Unidos: University of Wisconsin-Madison.



## Evaluación de los protocolos MAC IEEE 802.11 y MMAC-CR en una red MANET

### Evaluation of MAC IEEE 802.11 and MMAC-CR protocols within a MANET

Judy C. Guevara\*, Luis Fernando Pedraza Martínez\*\*, César Augusto Hernández Suárez\*\*\*

Citation / Para citar este artículo: Guevara, J., Pedraza Martínez, L. F., & Hernández Suárez, C. A. (2014). Evaluación de los protocolos MAC IEEE 802.11 Y MMAC-CR en una red MANET. Revista Tecnura, Edición especial, 125-134.

**Fecha de recepción:** 14 de junio de 2012 / **Fecha de aceptación:** 9 de noviembre de 2013

#### RESUMEN

Este artículo presenta un análisis comparativo entre los mecanismos de control de acceso al medio IEEE 802.11 y MMAC-CR (Multichannel MAC protocol for Cognitive Radio) en redes MANET (Mobile Ad Hoc Networks). El estándar IEEE 802.11 permite el uso de múltiples canales disponibles en la capa física, pero su protocolo MAC está diseñado para un solo canal. Sin embargo, un protocolo MAC de un solo canal no trabaja bien en un entorno multicanal debido al problema del terminal oculto. La metodología del artículo se basa en la descripción de los protocolos de control de acceso al medio, la simulación del *throughput* de estos, el análisis de los resultados y las conclusiones. Los resultados de simulación muestran cómo el protocolo MMAC-CR permite hacer un mejor uso de las oportunidades especales, incrementando de esta manera el *throughput* de la red MANET.

**Palabras clave:** radio cognitiva, control de acceso al medio, redes *ad hoc*, protocolo MAC multicanal, redes inalámbricas.

#### ABSTRACT

This paper presents a comparative analysis between the mechanisms associated to Media Access Control (MAC) IEEE 802.11 and MMAC-CR (Multichannel MAC protocol for Cognitive Radio) in MANETs (Mobile Ad Hoc Networks). The IEEE 802.11 standard allows the use of multiple channels available at the physical layer, but its MAC protocol is designed for a single channel. However, a single channel MAC protocol does not operate properly in a multi-channel environment due to the hidden terminal problem. The methodology of the article is based on the description of MAC protocols, including throughput simulations, results analysis and some conclusions. The simulation results show how the MMAC-CR protocol allows a better use of spectral opportunities, thereby increasing throughput on the MANET network.

**Keywords:** Cognitive radio, medium access control, ad hoc networks, multi-channel MAC protocol, wireless networks.

\* Ingeniera en control, magíster en ciencias de la información y las comunicaciones. Docente, Universidad Manuela Beltrán. Bogotá, Colombia.  
Contacto: [judy.guevara@docentes.umb.edu.co](mailto:judy.guevara@docentes.umb.edu.co)

\*\* 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, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: [lfpedrazam@udistrital.edu.co](mailto:lfpedrazam@udistrital.edu.co)

\*\*\* 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, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: [cahernandezs@udistrital.edu.co](mailto:cahernandezs@udistrital.edu.co)

## INTRODUCCIÓN

Durante las dos últimas décadas la experiencia de los usuarios orientada a entornos colaborativos en tiempo real ha hecho de la movilidad un aspecto predominante en todas las tecnologías y dispositivos de comunicaciones modernos. Así mismo, existen situaciones en las que se requiere un rápido despliegue en una zona sin infraestructura o se debe establecer un sistema de comunicación en áreas colapsadas en donde las comunicaciones fijas han sido averiadas. Ante estas circunstancias resultan ideales redes sin infraestructura como las MANETs, formadas por dispositivos móviles que se conectan a través de enlaces inalámbricos compartidos, y que además deben crear rutas multi-salto cuando la fuente y el destino no están dentro de sus rangos de transmisión (Koes, 2004). Estas redes presentan algunas características poco deseables, como el ancho de banda reducido que debe ser compartido por todos los nodos que componen la red. El estudio de este problema puede ser abordado desde dos perspectivas diferentes. La primera ha sido empleada tradicionalmente y corresponde al estándar IEEE 802.11. La segunda responde a un esquema novedoso, el protocolo MMAC-CR (De Domenico, 2012), usado en radio cognitiva (CR) para establecer múltiples canales en paralelo, asegurando de esta forma un uso eficiente de todas las oportunidades espectrales.

Este artículo presenta un análisis comparativo del comportamiento de una red MANET cuando implementa en su capa MAC los protocolos IEEE 802.11 y MMAC-CR, cuyos fundamentos se explican brevemente en la sección II. En la sección III se describe el entorno de simulación en el cual se evaluaron estos dos protocolos. La sección IV expone los resultados obtenidos de la simulación. La discusión de los resultados se encuentra en la sección V. El artículo finaliza con las conclusiones que aparecen en la sección VI.

## FUNDAMENTOS

En esta sección se da a conocer el principio de operación de los protocolos IEEE 802.11 y MMAC-CR (Guevara, 2013).

### Función de coordinación distribuida de IEEE 802.11

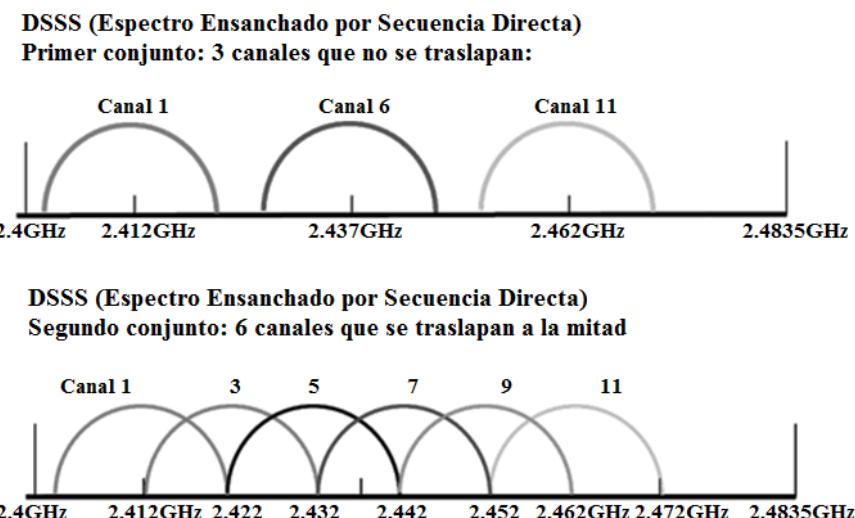
Inicialmente el objetivo de agregar múltiples canales a IEEE 802.11 era mejorar el desempeño de las redes con infraestructura. Pero en la actualidad este protocolo también es usado por las redes *ad hoc*, en cuyo interior se emplea un mismo canal para la comunicación de todos los nodos, independientemente de si se encuentran o no dentro del rango de transmisión de uno de sus vecinos (Bahl, 2004). El estándar IEEE 802.11b, por ejemplo, emplea la técnica de Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS) y provee una capa física con 14 canales, separados en frecuencia 5 MHz. Sin embargo, para evitar que se traslapen, la separación en frecuencia debe ser al menos de 30 MHz. De manera que en la práctica, son usados los canales 1, 6 y 11 en la banda de 2.4 GHz, tal como lo indica la figura 1.

La operación del protocolo IEEE 802.11 se basa en la Función de Coordinación Distribuida (DCF), en la cual un nodo reserva un canal para la transmisión de datos a través del intercambio de mensajes RTS (Ready to Send)/CTS (Clear to Send) con el nodo objetivo. Cuando un nodo desea transmitir paquetes a otro nodo, debe enviar primero un paquete RTS al destino. El receptor responde enviando un paquete CTS al transmisor. Tanto el paquete RTS como el CTS incluyen el tiempo estimado durante el cual el canal estará en uso. Los demás nodos que escuchan estos paquetes deben posponer su transmisión durante el tiempo especificado en los paquetes. Por esta razón cada nodo mantiene una variable llamada NAV (Network Allocation Vector) que graba el tiempo por el cual debe posponerse su transmisión (So, 2004). Este proceso en general se conoce como detección virtual de

portadora, y permite reservar el área alrededor del transmisor y el receptor para la comunicación, evitando así el problema del terminal oculto.

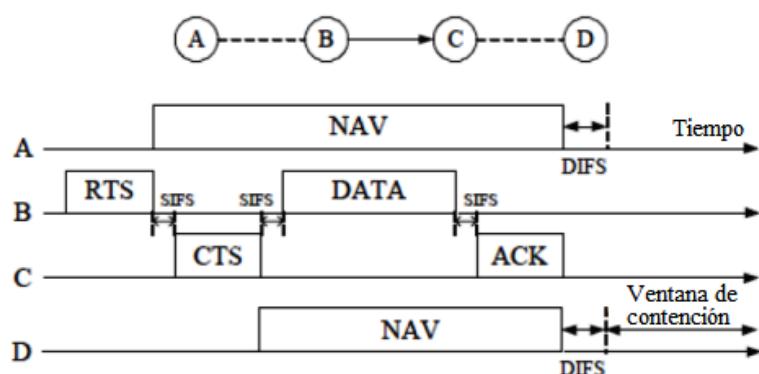
La figura 2 ilustra la operación de la DCF de IEEE 802.11. Cuando el nodo B está transmitiendo un paquete al nodo C, el nodo A escucha el paquete RTS y envía su NAV hasta el final del ACK, mientras que el nodo D escucha el paquete CTS y configura su NAV hasta el final del ACK.

Tan pronto como se completa la transmisión, las estaciones esperan durante un intervalo de tiempo llamado DIFS (DCF Interframe Space) y luego compiten por el canal. En esta figura, el nodo B es un terminal oculto para el nodo D. Sin una detección virtual de canal, el nodo D puede desconocer la transmisión del nodo B y puede transmitir un paquete a C mientras B está transmitiendo, produciendo una colisión a C.



**Figura 1.** Canales del estándar IEEE 802.11b.

**Fuente:** Tomado de FCC (2012).



**Figura 2.** Operación de la DCF de IEEE 802.11.

**Fuente:** Tomado de So (2004).

Si un nodo tiene que enviar un paquete pero observa que el canal está ocupado, este escoge un contador de backoff no mayor que un intervalo llamado ventana de contención (CW), que corresponde a una variable que tiene cada nodo. Esta variable es reseteada al valor CWmin cuando el nodo es inicializado y también luego de cada transmisión exitosa. Después de escoger el valor del contador, el nodo esperará hasta que el canal esté libre, y luego decrementará el contador. El contador es decrementado en uno luego de cada "slot de tiempo", siempre y cuando el canal esté libre. Si el canal es ocupado, el nodo debe congelar el contador hasta que el canal sea liberado. Debido a que dos nodos pueden tomar el mismo contador de backoff, el paquete RTS puede perderse por una colisión. Dado que la probabilidad de colisión aumenta con el incremento del número de nodos, un transmisor debe interpretar la ausencia de un CTS como una señal de congestión. En este caso el nodo doblará su ventana de contención para reducir la probabilidad de otra colisión.

Antes de transmitir un paquete, todo nodo tiene que esperar un tiempo corto llamado espacio intertrama, aun cuando el canal esté libre. Existen cuatro intervalos de tiempo diferentes que habilitan cada paquete según su prioridad, en orden de menor a mayor longitud son SIFS (Short Interframe Space), PIFS (Point Coordination Function Interframe Space), DIFS y EIFS (Extended Interframe Space). Por ejemplo, un nodo espera un DIFS antes de transmitir un RTS, pero espera un SIFS antes de enviar un CTS o un ACK. Así, un ACK puede ganar el canal cuando compite con un RTS o un paquete de datos porque la duración de un SIFS es menor que la de un DIFS.

## MAC Multicanal para radio cognitiva

En este protocolo cada CR mantiene dos estructuras de datos, una es el vector de imagen espectral de usuario primario (SIP) y la otra es el vector de carga de canal de usuarios secundarios (SCL). El vector SIP[n] representa la estimación del uso del

espectro del canal c, y puede contener los siguientes valores (Timmers, 2010):

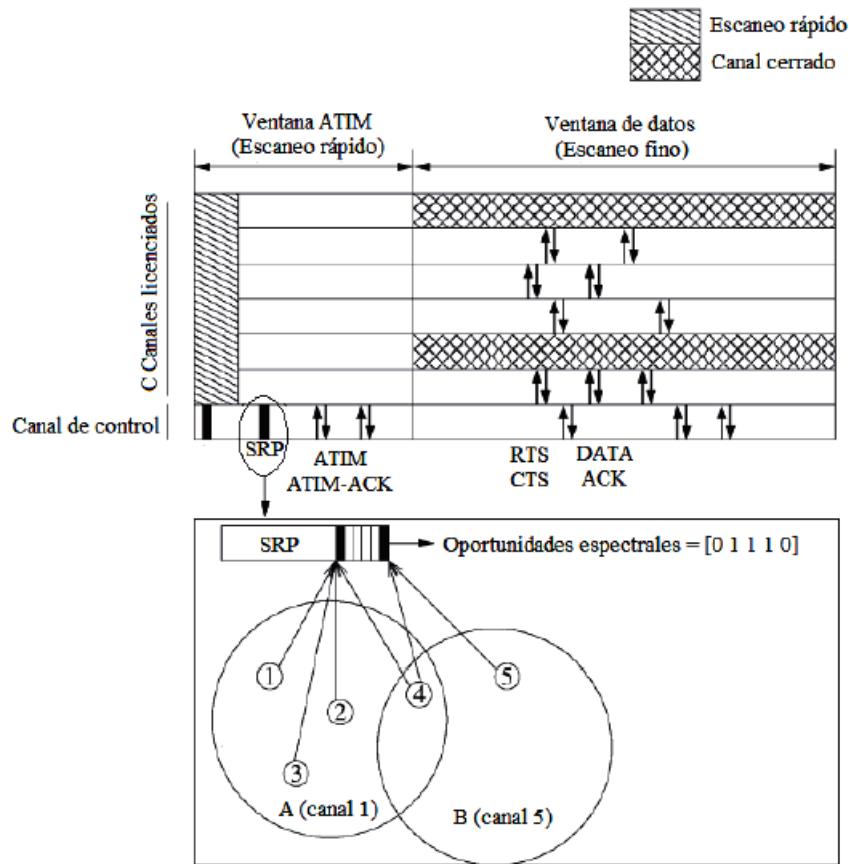
- Cuando no hay PU activo sobre el canal c, SIP[c] = 0.
- Cuando un PU está activo sobre el canal c, SIP[c] = 1.
- Cuando la presencia de un PU es incierta, SIP[c] = 2.

Cuando un nodo se une a la red, realiza un escaneo rápido para cada canal en la ventana ATIM (Ad Hoc Traffic Indication Message). El resultado de ese escaneo es almacenado en el vector SIP. Después del sensado inicial, los valores del vector SIP son actualizados usando los valores del escaneo. El vector SIP es usado para determinar si la red puede usar un determinado canal para la comunicación de datos. Además se emplea para determinar si el nodo requiere programar un nuevo escaneo durante el período de datos, el cual es necesario cuando el valor de SIP de un canal es incierto.

Por otra parte, el vector SCL se usa para seleccionar el canal de comunicación. Este contiene la carga esperada de comunicación CR en cada canal. Cuando un nodo desea transmitir, escoge la oportunidad espectral con SCL el más bajo.

La figura 3 muestra la estructura de tiempo que maneja este protocolo. El tiempo es dividido en intervalos guía de longitud fija en los cuales se distinguen dos fases: la ventana ATIM y la ventana de datos. Durante la ventana ATIM, los nodos realizan un escaneo rápido e intercambian información de control. Durante la ventana de datos tiene lugar el intercambio de datos y el sensado fino.

También durante la ventana ATIM, los nodos conocen las oportunidades espetrales existentes en toda la red escuchando los minislots de C. El protocolo de minislots es inicializado luego de la transmisión o recepción del paquete SRP (Scan Result Packet) que contiene el resultado del escaneo sobre el canal de control. La función de este paquete es asegurar una estrecha sincronización siguiendo la función de sincronización (TFS) de IEEE 802.11.



**Figura 3.** Escaneo y comunicación en paralelo sobre diferentes canales. En el ejemplo los nodos 1-5 aprenden que dos PNs (A y B) están activos sobre los canales 1 y 5.

**Fuente:** Tomado de Timmers (2010).

Si un minislot es sensado como ocupado, a través de un valor de SIP diferente a cero, el canal correspondiente es excluido de la comunicación CR. Los nodos que tienen paquetes almacenados indican el tráfico enviando tramas ATIM sobre el canal de control durante la ventana ATIM. En la trama ATIM, un nodo inserta el canal de preferencia para la transmisión, por ejemplo, el que tenga el SCL más bajo y el estado de su cola. Cada nodo que escuche la trama ATIM actualizará su vector SCL. Si el nodo receptor está de acuerdo con el canal seleccionado, responde con una trama ATIM-ACK. Luego de la ventana ATIM, los nodos que han intercambiado tramas ATIM,

permanecerán activos hasta que se haya completado el intercambio de datos. Los nodos que no transmitieron o no recibieron tramas ATIM entran en un estado de reposo hasta el siguiente intervalo guía.

Durante la ventana de datos no solo se realiza el intercambio de datos sino que además, los nodos que tienen configurado el SIP como incierto efectúan un escaneo fino del canal correspondiente. Este puede ser hecho en paralelo con la comunicación sobre otro canal. Luego, se actualiza el valor SIP para este canal. El intercambio de datos sigue el procedimiento normal de la DCF de IEEE 802.11 con el intercambio RTS/

CTS. Una característica adicional es que se permite a los nodos entrar en un estado de reposo cuando completan el intercambio en la ventana de datos, por ejemplo si la cola de transmisión está vacía.

## ENTORNO DE SIMULACIÓN

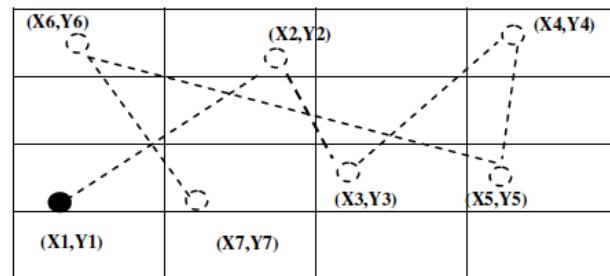
La influencia de los protocolos MAC multicanal en el comportamiento de la red MANET fue evaluada mediante la herramienta de simulación ns-2.31 (UC Berkeley, 2012). En la tabla 1 se especifican los parámetros con los cuales se caracterizó la red.

**Tabla 1.** Parámetros de simulación.

Parámetros	Valor
Área	350 X 400 m
No. de nodos	6
Modelo de movilidad	Random Waypoint
Velocidad de los nodos	5 m/s
Tiempo de pausa	15 s
Interfaz de red	Phy/Wireless Phy
Modelo de propagación	Tworayground
Tipo de antena	Ominidireccional
Protocolo de encaminamiento	AODV
Protocolo de la capa de transporte	TCP
Tamaño de los paquetes	512 bytes
Duración	50 s

**Fuente:** Elaboración propia.

Con el fin de simular el comportamiento de los nodos que componen la red se seleccionó el modelo de movilidad Random Waypoint. En este modelo, los nodos parten de una posición inicial determinada dentro del área asignada y a medida que avanza el proceso de simulación realizan movimientos en zig-zag de manera aleatoria, como lo ilustra la figura 4. Además, cada nodo hace una pausa en la ubicación en que se encuentra para amortiguar los cambios abruptos de dirección. Los movimientos individuales de los nodos fueron generados a través de la herramienta BonnMotion v1.5a (BonnMotion, 2012).



**Figura 4.** Modelo de movilidad Random Waypoint

**Fuente:** Tomado de Bano (2010).

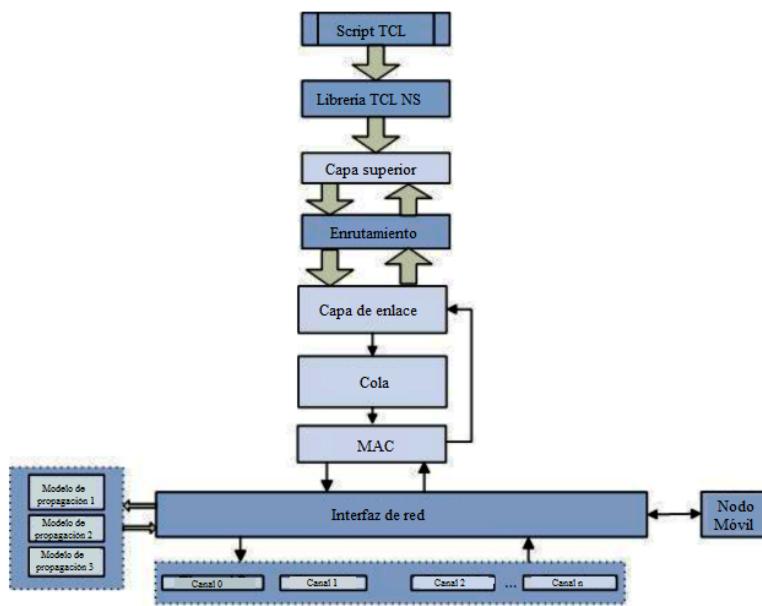
Para verificar la funcionalidad multicanal se usó el simulador CRCN (Cognitive Radio Cognitive Network) propuesto en (NSF, 2011). Esta herramienta provee el protocolo Macng, cuya operación se divide en dos fases. Durante la primera, cada nodo envía paquetes con un canal de recepción preferencial. Si hay un canal libre, este se selecciona como el canal preferencial de recepción. En caso contrario, los nodos comparten el canal con el nodo que se encuentra más distante. Durante la segunda fase, el nodo usa el canal seleccionado en la primera fase para enviar y recibir datos. La figura 5 muestra la estructura de diseño que sigue este protocolo.

En cuanto al encaminamiento, las MANETs requieren algoritmos que se adapten rápidamente a los constantes cambios que sufre su topología para mantener la comunicación entre los nodos que la componen. Por esta razón se usó el protocolo de encaminamiento reactivo AODV (Ad Hoc On Demand Distance Vector Routing) (Perkins, 1999).

En las capas de transporte y aplicación se utilizaron los protocolos TCP (Transmission Control Protocol) y FTP (File Transfer Protocol) respectivamente.

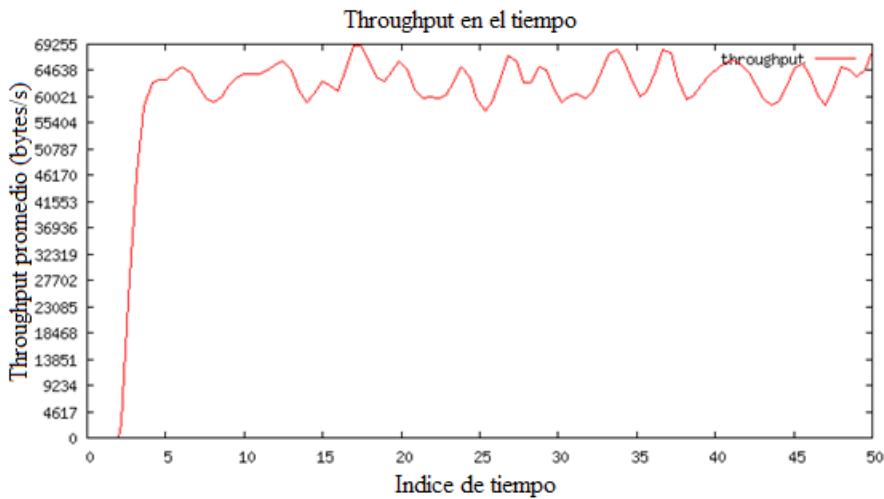
## RESULTADOS

El primer experimento que se realizó fue la implementación de la MANET con el protocolo IEEE 802.11 de un solo canal. El desempeño alcanzado bajo estas condiciones se ilustra en la figura 6.



**Figura 5.** Estructura de diseño del protocolo MMAC-CR.

**Fuente:** Tomado de NSF (2011).



**Figura 6.** Desempeño de la MANET bajo el protocolo IEEE 802.11 con 1 canal.

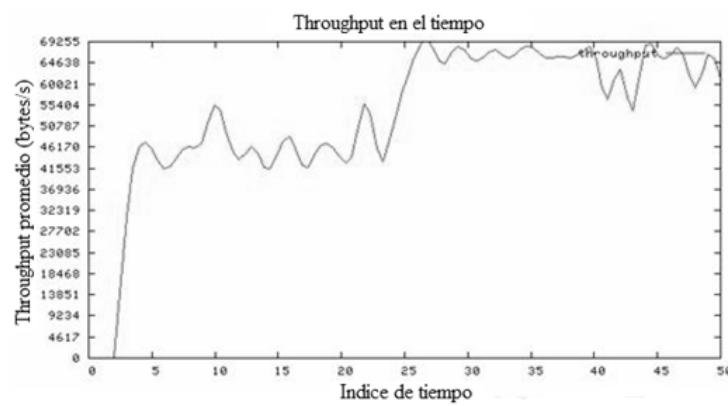
**Fuente:** Elaboración propia.

Luego, se estudió el comportamiento de la red cuando emplea MMAC-CR como protocolo de acceso al medio, pero esta vez utilizando dos canales. El *throughput* obtenido se ilustra en la figura 7.

La figura 8 presenta el *throughput* que alcanza la red cuando utiliza tres canales bajo

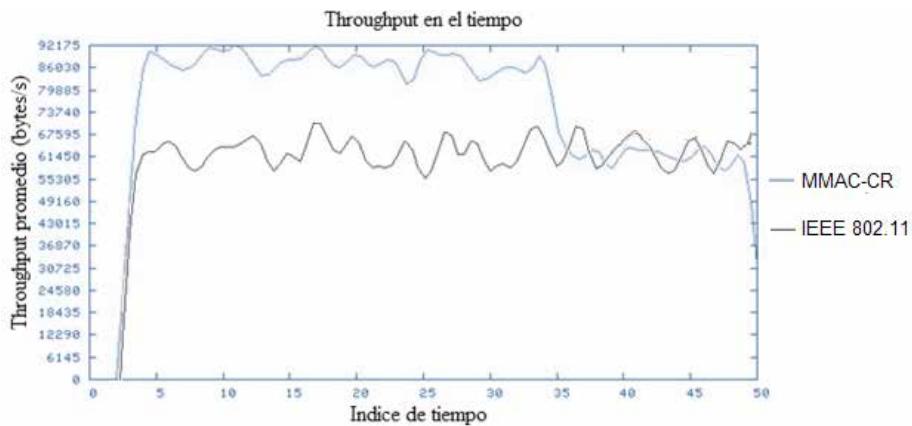
los protocolos IEEE 802.11 y MMAC-CR, respectivamente.

Finalmente, en la figura 9 se exhibe el *throughput* en la red cuando se usan 4 canales en el protocolo MMAC-CR.



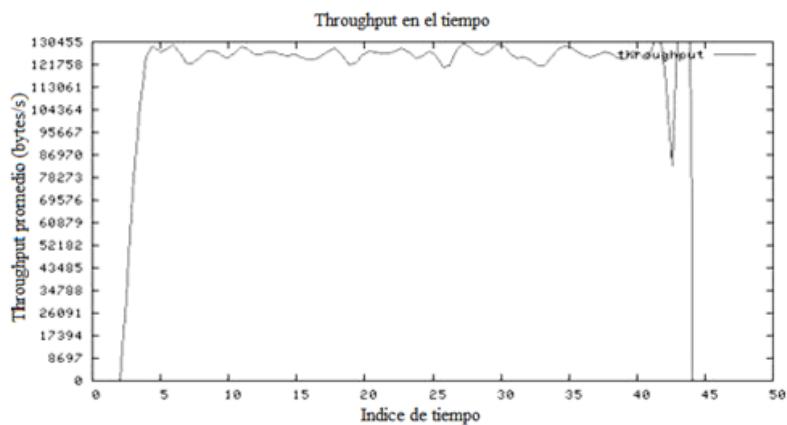
**Figura 7.** Desempeño de la MANET bajo el protocolo MMAC-CR con 2 canales.

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 8.** Desempeño de la MANET bajo los protocolos IEEE 802.11 y MMAC-CR con 3 canales.

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 9.** Desempeño de la MANET bajo el protocolo MMAC-CR con 4 canales.

**Fuente:** Elaboración propia.

## DISCUSIÓN

En esta sección se discuten los resultados obtenidos mediante los experimentos realizados.

En primer lugar, comparando la figura 6 y la figura 8 se observa que el desempeño de la red MANET cuando usa IEEE 802.11 con un solo canal es el mismo que cuando usa IEEE 802.11 con múltiples canales. Este resultado es una consecuencia natural del esquema de control de acceso que emplea este protocolo, el cual se fundamenta en la DCF. El diseño de un protocolo MAC que explote múltiples canales bajo este protocolo es un problema complejo, debido a que cada dispositivo IEEE 802.11 está equipado con un transceptor half-duplex. Aunque el transceptor es capaz de manejar canales dinámicamente, solo puede transmitir o escuchar sobre un canal cada vez. Entonces, cuando un nodo está escuchando sobre un determinado canal, este no puede escuchar las comunicaciones que tienen lugar sobre los demás canales, causando el problema del terminal oculto multicanal. Por tanto, la operación de un protocolo MAC de un solo canal tal como la DCF de IEEE 802.11 no es óptima en un entorno multicanal en donde los nodos pueden cambiar de canal de manera dinámica (So, 2004).

Por otra parte, el desempeño que alcanza la MANET bajo el protocolo MMAC-CR con dos canales es muy similar al IEEE 802.11, como se presenta en la figura 7, como consecuencia de que uno de estos dos canales se emplea como canal de control común. En la figura 8 se observa la ventaja del aumento a un tercer canal, ya que durante los primeros 35 segundos se mejora el *throughput* con el protocolo MMAC-CR en aproximadamente 25%, respecto al IEEE 802.11. Esto se debe a que el tercer canal logra compensar el limitado intercambio de datos que se tenía como consecuencia de la dedicación de un canal exclusivo para información de control. Sin embargo, esta mejora solo es relevante, cuando todos los nodos se encuentran dispersos en el área de simulación y la separación entre cada uno de ellos garantiza un nivel mínimo de interferencia entre sus transmisiones.

En otro aspecto, en la figura 8 luego de 35 s de haberse iniciado la simulación con el protocolo MMAC-CR, se presenta una reducción considerable en el desempeño de la red. Este comportamiento es resultado de las colisiones que se presentan en la red, dada la ubicación de los nodos en el área de simulación, lo que demuestra la gran influencia que tiene la selección del modelo de movilidad en este tipo de redes.

Con la inclusión de un cuarto canal se aprecia una mejoría promedio de alrededor de 50% del *throughput* del protocolo MMAC-CR con respecto al IEEE 802.11, tal como se presenta en la figura 9. Solamente a los 44 s la cantidad de colisiones lleva a que el *throughput* disminuya considerablemente bajo el protocolo MMAC-CR.

## CONCLUSIONES

En este artículo se ha estudiado el desempeño de los protocolos MAC IEEE 802.11 y MMAC-CR en el contexto de las redes MANET. Para ello se ha desarrollado un *script* en el que convergen la herramienta de simulación *NS-2.31*, las mejoras aportadas en (NSF, 2011) y la herramienta de generación de escenarios *BonnMotion v1.5a* (BonnMotion, 2012).

Los resultados de simulación demuestran que una red MANET alcanza mejores niveles de desempeño bajo el protocolo MMAC-CR que con el protocolo IEEE 802.11, a medida que se aumenta el número de canales. Sin embargo, para pocos canales el protocolo IEEE 802.11 presenta un *throughput* muy similar al de MMAC-CR para el modelo de movilidad utilizado.

Las funciones básicas de operación del protocolo IEEE 802.11 han sido claves en el desarrollo de protocolos MMAC-CR, permitiendo la coordinación en la transmisión de los paquetes, la reducción de la interferencia y la sincronización en todas las funciones que a nivel de CR maneja la capa MAC.

Como trabajo futuro se propone un estudio comparativo del desempeño de una red MANET bajo diferentes protocolos multicanal, utilizando diferentes modelos de movilidad.

## FINANCIAMIENTO

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

## REFERENCIAS

- Bahl, P.; Chandra R., and Dunagan J. (2004). SSCH: slotted seeded channel hopping for capacity improvement in IEEE 802.11 Ad-Hoc wireless networks. In: *Proceedings of MobiCom '04*, pp. 216-230.
- Bano, N.; Roppel, T., and Gokhale I. (Mar. 2010). Use of mobility models for communication in collaborative robotics. *Proceedings of System Theory (SSST)*, pp. 143-146.
- BonnMotion, A mobility scenario generation and analysis tool. <http://sys.cs.uos.de/bonnmotion/index.shtml>, Fecha de consulta: marzo 2012.
- De Domenico, A.; Strinati, E., and Di Benedetto, M. (2012). A survey on MAC strategies for cognitive radio networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 14, No. 1, pp. 21-44.
- Federal Comunications Comissions (FCC). Topic 10: License-Exempt wireless applications for public safety. <http://transition.fcc.gov/pshs/techtopics/techtopics10.html>, Fecha de consulta: mayo de 2012.
- Guevara J.; Pedraza L.; Hernández C. Evolución del protocolo MAC multicanal para redes de radio cognitiva. *Tecnura*, vol. 17, No. 36, 2013, pp.129-139.
- Koes, M.; Nourbakhsh I., and Sycara K. Communication efficiency in multi-agent systems. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '04)*, vol. 3, May 2004, pp. 2129-2134.
- National Science Foundation (NSF). Cognitive radio cognitive network simulator. [http://faculty.uml.edu/Tricia\\_Chigan/Research/CRCN\\_Simulator.htm](http://faculty.uml.edu/Tricia_Chigan/Research/CRCN_Simulator.htm), Fecha de consulta: noviembre 2011.
- Perkins, C., and Royer, E. Ad-hoc on-demand distance vector routing. *Second IEEE Workshop on WMCSA '99*, Feb. 1999, pp.90-100.
- So, J., and Vaidya, N. Multi-channel MAC for ad hoc networks. *Proceedings of MobiHoc '04*, 2004, pp. 222-233.
- Timmers, M.; Pollin, S.; Dejonghe, A.; Van der Perre L., and Catthoor, F. A distributed multichannel MAC protocol for multihop cognitive radio networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, No. 1, Jan. 2010, pp. 446-459.



## **Simulación y análisis del comportamiento del BER y Throughput en capa física de WIMAX IEEE 802.16-2004 en ambientes con presencia de AWGN y Rayleigh Fading**

**Simulation and analysis of the BER performance and throughput in WIMAX physical layer IEEE 802.16-2004 in environments with the presence of AWGN and Rayleigh Fading**

Elizabeth Ochoa Torres\*, Manuel Ignacio Castro Olaya\*\*, Ernesto Gómez Vargas\*\*\*

Citation / Para citar este artículo: Ochoa Torres, E., Castro Olaya, M. I., & Gomez Vargas, E. (2014). Simulación y análisis del comportamiento del BER y Throughput en capa física de WIMAX IEEE 802.16-2004 en ambientes con presencia de AWGN y Rayleigh Fading. Revista *Tecnura*, Edición especial, 135-155.

**Fecha de recepción:** 16 de mayo de 2013 / **Fecha de aceptación:** 7 de marzo de 2014

### **RESUMEN**

El estándar de comunicaciones WiMAX IEEE 802.16-2004 está enfocado en dar solución a enlaces de última milla, ya sea para escenarios de enlaces punto a punto, punto multipunto, o topologías de múltiples usuarios móviles conectados a un punto de distribución.

Su correcta implementación depende de los valores de tasa de error de bit (BER) y el rendimiento (*Throughput*); por tanto, una correcta evaluación de la incidencia del ruido blanco gaussiano (AWGN), las múltiples trayectorias (Rayleigh), y desvanecimiento (Fading) sobre las variables de BER y *Throughput* generarán un precedente de evaluación para su aplicación.

Este artículo se ha desarrollado con el objetivo de determinar el comportamiento de WiMAX con el estándar IEEE 802.16-2004 en escenarios controlados con presencia de AWGN y Fading Rayleigh. Para ello, se llevará a cabo la implementación de simulaciones en tres escenarios, los que permitirán

analizar y evaluar su comportamiento ante las variables antes mencionadas.

**Palabras clave:** AWGN, SNR, Fading, BER, Throughput, Rayleigh, OFDM, WIMAX 802.16 – 2004, efecto Doppler.

### **ABSTRACT**

The communication standard IEEE 802.16-2004 WiMAX is focused on providing solutions to last-mile links, either for point-to-point scenarios, point-to-multipoint, or multiple mobile users connected to a distribution point topologies.

Its successful implementation depends on the values of bit error rate (BER) and throughput (Throughput), therefore; an accurate assessment of the incidence of white Gaussian noise (AWGN), multipath (Rayleigh), and fading (Fading) on BER and Throughput variables will generate a precedent of assessment for its application.

\* Ingeniera en telemática, especialista en teleinformática; especialista técnico en desarrollo de software bancario para Cobiscorp. Bogotá, Colombia. Contacto: [eochoat@correo.udistrital.edu.co](mailto:eochoat@correo.udistrital.edu.co)

\*\* Ingeniero electrónico, especialista en teleinformática. (ITLA) Administrador local de tecnologías de la información en Colombia y (ITEA) Agente escalador de tecnologías de la información para GDF Suez Energy Latin America. Bogotá, Colombia. Contacto: [manuel.castro@gdfsuezla.com](mailto:manuel.castro@gdfsuezla.com)

\*\*\* Ingeniero electrónico, magíster en teleinformática, candidato a doctor en ingeniería, docente de planta, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: [egomez@udistrital.edu.co](mailto:egomez@udistrital.edu.co)

This article is developed to determine the performance of the IEEE 802.16-2004 WiMAX standard in controlled environments in presence of AWGN and Rayleigh Fading. In order to do this, three simulation scenarios will be implemented, which will allow

analyzing and assessing its performance under the above-mentioned variables

**Key words:** AWGN, SNR, Fading, BER, throughput, Rayleigh, OFDM, WiMAX 802.16-2004, Doppler Effect.

## INTRODUCCIÓN

WiMAX es una tecnología de gran uso y de última generación que está propagándose actualmente en forma considerable en Europa y en todo el mundo; es un estándar de comunicación inalámbrico de última generación, diseñado para proveer accesos vía radio de alta capacidad a distancias inferiores a 50 kilómetros y con tasas de transmisión de hasta 70 Mbps. (PÉREZ, 2009).

Las soluciones WiMAX se pueden aplicar en multitud de escenarios (enlaces punto a punto, redes metropolitanas, cobertura de hot-spots Wi-Fi, redes empresariales, backbones, entre otros) con alta garantía de disponibilidad y estabilidad; sin embargo, una de las problemáticas más grandes que puede enfrentar WiMAX es la pérdida de la calidad del canal de comunicaciones y su rendimiento por presencia de ruido.

WiMAX enfrenta un gran reto al establecerse como tecnología de última milla inalámbrica, pero su viabilidad de implementación depende de cómo puede asegurar la calidad de la comunicación dado su comportamiento frente a las condiciones ambientales comunes como el ruido, desvanecimiento, interferencias y distorsión.

Para el caso de ambientes con ruido, modelado como ruido blanco gaussiano, y desvanecimiento por múltiples trayectorias, es fundamental simular y encontrar los valores de razón entre la potencia de la señal y la del ruido (SNR), que es un factor determinante sobre la incidencia de la tasa de error de bit (BER) y el rendimiento (*Throughput*), lo que establece la calidad de la comunicación y mide el grado de confiabilidad para la aplicación de esta tecnología.

En la sección 2 del artículo se presentará la metodología a seguir, en la sección 3 se dará una

breve descripción de los conceptos clave en el proceso de simulación y estado del arte de esta tecnología, la sección 4 iniciará con el análisis de las simulaciones para los tres escenarios plantados con sus respectivos resultados, y en la sección 5 se presentarán conclusiones.

## METODOLOGÍA

En la actualidad no se cuenta con herramientas de aprendizaje y simulación de la capa física de WiMAX estándar IEEE 802.16-2004; por este motivo se propone la implementación de un aplicativo o uso de herramientas de simulación.

Para esto se realizó un análisis de las herramientas de laboratorio matemático existentes (entre las estudiadas están Octave y Matlab), y se encontró que Matlab cuenta con herramientas y bloques ya implementados que permiten efectuar el proceso de simulación de manera óptima y más rápida.

Una vez seleccionada Matlab como herramienta de simulación y construido el modelo de simulación del canal de comunicación de capa física con el estándar WiMAX IEEE 802.16-2004, se plantea crear tres escenarios en donde se identifique la transmisión ideal y se ponga a prueba la estructura de transmisión y recepción, aplicando variaciones en el modelo del medio físico del canal con adición de ruido blanco gaussiano con diferentes valores de simulación para el segundo escenario, y en un tercer escenario se adiciona un bloque de fading Rayleigh, en donde se aplican variaciones de frecuencias Doppler para evaluar este efecto con uno de los puntos como equipo móvil.

En los tres escenarios se hacen mediciones de BER y Throughput haciendo comparación de la información original trasmitida y la información recibida en receptor con la estructura WiMAX.

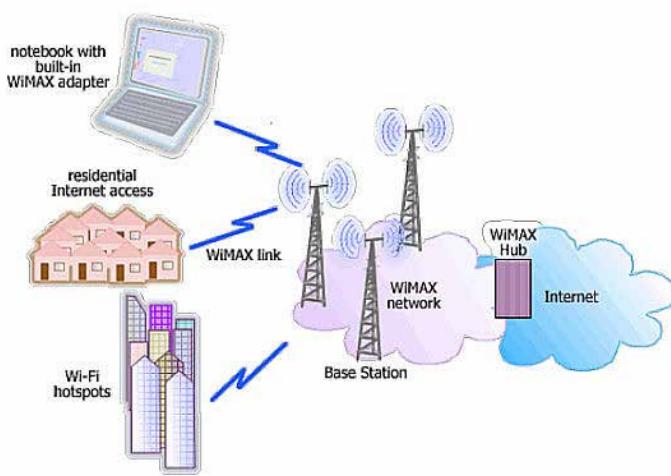
## WIMAX

World wide interoperability for microwave access (WIMAX) es una solución de acceso inalámbrico de banda ancha para servicios de última milla que implementa calidad de servicio (QoS) para ofrecer diversos servicios (Al-Adwany, 2010); este esquema se presenta en la figura 1.

El objetivo de Wimax es complementar al estándar existente conocido como WiFi, ya que WiFi

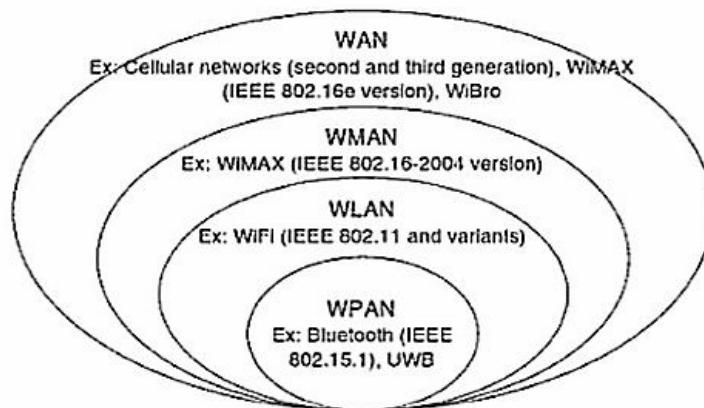
se diseñó con el fin de permitir la creación de redes inalámbricas locales, mientras que WIMAX está concebido para la creación de redes inalámbricas metropolitanas (WMAN).

Entre las características más representativas de WIMAX, encontramos que establecen o formulan un alcance de hasta 7 km para enlaces punto-multipunto sin línea de vista y además presentan un alcance de hasta 50 km en enlaces punto a punto con línea de vista; para este último se cuenta con



**Figura 1.** Visión general del ecosistema WiMAX.

**Fuente:** Tomado de (Cadavieco, 2012).



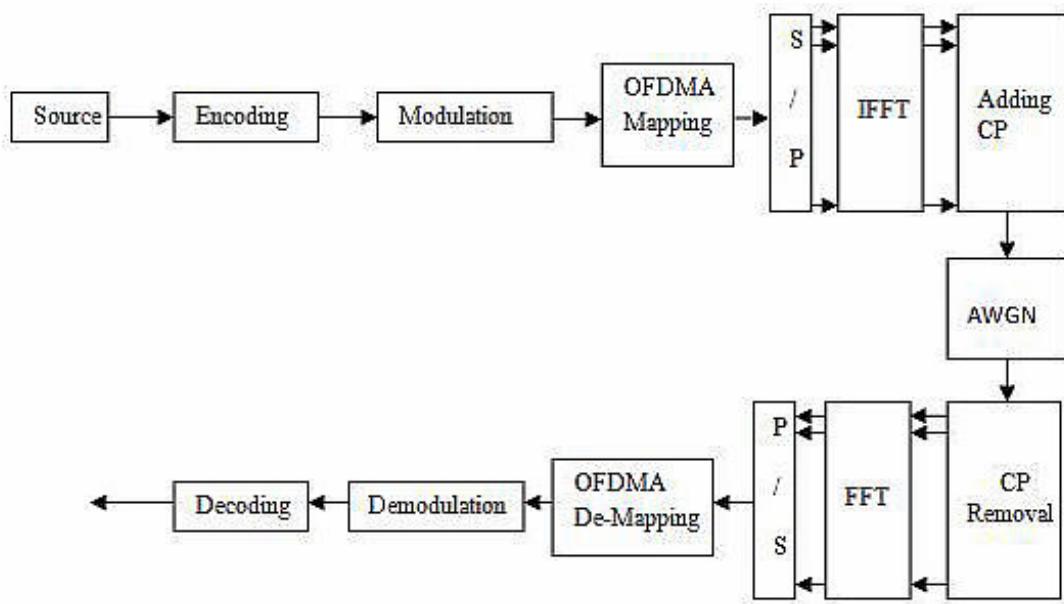
**Figura 2.** Tipos de redes.

**Fuente:** Tomado de (Nuaymi, 2007).

un ambiente sin presencia de obstáculos entre la estación suscriptora, conocida como SS (Subscriber Station), y la estación base llamada BS (Base Station), permitiendo así establecer tasas de transmisión de hasta 70 Mbps.

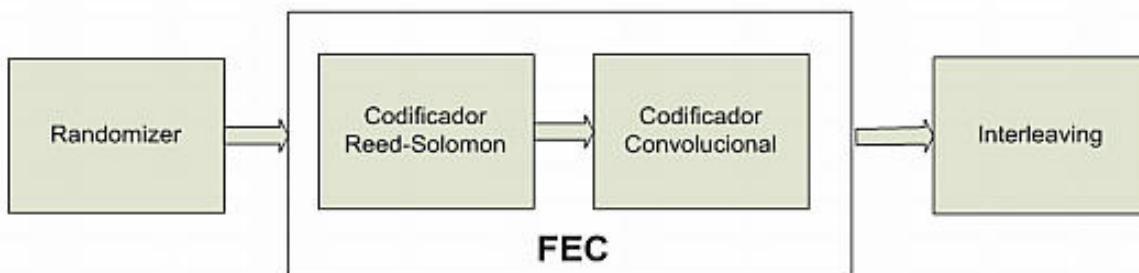
Un aspecto notable de la capa física de Wimax es que implementa para garantizar la comunicación, sistemas de codificación y modulación adaptativa permitiendo tasas de transmisión variables con base en la calidad de la señal recibida; a mejor señal, mayor tasa de transmisión (PÉREZ, 2009).

### Etapas del estándar WIMAX IEEE 802.16-2004: modelo general



**Figura 3.** Esquema general de bloques de capa física WiMAX 802.16 -2004.

**Fuente:** Tomado de (Jamal Mountassir, 2011 ).



**Figura 4.** Diagrama de bloques codificador de canal.

**Fuente:** Tomado de (José Andrés Marzo Icaza, 2011).

**Etapa de corrección de errores:** Este proceso, como puede observarse en la figura 4, está compuesto por dos bloques; primero implementa un codificador externo Reed-Solomon, y a la salida de este se tiene otro bloque que efectúa un codificador interno Convolutional. El codificador Reed-Solomon está concebido para corregir errores de ráfaga sobre los bytes, lo cual garantiza efectividad en la corrección de errores en escenarios con presencia de múltiples trayectorias. El codificador convolucional está propuesto en este estándar para corregir errores de bits independientes. (José Andrés Marzo Icaza, 2011).

**Randomizer:** Este proceso garantiza la protección a los datos introduciendo incertidumbre teórica en la información, con el objetivo de evitar grandes cadenas de repetición de unos o ceros. Este procedimiento de aleatorización de bits se realiza en los canales de subida y bajada. (Licea, 2009).

**Codificador FEC:** En este proceso WiMAX maneja varios tipos FEC según la medición de SNR del canal de manera automática adaptativa, y se define como el proceso en donde se agrega bits adicionales que establecen redundancia en los bloques de información con el fin de detectar y

corregir los posibles errores durante su transmisión y recepción en el canal inalámbrico; dentro del modelo se establecen la aplicación de códigos convolucionales Reed-Solomon, obligatorios para los canales subida y bajada, definido por el estándar IEEE 802.16. Adicionalmente, de manera optativa se pueden aplicar códigos turbo convolucionales y códigos de turbo bloques (Licea, 2009).

Los FEC usados se especifican de acuerdo con el tipo de modulación, el estándar presenta siete combinaciones de modulación (ver la tabla 1) con sus respectivas tasas de codificación, tasa de codificación del codificador convolucional con sus siglas CC (code rate) y tasa de codificación total (código convolucional más Reed-Solomon “Overall coding rate”), las cuales sirven para garantizar la corrección de errores dependiendo del tipo de modulación usado, esto se conoce como modulación adaptativa. (Ver la figura 5).

La tasa de codificación hace referencia a la relación de los datos sin codificar comparados con los datos codificados, la columna “RS code” reseña el código red Solomon usado (N, K, T), en donde: N es el número total de bytes después de la codificación, K es el número total de bytes antes

**Tabla 1.** Codificación por modulación.

Modulation	Uncoded block size (bytes)	Code block size (bytes)	Overall coding rate	RS code	CC code rate
BPSK	12	24	1/2	(12,12,0)	1/2
QPSK	24	48	1/2	(32,24,4)	2/3
QPSK	36	48	3/4	(40,36,2)	5/6
16-QAM	48	96	1/2	(64,48,8)	2/3
16-QAM	72	96	3/4	(80,72,4)	5/6
64-QAM	96	144	2/3	(108,96,6)	3/4
64-QAM	108	144	3/4	(120,108,6)	5/6

**Fuente:** Tomado de (Committee, 2004).

de la codificación,  $T$  es el número total de bytes que pueden ser corregidos. (Committee, 2004).

**Interleaver:** Este proceso permite proteger la información contra secuencias largas y consecutivas de errores (errores de ráfaga), posibilitando solo la presencia de errores aleatorios haciendo una distribución de los bits errados por medio de un proceso de entrelazado en grupos diferentes de corrección, ya que los errores de ráfaga afectan gran número de bits consecutivos, y es una de las causas más frecuentes que ocasionan gran pérdida de información. (Licea, 2009).

**Modulación:** Una vez que la información es codificada, debe ser modulada utilizando una de las siguientes constelaciones: BPSK, QPSK, 16QAM o 64QAM; para poder transmitirla. Estas constelaciones pueden modular 1, 2, 4 y 6 bits por símbolo, respectivamente.

Una constelación constituye una secuencia de bits como una secuencia de símbolos representados por valores complejos (Licea, 2009).

Las modulaciones establecidas para enlaces de bajada y subida son BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM; sus constelaciones se muestran en la figura 6 (José Andrés Marzo Icaza, 2011).

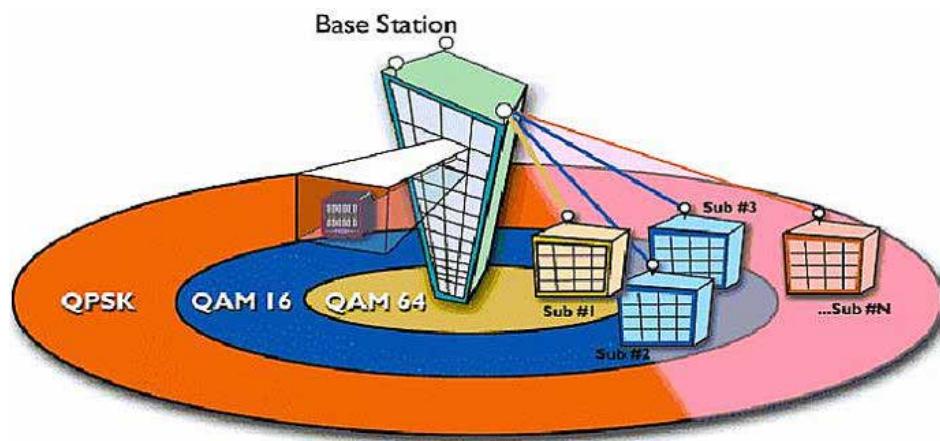
**OFDM:** La multiplexación por división de frecuencias ortogonales usa la transformada rápida de Fourier o FFT logrando una transmisión por

medio de subportadoras paralelas, eliminando en lo posible la interferencia o traslape entre ellas. El número de subportadoras está dado por el número de muestras que usa la FFT, NFFT. (Zhao, 2011).

Este modelo permite crear redes de radiodifusión de frecuencia única sin que existan problemas de interferencia, ya que las señales se envían al receptor con diferentes retardos y amplitudes. (Izaskun Pellejero, 2006). (Ver la figura 7).

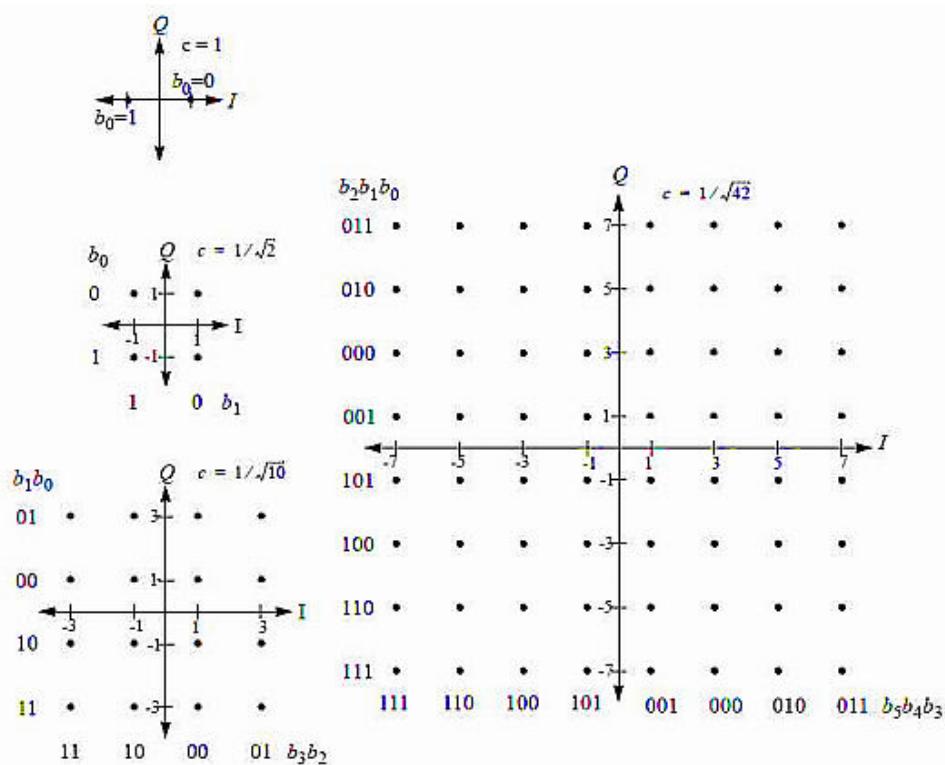
La modulación por división ortogonal de frecuencias (OFDM) es un esquema de modulación/demodulación multiportadora (WESTE, 1998), por lo que su uso se da de manera natural para aplicaciones de banda ancha.

En la figura 8 se puede notar la diferencia existente entre una típica comunicación monoportadora, conocida por sus siglas SC (Single carrier) y una comunicación con múltiple portadora (Multiple carrier) dentro del mismo ancho de banda de transmisión; para el primer caso de SC cada símbolo se transmitiría en forma serial, en un ancho de banda definido en comparación con una comunicación múltiples portadora, en donde los símbolos se envían paralelamente en subportadoras adyacentes, usando algún tipo de multiplexación por división de frecuencias (FDM) y empleando el concepto de ortogonalidad de frecuencias. (Ver la figura 8).



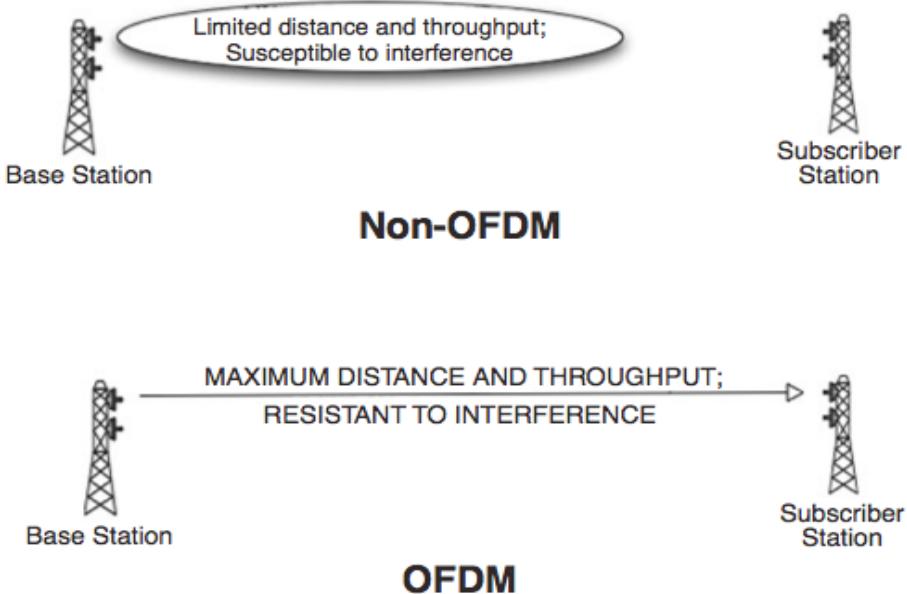
**Figura 5.** Modulación adaptativa de capa física WIMAX 802.216- 2004

**Fuente:** Tomado de (Pascual, 2007).



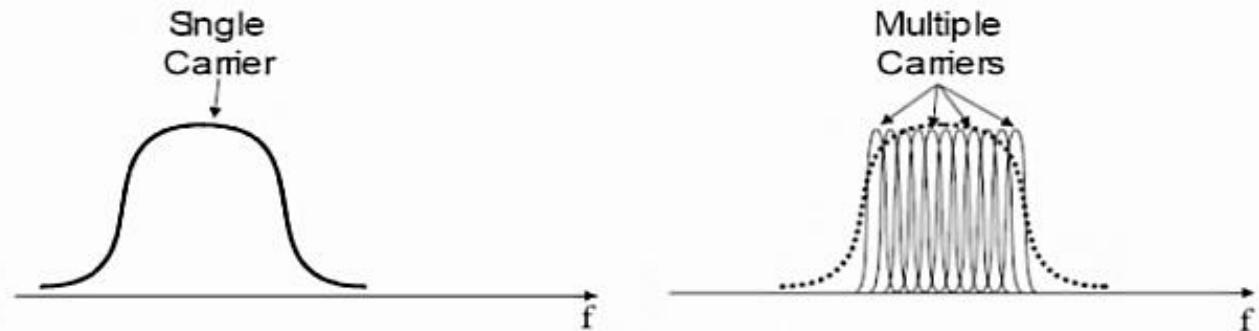
**Figura 6.** Constelaciones usadas en el estándar IEEE 802.16-2004.

Fuente: Tomado de (José Andrés Marzo Icaza, 2011).



**Figura 7.** Importancia de usar OFDM.

Fuente: Tomado de (OHRTMAN, 2005).



**Figura 8.** Comparación entre transmisión SC y multiportadora (OFDM).

Fuente: Tomado de (Communication, 2003).

Empleando  $N$  sub-portadoras ortogonales en un sistema OFDM cualquiera, separadas en frecuencia por el valor correspondiente a la inversa del tiempo útil del símbolo OFDM, con un período en donde transmiten  $N$  símbolos independientes codificados por QPSK, 16-QAM, 64-QAM o cualquier otro tipo de modulación I/Q (González, 2008), se tiene que la señal modulada se da en términos de la siguiente expresión (1):

$$s(t) = \sum_{k=1}^N A_k \cos \left[ \left( \omega_c + \frac{2\pi k}{T_u} \right) \cdot t + \theta_k \right] \quad (1)$$

En donde  $A_k$  y  $\theta_k$  son todos los posibles valores, de acuerdo con su constelación usada.

Se puede demostrar ortogonalidad entre sub-portadoras si cada fase y amplitud se mantienen estables durante todo el período del símbolo (González, 2008), demostrando así que para  $m$  y  $n$  se cumple que: (2)

$$\int_{T_u} A_m e^{j \left( \left( \omega_c + \frac{2\pi m}{T_u} \right) t + \theta_m \right)} \cdot A_n e^{-j \left( \left( \omega_c + \frac{2\pi n}{T_u} \right) t + \theta_n \right)} dt = 0 \quad (2)$$

Para el desarrollo del presente artículo se tomó  $n = 256$ .

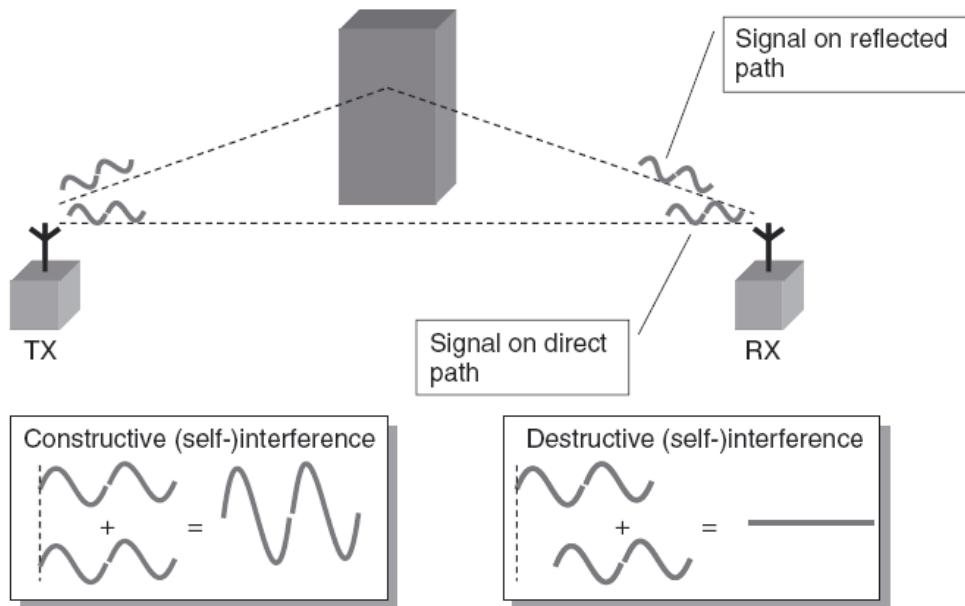
### Fenómenos que interfieren en la transmisión de señal WIMAX

**Fading Rayleigh:** este concepto define el desvanecimiento de la señal debido a múltiples trayectos o múltiples caminos de llegada al receptor que puede tomar las ondas de radio propagadas en el espacio por un emisor (Jamal Mountassir, 2011); estas ondas al ser reflejadas por obstáculos llegan al receptor con un desfase de las señales entre ellas, debido a los caminos recorridos en la propagación, y esto ocasiona una interferencia destructiva y anula la señal, o una constructiva que la incrementaría en caso contrario (Molisch, 2011); ver la figura 9.

**Espectro Doppler de tipo Jakes:** En su libro (William, 1975), Jakes popularizó un modelo de desvanecimiento Rayleigh basado en la suma de sinusoides, en el que los dispersores se distribuyen uniformemente alrededor de un círculo en ángulo  $\alpha_n$  con  $k$  rayos que salen de cada dispersor. El efecto Doppler en rayos  $n$  es (3):

$$f_n = f_d \cos(\alpha_n) \quad (3)$$

El desvanecimiento de Rayleigh de la  $k^{th}$  forma de onda en el tiempo  $t$  y con  $M$  dispersores (William, 1975) puede ser modelado como (4):

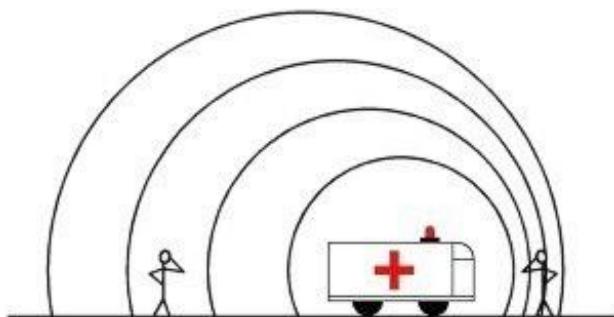


**Figura 9.** Ejemplo de Fading Rayleigh.

Fuente: Tomado de (Molisch, 2011).

$$R(t, k) = 2\sqrt{2} \left[ \sum_{n=1}^M (\cos b_n + j \sin b_n) \cos(2\pi f_n t + q_{n,k}) + \frac{1}{\sqrt{2}} (\cos \alpha + j \sin \alpha) \cos(2\pi f_d t) \right] \quad (4)$$

El modelo Jakes popularizó el espectro Doppler (ver la figura 10) asociado con desvanecimiento por Rayleigh y, como resultado, el espectro Doppler se denomina a menudo espectro Jakes. (Patrick Robertson, 1999).



**Figura 10.** Efecto Doppler.

Fuente: Tomado de (Iuveticus, 2003).

**AWGN:** El ruido blanco aditivo gaussiano es el patrón o ruido particular empleado para establecer pruebas sobre canales de comunicación inalámbrica, y se determina como la sumatoria de todos los ruidos. Particularmente es análogo en comparación con el caso de color blanco, de donde viene parte de su nombre, que representa la suma de todos los colores. Este modelo de ruido está planteado matemáticamente con una distribución de probabilidad gaussiana. En la aplicación de AWGN durante los procesos de modelamiento de ambientes, se realiza en combinación con la señal de información en el canal, limitando la transmisión de información por la aparición de errores de identificación. (Javvin, 2007).

## RESULTADOS

### Escenario sin ruido

Este escenario está desarrollado a partir del modelo presentado en el artículo “Channel models for fixed wireless applications” (Erceg, 2003), el cual presenta el modelo de capa física de WiMAX, estándar IEEE 802.16-2004; el modelo para simulación ha sido modificado para incluir solo tres elementos propios del sistema que se pueden ver como cajas de fondo azul en la figura 11, con los siguientes nombres: Fuente de información (Random Data Source, generador de Bernulli), transmisor WiMAX y receptor WiMAX.

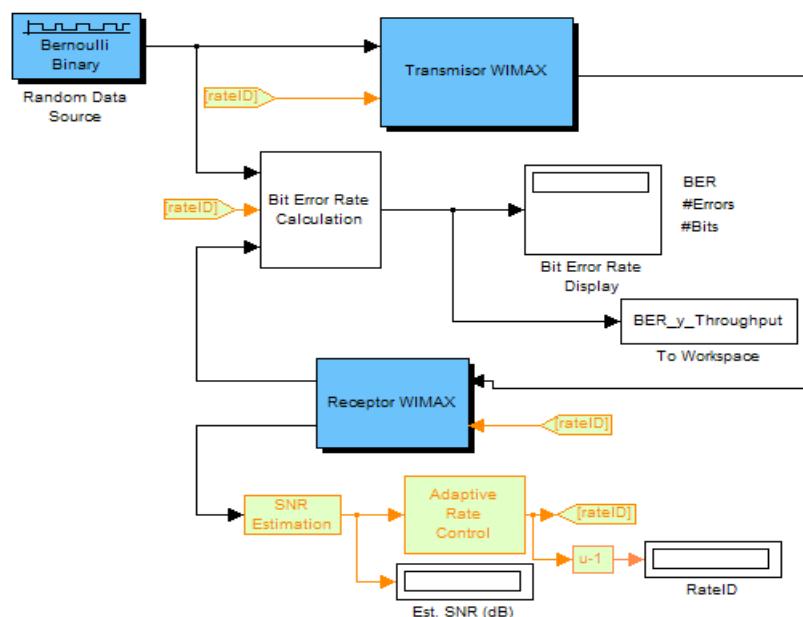
A diferencia del modelo inicial se incluye un bloque que exportaba directamente los valores de BER y Throughput para ser tabulados y analizados.

El objetivo de este escenario de simulación es poder ver cuáles serán las condiciones de BER y Throughput para el sistema de capa física de WiMAX en condiciones ideales y poder efectuar las comparaciones con un sistema con perturbaciones.

Los resultados obtenidos son los esperados; se encontró un BER con valor constante igual a 0 dB, durante un período de simulación de 695 frames que equivalen en tiempo a 0,05 segundos de transmisión, lo que indica que es un canal con ausencia de ruido y perturbaciones externas; la capa física no presenta errores de comunicación, y además se encontró que la eficiencia depende de su último nivel de modulación, que opera con un paquete de 856 bits de información por frame, para un sistema que trabaja con modulación 64 QAM 3/4 (ver la tabla 2).

**Tabla 2.** Tipo de modulación vs. bits de entrada.

Tipo de modulación	Bits de entrada
BPSK 1/2	88
QPSK 1/2	184
QPSK 3/4	280
16 QAM 1/2	376
16 QAM 3/4	568
64 QAM 2/3	760
64-QAM 3/4	856



**Figura 11.** Diagrama de bloques canal sin ruido WiMAX 802.16-2004.

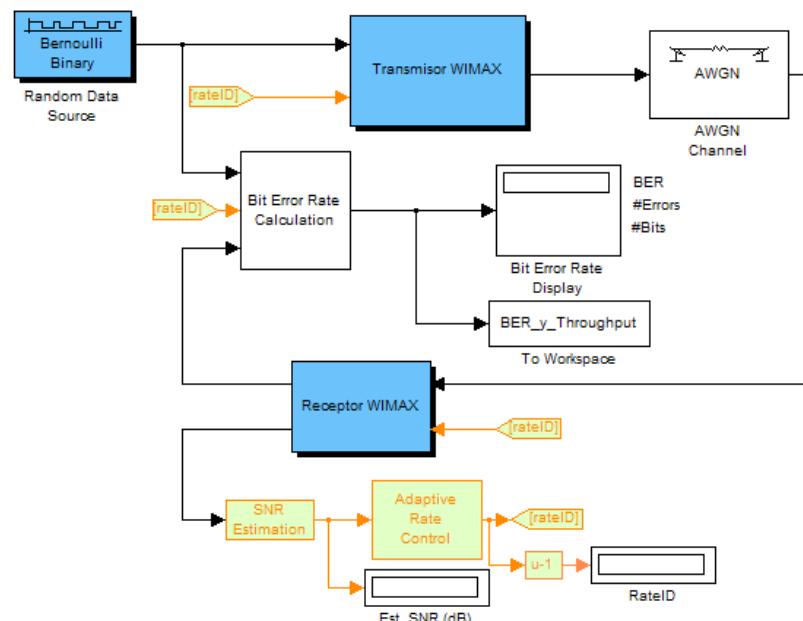
## Escenario con ruido (AWGN)

Para el siguiente escenario (figura 12), se adicionó un bloque de simulación de ruido blanco gaussiano en el canal de comunicación. En este bloque se harán unas variaciones de SNR con el objetivo de ver el comportamiento del modelo ante un canal en presencia de AWGN. Los valores de SNR son aleatorios conforme a una distribución gaussiana, en donde el radio de variación es el valor nominal cargado en el bloque como valor central de variación de SNR en el canal; en otras palabras, los

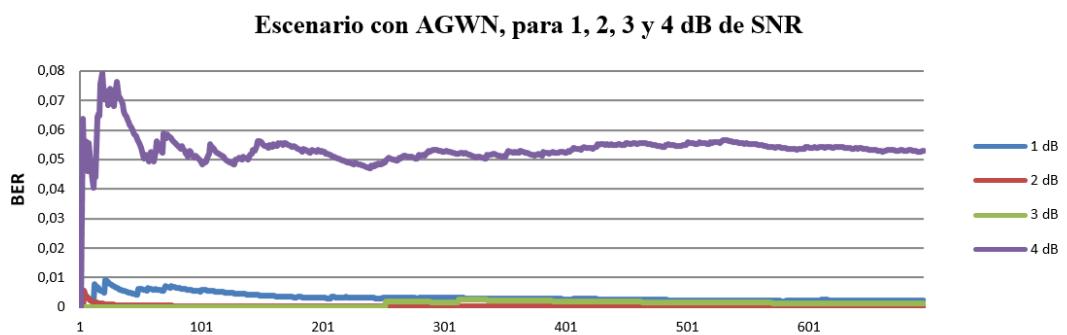
valores tabulados para los ensayos no son valores absolutos y por el contrario, son un radio de aproximación de valores en el tiempo.

En este escenario se emplearon los siguientes radios de SNR: 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 11, 12, 13, 16, 19, 20, 21, 22, 23, 26 y 29 dB.

En las ilustraciones 13, 14 y 15 se muestran los resultados obtenidos a nivel de BER para los diferentes radios de SNR usados cuyo comportamiento fue notable; para los valores centrales de SNR 8 y 13 dB en adelante, se obtuvieron resultados continuos en 0 dB, de manera que no se tienen en cuenta en las gráficas.



**Figura 12.** Diagrama de bloques canal con ruido WIMAX 802.16-2004.



**Figura 13.** Escenario 2 BER 1 a 4 SNR.

En la figura 13 se puede observar que los valores más altos a nivel del BER se establecen para un valor nominal de radio SNR igual a 4 dB; la razón para la presencia de un alto BER son dos: la primera es que este se encuentra en el sector de más baja relación señal a ruido (canal en las peores condiciones en presencia de ruido), y la segunda y más representativa es que se presentan errores de interpretación al estar comutando entre los márgenes de cambio de modulación BPSK y QPSK, de acuerdo con los valores de SNR según la distribución aleatoria gaussiana (AWGN) (ver la tabla 3). Esta transición automática entre estos dos tipos de modulación ocasiona grandes contratiempos en la recuperación de la información, debido a ello el proceso de recuperación que se encargará de la integridad de la información queda delegado a las capas superiores (técnicas de retransmisión).

**Tabla 3.** Saltos de modulación, de acuerdo con la relación señal a ruido.

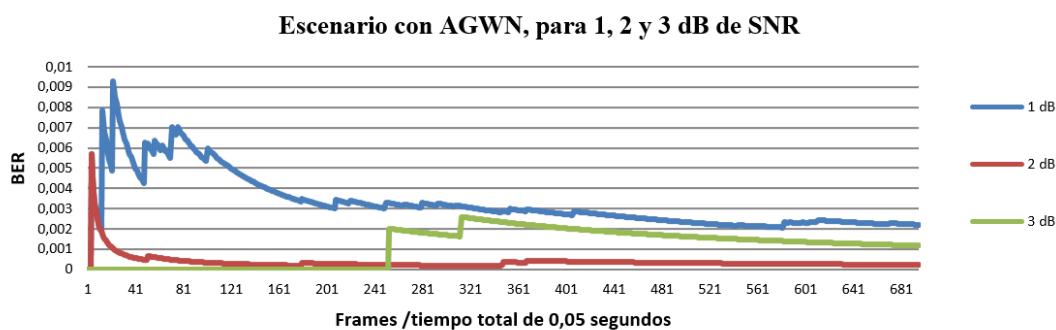
Modulación	Tasa de codificación total	SNR
BPSK	1/2	0 dB < SNR <= 4 dB
QPSK	1/2	4 dB < SNR <= 10 dB
QPSK	3/4	10 dB < SNR <= 12 dB
16-QAM	1/2	12 dB < SNR <= 19 dB
16-QAM	3/4	19 dB < SNR <= 22 dB
64-QAM	2/3	22 dB < SNR <= 28 dB
64-QAM	3/4	29 dB < SNR

La tabla 3 describe los márgenes de cambio, para los tipos de modulación y FEC empleados según la presencia SNR medida en el receptor (es medida únicamente en el receptor, dado que el modelo planteado es un canal de Link Down).

Puede notarse que el sistema no solo cambia de tipo de modulación de manera automática dependiendo del SNR, sino que además se encuentran divisiones que determinan el tipo de FEC empleado en cada modulación (robustez del FEC); esto permite generar más confiabilidad dentro de cada subnivel que representa las peores condiciones de ruido en los segmentos de cada modulación.

En la figura 14 se retira la traza de 4 dB para poder observar el comportamiento en detalle de los valores 1, 2 y 3 dB de SNR; se puede notar que aunque siguen estando en las peores condiciones de señal a ruido, se comportan mejor que 4 dB; esto se debe a que la variación de radios de SNR no se encuentra en el margen de salto de modulación.

En la figura 15 se puede ver que los valores graficados se encuentran en condiciones relación a ruido medias, y con relación a los valores de la gráfica anterior se ve que el valor del BER disminuye a más de la mitad; esto indica que con una relación señal a ruido mayor que 4 dB la cantidad de bits errados en la transmisión disminuye con respecto a los valores pico de 4 dB a 6 dB de SNR en una proporción de 88%.



**Figura 14.** Escenario 2 BER 1 a 3 SNR.

Para resumir, se cuenta con las simulaciones del primer grupo (1, 2, 3 y 4 dB), que representan las peores condiciones y que contienen los índices más altos de bits errados (mayores BER) en comparación con los demás valores de SNR, la proporción de valor promedio de BER para 4 dB con respecto al primer grupo nombrado es 49 veces mayor y con respecto al primer valor de SNR del siguiente grupo (6, 8, 10, 11, 12, 13, 16, 19, 20, 21, 22, 23, 26, y 29 dB) es 346,9 veces mayor, aclarando que a medida que aumenta el valor de SNR los valores de BER disminuyen notablemente hasta llegar a cero.

Con base en esto se puede afirmar que el canal tiene mejores condiciones de transmisión y que se envía mayor cantidad de información, ya que emplean tipos de modulación que permiten mayor número de símbolos en la transmisión, de acuerdo con los valores de SNR dados.

Para los valores de radio de SNR iguales a 8 dB y superiores e iguales a 13 dB, el BER se comporta con un valor constante igual a cero, lo que garantiza que la información recibida en el escenario de un canal en presencia de AWGN no trae errores, o si los presenta, los códigos FEC son suficientemente robustos para corregirlos en la capa física de este modelo.

En las figuras 16 a 18 se puede observar claramente el comportamiento del throughput, únicamente para los valores de radio de SNR que

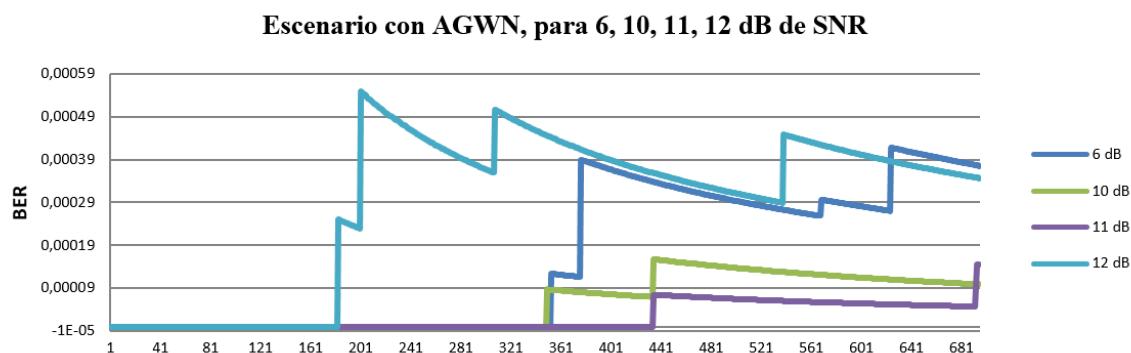
se encuentren en el margen de salto de modulación (ver la tabla 3) se verán cambios bruscos.

En las figuras 16 y 17 se puede observar un nivel de Throughput estable en 88 bits por frame para los valores de radio de SNR iguales a 1 y 2 dB, en 3 dB se ven dos pequeños saltos de 88 a 184 bits por frame, y en 4 dB se ve secuencias de cambios bruscos entre 88 y 184 bits por frame a nivel de Throughput; esto se relaciona con el número de bits que recibe cada bloque de modulación, dado que se presenta un salto entre tipos de modulación por el valor de SNR variante en el tiempo. Los bits por frame en BPSK serán de 88 y para QPSK  $\frac{1}{2}$  serán de 184; esto se puede ver en la tabla 2.

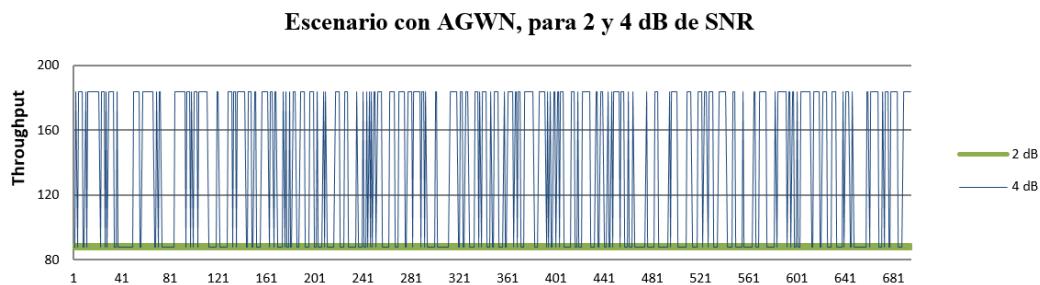
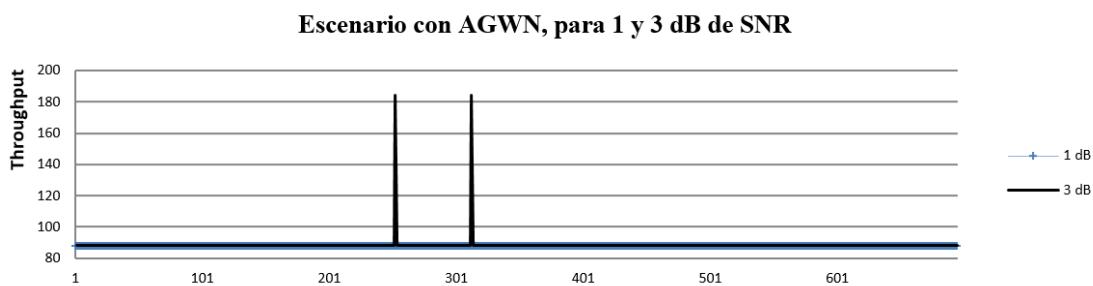
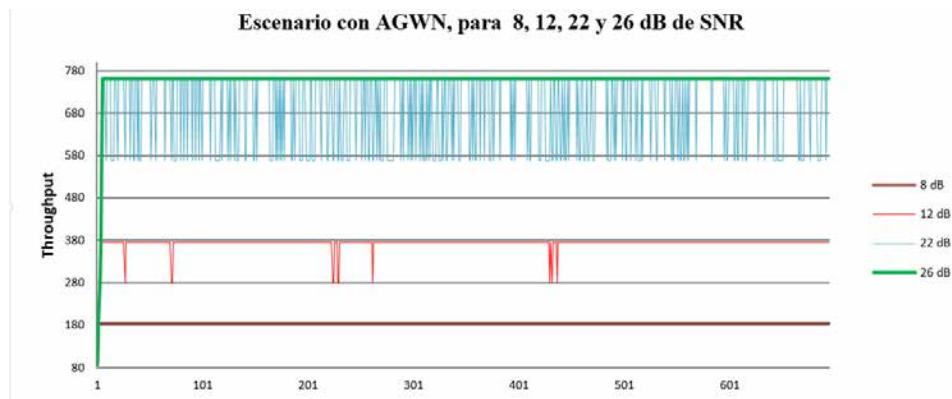
La información totalizada de los valores de BER para un período de 0,05 segundos con 695 frame se encuentra en la tabla 4.

**Tabla 4.** Valores BER Escenario 2.

Valor central de SNR	Valor promedio por frame	Valor central de SNR	Valor promedio por frame
1	0,003312068	13	0
2	0,000359569	16	0
3	0,001093574	19	0
4	0,053587685	20	0
6	0,000154475	21	0
8	0	22	0
10	5,5818E-05	23	0
11	2,22485E-05	26	0
12	0,000288637	29	0

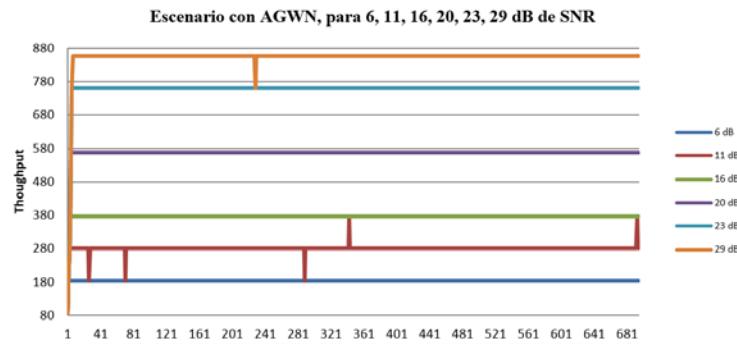
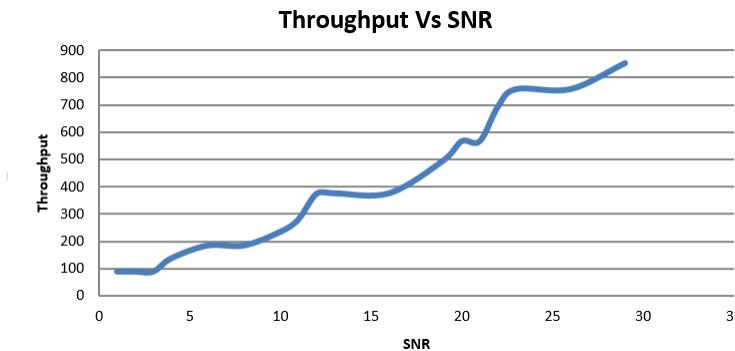


**Figura 15.** Escenario 2 BER 6, 10, 11, 12 SNR.

**Figura 16.** Escenario 2 Throughput 2 y 4 SNR.**Figura 17.** Escenario 2 Throughput 1 y 3 SNR.**Figura 18.** Escenario 2 Throughput 8, 12, 22, 26 SNR.

En las figuras 18 y 19 se puede ver con claridad nuevamente los valores de radios SNR de frontera para los diferentes tipos de modulación (ver la tabla 3); adicionalmente aquellos valores que no se encuentran o no varían sobre los valores de cambio de modulación permanecen con un Throughput de gran estabilidad o constante, según el tipo de modulación y bloque FEC empleado con relación a la señal a ruido del canal (ver la tabla 2).

En resumen, se tiene que 6 dB y 8 dB permanecen estables en 184 bits por frame con relación al tipo de modulación QPSK  $\frac{1}{2}$ , 16 dB permanece estable en 376 bits por frame de acuerdo con el tipo de modulación 16 QAM  $\frac{1}{2}$ , 20 dB permanece estable en 568 bits por frame que hace referencia al tipo de modulación 16 QAM  $\frac{3}{4}$ , 23 dB y 26 dB permanecen estables en 760 bits por frame que es modulación 64 QAM  $\frac{2}{3}$ .

**Figura 19.** Escenario 2 Throughput 6, 11, 16, 20, 23, 29 SNR.**Figura 20.** Escenario 2 Throughput en función de SNR.

Además 11 dB oscila entre 184 bits por frame con relación al tipo de modulación QPSK  $\frac{1}{2}$  y 280 bits por frame que es modulación QPSK  $\frac{3}{4}$ , 12 dB oscila entre 376 bits por frame en modulación 16 QAM  $\frac{1}{2}$ , y 280 bits por frame por modulación QPSK  $\frac{3}{4}$ , 22 dB fluctúa entre 568 bits por frame con relación al tipo de modulación 16 QAM  $\frac{3}{4}$  y 760 bits por frame en modulación 64 QAM  $\frac{2}{3}$ , 29 dB cambia entre 760 bits por frame por modulación 64 QAM  $\frac{2}{3}$  y 856 bits por frame con relación al tipo de modulación 64-QAM  $\frac{3}{4}$ .

Existen dos valores de SNR que tienden a estabilizarse en un punto, estos son: primero 26 dB que se estabiliza en 64 QAM  $\frac{2}{3}$  (figura 18) y segundo, 29 dB que se estabiliza en 64-QAM  $\frac{3}{4}$  (figura 19).

Finalmente, se muestra la tabla 5 con los datos recolectados; estos valores se usaron para construir la respectiva curva de Throughput por frame en función de SNR de la figura 20.

**Tabla 5.** Tabla de valores throughput, Escenario 2.

Valor de SNR (dB)	Acumulado en 0,03 segundos 5 (bits)	Valor promedio por frame (bits)	Throughput (bits) / segundo
1	61160	88	1223200
2	61160	88	1223200
3	61352	88,27666	1227040
4	95336	137,1741	1906720
6	127784	183,8619	2555680
8	127784	183,8619	2555680
10	162632	234,0029	3252640
11	194216	279,4475	3884320
12	259592	373,5137	5191840
13	260744	375,17122	5214880
16	260744	375,17122	5214880
19	344648	495,8964	6892960
20	393416	566,06619	7868320
21	393416	566,06619	7868320
22	481736	693,14532	9634720
23	525896	756,68489	10517920
26	525896	756,68489	10517920
29	591944	851,71799	11838880

## Escenario con Rayleigh Fading

Este escenario contempla la simulación del sistema de capa física del estándar 802.16-2004 frente a unas condiciones de transmisión que contemplan un canal en presencia de ruido y el fenómeno de desvanecimiento por múltiples trayectorias de tipo Rayleigh (Rayleigh Fading), como se muestra en la figura 21.

En la configuración de la simulación de desvanecimiento por multirayectoria se define en el canal una segunda trayectoria, con un valor en potencia de -3 dB y un retardo de 2  $\mu$  segundos.

Adicionalmente, se realizará la simulación con distintos valores de máxima frecuencia de variación de Doppler para el canal, empleando los valores 1, 10, 80, 800 y 8000 Hz.

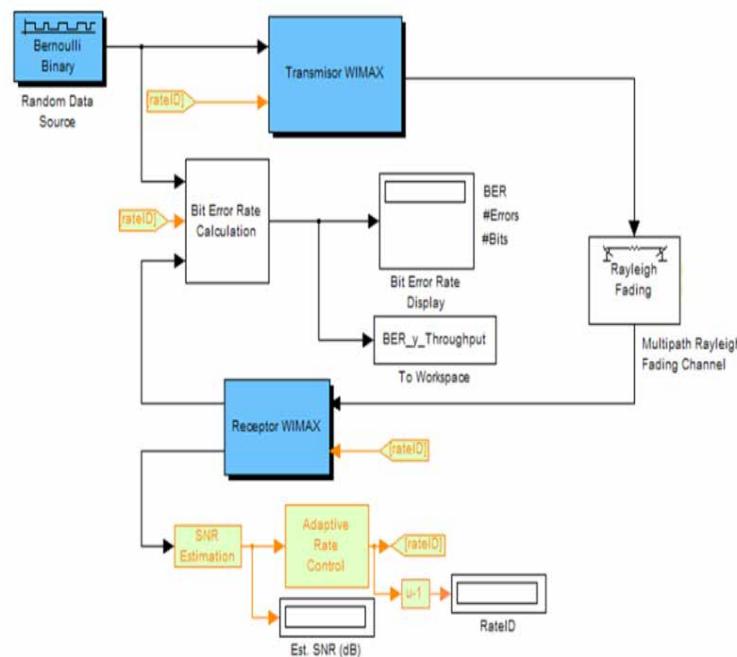
La variación de frecuencia Doppler permitirá evaluar este estándar para condiciones de movilidad.

En la figura 22 se agrupa todas las variaciones de Doppler y en la figura 23 se presenta excluyendo el valor 8000 Hz para visualizar con mayor detalle los valores obtenidos.

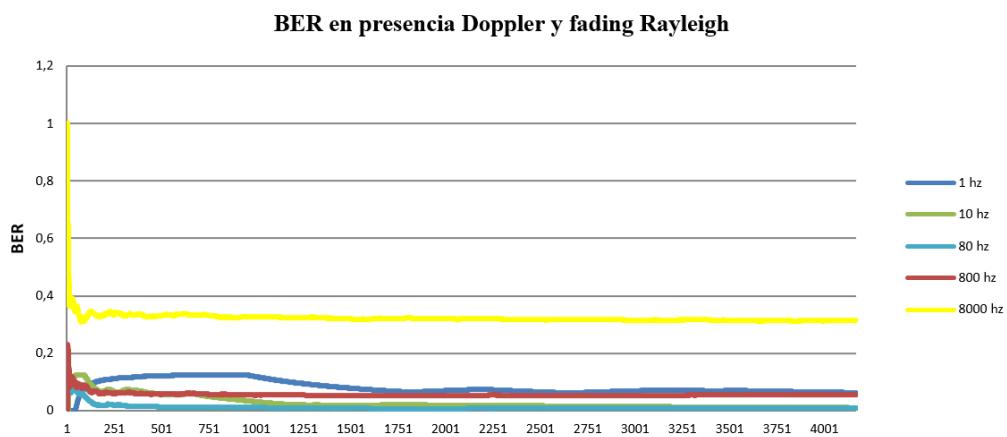
En la figura 22 se observa un valor muy alto en los primeros instantes de tiempo de la transmisión, para todos los valores de frecuencia máxima de Doppler y posteriormente una estabilización de la variación de los valores de BER cercanos a un valor constante.

Los altos valores dentro de los primeros frames de transmisión indican el proceso de adaptación del sistema a las condiciones cambiantes de los tipos de modulación, que dependen directamente del valor de SNR que se mide en el receptor. Los valores se estabilizan pero tienen una tendencia de acuerdo con el valor de Doppler máximo que puede alcanzar, lo que denota que los valores máximos de BER se presentan con los valores máximos de frecuencia simulada (8000 Hz) con un valor promedio de 0,3225 que claramente indica los problemas clásicos de móviles en alta velocidad frente a las estaciones base.

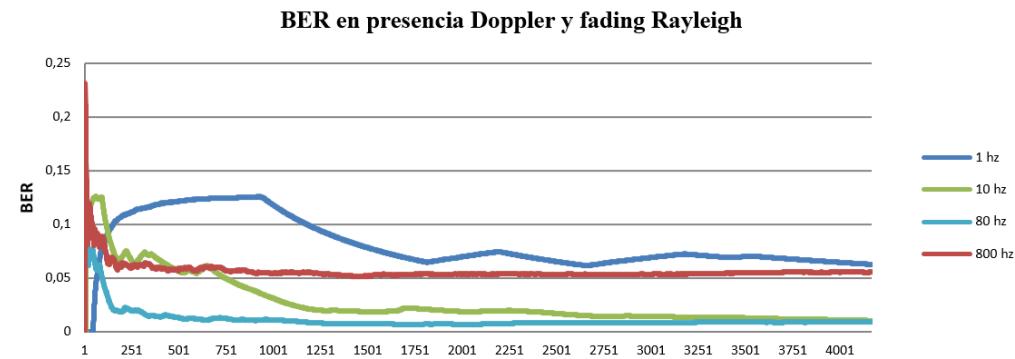
En la figura 23 se observa que igualmente los valores de BER se estabilizan, aunque a frecuencias muy bajas esta estabilización se hace más lenta. A continuación damos los valores en la tabla 6.



**Figura 21.** Diagrama de bloques, canal sin ruido fading y Rayleigh WIMAX 802.16-2004.



**Figura 22.** Escenario 3 BER con variaciones de Doppler.



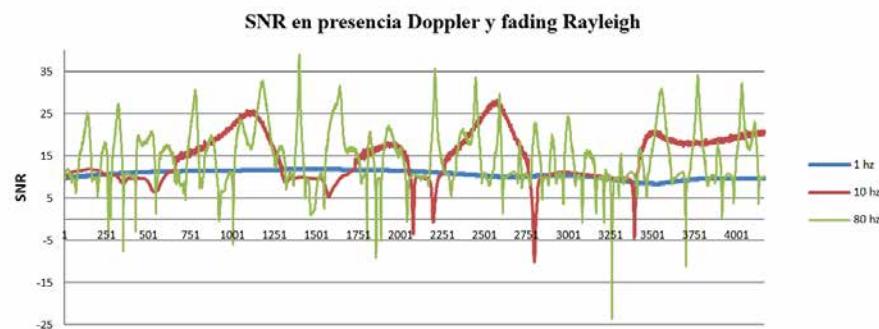
**Figura 23.** Escenario 3 BER con variaciones de Doppler.

**Tabla 6.** Resumen de valores de BER, escenario 3.

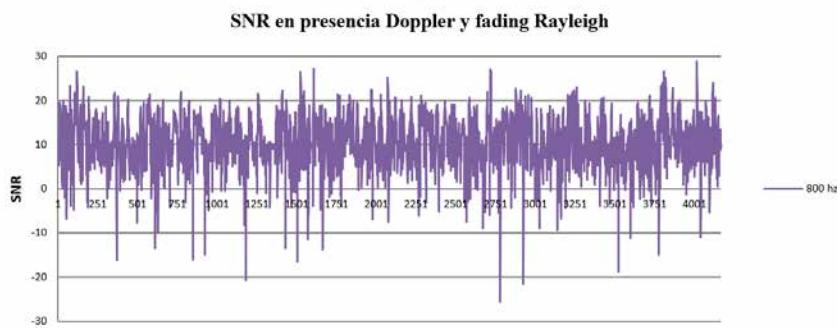
Frecuencia max. Doppler (Hz)	Valor promedio	Valor máximo (pico)	Valor mínimo	Valor promedio después del frame 1000
1	0,081499084	0,125787159	0	0,072628664
10	0,02768387	0,12585324	0	0,01649817
80	0,01114218	0,12320917	0	0,00830547
800	0,05626038	0,23096026	0	0,05400856
8000	0,32253095	1	0,30823529	0,31804238

Para la medición de SNR en el canal, visto desde el receptor en el escenario establecido en este punto, se puede observar que las condiciones de señal a ruido del canal presentan un incremento en su variación a medida que se aumenta el valor máximo de frecuencia Doppler en el canal; para el

caso de un Doppler máximo de 1 Hz (ver la figura 24), el comportamiento es de una curva que oscila de manera suave con variaciones en el margen superior y el inferior; pero para una frecuencia máxima de 8000 Hz (ver la figura 25) la variación de valores de SNR es más grande y abrupta.



**Figura 24.** Escenario 3 SNR con variaciones de Doppler.



**Figura 25.** Escenario 3 SNR con variaciones de Doppler.

La tabla 7 muestra una relación de los valores obtenidos, en donde se observa claramente la variación de márgenes entre el valor mínimo y el máximo, el cual se incrementa a medida que el valor máximo de Doppler aumenta.

**Tabla 7.** Resumen de valores de SNR, escenario 3.

Frecuencia max. Doppler (Hz)	Valor promedio	Valor máximo	Valor mínimo
1	10,65356928	11,8294115	8,404946673
10	14,5593132	28,246153	-10,0951097
80	14,5389346	39,0395099	-23,6257297
800	11,0030268	28,8609585	-25,6779712

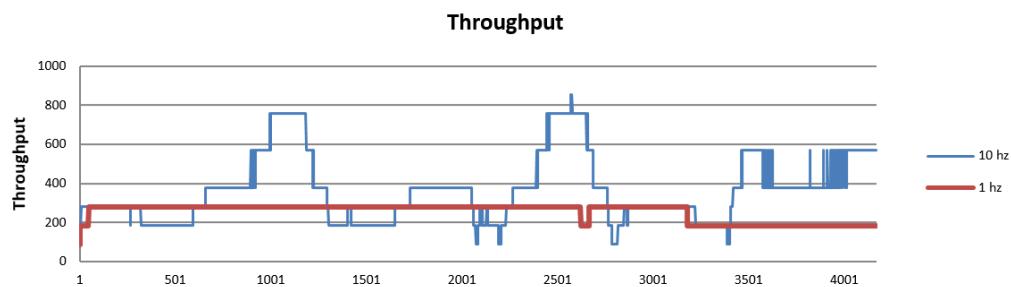
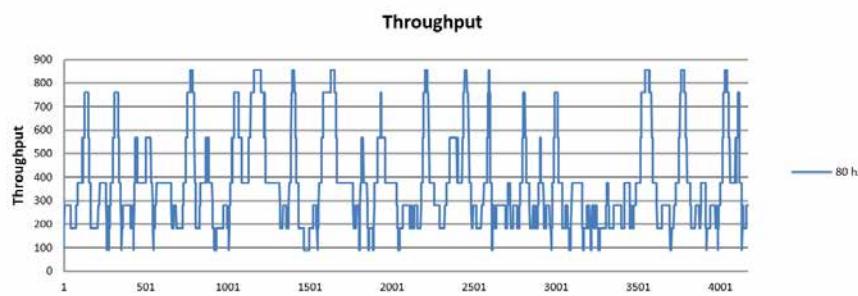
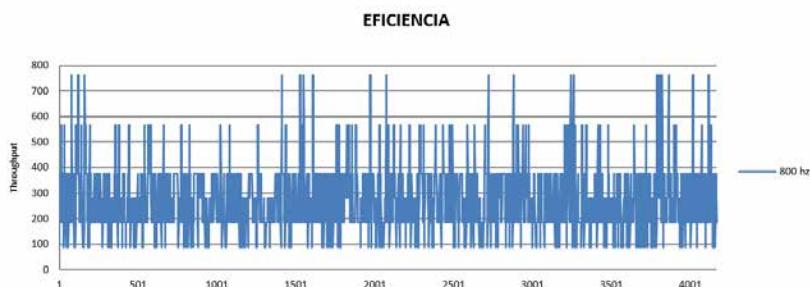
En cuanto al throughput, se puede encontrar que este depende directamente del valor de SNR detectado en el receptor; a medida que se inicia el barrido con un valor máximo de frecuencia

Doppler se presentan variaciones de SNR, el sistema responde cambiando el tipo de modulación y codificación FEC para mantener la integridad de la información transmitida.

En la figura 26 se puede ver el comportamiento del Throughput con frecuencias máximas de Doppler de 1 y 10 Hz; como se puede observar, la variación de tipos de modulación que se presentan para el caso de 1 Hz es menor que para el caso de 10 Hz; esto se debe a que para este último el SNR presenta una variación más alta ya que se mueve por todos los tipos de modulación.

En la figura 27 se puede observar igualmente una variación sobre todos los tipos de modulación pero con una frecuencia de barrido más alta, dado el aumento de la frecuencia máxima de Doppler; caso similar ocurre en la gráfica de 800 Hz (figura 28).

En la tabla 8 se presentan los valores medios de Throughput para los períodos de simulación de 0,3 segundos de transmisión o 4167 frames.

**Figura 26.** Escenario 3 throughput 1 y 10 Hz.**Figura 27.** Escenario 3, throughput 80 Hz.**Figura 28.** Escenario 3, throughput 800 Hz.

Como se puede notar en los valores de la tabla 8, existe una frecuencia máxima de Doppler con un valor entre 10 y 80 Hz que permite la máxima transferencia de información, pero a medida que la máxima frecuencia de Doppler aumenta, las condiciones de variación de SNR disminuyen notablemente las condiciones de Throughput para el canal; esto tiene resultado en dos factores, el promedio de variaciones de SNR que representan cambios de modulación y el incremento del BER.

**Tabla 8.** Resumen de valores throughput, escenario 3.

Frecuencia máxima de Doppler (Hz)	Acumulado en 0,3 segundos (bits)	Valor promedio por frame	Throughput / segundo
1	1062888	255,07271	3542960
10	1529448	367,038157	5098160
80	1558056	373,90353	5193520
800	1174440	281,843053	3914800
8000	387624	93,0223182	1292080

## CONCLUSIONES

### Escenario sin ruido

Este modelo sin perturbaciones en su canal simplemente tiene cero en su BER y su Throughput alcanza el máximo valor de 856 bits por frame con modulación 64-QAM  $\frac{3}{4}$ .

### Escenario con AWGN

El modelo de capa física de WiMAX estándar 802.16-2004 es un sistema que se adapta únicamente a las condiciones de ruido blanco gaussiano y su eficiencia de transmisión aumenta en disminución de la presencia de AWGN. Pero presenta importantes márgenes de error en el límite de cambio de tipo de modulación BPSK y QPSK con un valor nominal de 4 dB de SNR; es decir, cuando el canal presenta su BER más alto y es sometido a niveles de SNR que fluctúan alrededor de 4 dB, estos valores de BER obtenidos durante la simulación son una gran desventaja en un canal operativo y dependerán de su corrección en capas superiores, disminuyendo notablemente el Throughput real de operación al solicitar retransmisiones de información. Estas pérdidas de información podrían disminuirse al sacrificar la eficiencia de transmisión y bajar el umbral de transición, aunque para un mejor análisis es necesario ver el Throughput del sistema adicionando ráfagas de retransmisión.

En canales en presencia de AWGN con niveles de relación SNR superiores a 13 dB el comportamiento del canal muestra su mayor eficiencia de transmisión y niveles cero de BER, pero claramente la aparición de múltiples trayectorias incrementa el valor y variación de SNR en el sistema.

### Escenario con Rayleigh Fading

En este escenario es claramente notorio que a medida que aumenta la frecuencia máxima de Doppler, se hace más impredecible los valores de

SNR presentes en el receptor generados por las múltiples trayectorias. Los valores máximos de BER aumentan con respecto a mayor frecuencia en el escenario de simulación.

Adicional a lo anterior, y para concluir, la aparición de múltiples trayectorias y movimiento de uno de los puntos de comunicación (aparición de efecto Doppler) involucra la aparición de un valor de SNR que es tomado por el sistema de capa física para evaluar el tipo de modulación y FEC a emplear, para garantizar la comunicación entre los puntos. Sin embargo, los valores de BER en la comunicación establecen claramente que este fenómeno no puede modelarse únicamente como un valor de ruido blanco gaussiano, si se busca un alto rendimiento y llevar la pérdida de información a cero empleando únicamente capa física, aunque los métodos empleados de corrección de errores hacia adelante combinados con la selección automática de tipo de modulación demuestra una gran versatilidad a la hora de sopesar canales afectados por ruido y desvanecimiento por múltiples trayectorias.

## FINANCIAMIENTO

Ninguno

## REFERENCIAS

- Al-Adwany, M. A. (2010). A Performance Study of Wireless Broadband Access (WiMAX). *IEEE*, pp. 320-324.
- Cadavieco, D. L. (6 de mayo de 2012). WiMAX. Aproximación técnica al estándar IEEE 802.16 y breve descripción de su infraestructura como tecnología de última milla. Recuperado el 4 de octubre de 2012, de: <http://www.dea.icaí.upco.es/sadot/Comunicaciones/avanzadas/WiMAX.pdf>
- Committee, L. S. (2004). IEEE Std 802.16-2004 IEEE STANDARD FOR LOCAL AND METROPOLITAN AREA NETWORKS. *IEEE*, p. 434.
- Communication, R. (10 de enero de 2003). Second Generation High-Capacity Broadband Wireless Solutions. Recuperado el 1 de octubre de

- 2012, de: [http://bos.fkip.uns.ac.id/pub/onno/library-ref-eng/ref-eng-3/physical/wireless/wimax/Redline\\_OFDM\\_Whitepaper\\_1.0.pdf](http://bos.fkip.uns.ac.id/pub/onno/library-ref-eng/ref-eng-3/physical/wireless/wimax/Redline_OFDM_Whitepaper_1.0.pdf)
- Erceg, V. (27 de junio de 2003). Channel models for fixed wireless applications. Recuperado el 1 de octubre de 2012, de IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group: [http://www.ieee802.org/16/tga/docs/80216a-03\\_01.pdf](http://www.ieee802.org/16/tga/docs/80216a-03_01.pdf)
- González, J. M. (2 de noviembre de 2008). Simulación de un Esquema de Modulación/Demodulación OFDM Utilizando un Modelo de Canal Multitrama vectoria. Recuperado el 1 de octubre de 2012, de Escuela Superior Politécnica Del Litoral, Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación: [http://www.cib.espol.edu.ec/DIGIPATH/D\\_Tesis\\_PDF/D-38117.pdf](http://www.cib.espol.edu.ec/DIGIPATH/D_Tesis_PDF/D-38117.pdf)
- Izaskun Pellejero, F. A. (2006). *Fundamentos y aplicaciones de seguridad en redes wlan*. Barcelona, España: Marcombo.
- Jamal Mountassir, H. B. (2011). Simulating the WiMAX Physical Layer in Rayleigh Fading Channel. *IEEE* (pp. 281-284). Timisoara, Romania: U. P. Department of Communications.
- Javvin, T. (2007). *Network Dictionary*. California, USA: Dong and Jielin.
- José Andrés Marzo Icaza, R. L. (2011). *Simulación e implementación en FPGA de un esquema de codificación del canal sujeto al estandar de Wimax*, vol. 3. *Avances en ciencias de Ingeniería*.
- Licea, V. R. (1 de octubre de 2009). *Modelado de Redes WiMAX*. Recuperado el 1 de octubre de 2012, de: [http://profesores.fi-b.unam.mx/victor/CCNA/Productos/Notas%20de%20Curso/Manual%20de%20la%20Asignatura%20de%20Redes%20Inalambricas%20de%20Banda%20Ancha%20\(Avance%2050%25\).pdf](http://profesores.fi-b.unam.mx/victor/CCNA/Productos/Notas%20de%20Curso/Manual%20de%20la%20Asignatura%20de%20Redes%20Inalambricas%20de%20Banda%20Ancha%20(Avance%2050%25).pdf)
- Iuventicus (20 de marzo de 2003). *El Efecto Doppler en la Física Clásica y en la Física Relativista*. Recuperado el 1 de octubre de 2012, de: <http://www.iuventicus.org/articulos/03U006/index.html>
- Molisch, A. F. (2011). *Wireless Communications*. California, USA: Wiley IEEE.
- Nuaymi, L. (2007). *WiMAX: Technology for Broadband Wireless Access*. San Francisco, USA: Wiley.
- Ohrtman, F. (2005). *WiMAX Handbook. Building 802.16 Wireless Networks*. San Francisco, USA: McGraw-Hill.
- Pascual, A. E. (1 de octubre de 2007). *WiMAX y Soluciones no Estándar*. Recuperado el 1 de octubre de 2012, de: [http://www.itrainonline.org/itrainonline/mmtk/wireless\\_es/files/14\\_es\\_WiMAX-y-soluciones-no-Estandar\\_presentacion\\_v02.pdf](http://www.itrainonline.org/itrainonline/mmtk/wireless_es/files/14_es_WiMAX-y-soluciones-no-Estandar_presentacion_v02.pdf)
- Patrick Robertson, S. K. (1999). *The Effects of Doppler Spreads in OFDM(A) Mobile Radio Systems*. Institute for Communications Technology German Aerospace Center (DLR). 1, pp. 329-333. IEEE.
- Pérez, V. T. (1 de septiembre de 2009). Análisis Y Diseño De Mecanismos De Handoff En Redes Inalámbricas De Banda Ancha IEEE 802.16e. México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma De México. Recuperado el 6 de octubre de 2012, de: [http://profesores.fi-b.unam.mx/victor/CCNA/Productos/Tesis/Tesis%20Terminadas/Tesis\\_Maestria\\_Victor\\_Toledo\\_Sep\\_2009.pdf](http://profesores.fi-b.unam.mx/victor/CCNA/Productos/Tesis/Tesis%20Terminadas/Tesis_Maestria_Victor_Toledo_Sep_2009.pdf)
- Weste, N. (1 de octubre de 1998). VLSI for OFDM. *IEEE*, pp. 127-131.
- William, J. (1975). *Microwave Mobile Communications*. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Zhao, X. (2011). A new frame synchronization algorithm for OFDM WiMAX system in Simulink. 4, pp. 2321-2325. IEEE.





## Aplicación de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red: estado del arte

### Grid-connected photovoltaic systems application: state of the art

Johann Alexander Hernández Mora\*, Andrés Felipe Cortés Borrás\*\*  
Daniel Alberto Balaguera Cañola\*\*\*, Mauricio Alexander Urueña Saavedra\*\*\*\*

Citation / Para citar este artículo: Hernández Mora, J. A., Cortés Borrás, A. F., Balaguera Cañola, D. A., & Urueña Saavedra, M. A. (2014). Aplicación de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red: estado del arte. Revista Tecnura, Edición especial, 157-172.

**Fecha de recepción:** 14 de julio de 2013 / **Fecha de aceptación:** 16 de mayo de 2014

#### Resumen

En este trabajo se describen todos los conceptos necesarios para lograr implementar un sistema fotovoltaico como alternativa para ser utilizado como generador distribuido. Para ello, se realiza un pequeño estado del arte en el cual se manejan conceptos básicos, desde el funcionamiento de una celda solar hasta conceptos de redes inteligentes aplicados en la gestión de la demanda. Asimismo, se abarca un repaso sobre los marcos regulatorios existentes en Colombia, donde se habla de generación distribuida debido a la falta del mismo. Es necesario comparar tales regulaciones con los diferentes marcos regulatorios existentes en otros países, como Alemania, España y EE.UU., para obtener un modelo de trabajo idóneo. Finalmente, se decide utilizar un generador fotovoltaico conectado a la red de baja tensión como alternativa en los sistemas de generación distribuida, ya que con estos se pueden realizar balances energéticos, esto en caso de que en el país en

donde se emplee esta alternativa no se tenga establecido un marco regulatorio adecuado, de manera que el usuario no tenga problemas con las entidades regulatorias actuales.

**Palabras clave:** balance energético, energías renovables, generación distribuida, gestión de la demanda, sistemas fotovoltaicos.

#### Abstract

This paper outlines all necessary concepts to successfully implement a photovoltaic system as an alternative in a distributed generation scheme. For this purpose, it is made a short state of the art in which basic concepts are addressed, from a solar cell operation to smart grid concepts applied on demand management. Likewise, a review of the different regulatory frameworks in Colombia is entailed, especially those related to distributed generation, due to the lack of these ones. It is necessary to make a comparison with other regulations from other countries,

\* Ingeniero electricista, magíster en ingeniería eléctrica con énfasis en distribución; doctor en ingeniería eléctrica. Docente, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: [jahernandezm@udistrital.edu.co](mailto:jahernandezm@udistrital.edu.co)

\*\* Ingeniero eléctrico, estudiante de maestría en integración de las energías renovables. Universidad del País Vasco. Bilbao, Vizcaya. España. Contacto: [acortes024@ikasle.ehu.es](mailto:acortes024@ikasle.ehu.es)

\*\*\* Ingeniero eléctrico. Jefe del área de ingeniería, ENERSA S.A. Proyectos en Energías Renovables y Eficiencia Energética. Bogotá, Colombia. Contacto: [dabalaguerac@correo.udistrital.edu.co](mailto:dabalaguerac@correo.udistrital.edu.co)

\*\*\*\* Ingeniero eléctrico. Ingeniero de soporte de mantenimiento, FYR Ingenieros. Bogotá, Colombia. Contacto: [mauruens@correo.udistrital.edu.co](mailto:mauruens@correo.udistrital.edu.co)

such as Germany, Spain and USA, in order to obtain a suitable work model. Finally, a photovoltaic system connected into the low voltage grid is used as an alternative in distributed generation systems, due to the fact that with this system energy balances can be performed, in case that countries where this

alternative is implemented may not have an adequate regulatory framework established, so that users will not have problems with regulatory entities.

**Keywords:** demand management, distributed generation, energy balance, photovoltaic systems, renewable energies.

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la energía eléctrica es uno de los procesos de innovación que más han impactado en el progreso de la humanidad y para constatarlo, solo se debe echar un vistazo a nuestro alrededor y percibir cómo todo lo que nos rodea requirió en su desarrollo y su funcionamiento el uso de energía eléctrica.

Desde su aparición, la energía eléctrica ha requerido un proceso de generación y distribución, siendo esta la base del sistema, afectando no solo el bienestar de las personas sino también la economía de las naciones. Sin embargo, las potencias tecnológicamente más avanzadas se han preocupado por garantizar la oferta energética en el mundo, investigando y desarrollando nuevas tecnologías en cuanto a fuentes no convencionales de producción de energía eléctrica (Gischler & Janson, Noviembre 2011) y (Casmus & Eusebio, 2008), puesto que estas reducen parcialmente la cantidad de elementos contaminantes en comparación con los sistemas de combustibles fósiles, los cuales durante las últimas décadas han contribuido a la emisión de millones de toneladas de CO<sub>2</sub> (Grundi, 2008).

Por ello, hoy día las investigaciones han puesto la mirada en el uso de fuentes limpias de generación, además de implementar diferentes políticas que justifiquen este interés, como lo indican estudios hechos por el REN21 (Renewable Energy Police Network for the 21st Century). Según los reportes del REN21, actualizados al año 2013, la contribución de las fuentes de energía no convencionales a la producción de energía eléctrica

mundial es de 16%, donde la generación fotovoltaica contribuye con 0.6% de dicha producción (REN21, 2012). Por tanto, este tipo de tecnologías podrán ser utilizadas en los sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica, lo cual mitigará las grandes pérdidas e inconvenientes de confiabilidad que tienen los sistemas de potencia hoy día (Singh & Parida, 2012).

Los recientes avances obtenidos en el campo de la generación a pequeña escala y almacenamiento eléctrico implican cambios en la forma en que se ha ido concibiendo la generación y distribución de energía en las últimas décadas, donde se retoma con vigor el concepto de generación distribuida (GD) (Wijesinghe & Lei Lai, 2011).

Para lograr que el concepto de generación distribuida comience a tener gran auge a nivel mundial es necesario que este garantice aspectos como eficiencia, confiabilidad y calidad en el servicio prestado de energía eléctrica. En extensos trabajos, diversos investigadores (Gischler & Janson, Noviembre 2011) y (Strachan & Dowlatabadi, 2002) discuten acerca de las ventajas de la GD en aspectos de eficiencia, flexibilidad, interconexión con redes de distribución, niveles de emisión de gases de las plantas de generación aisladas, e inversiones por instalación y costos de mantenimiento y funcionamiento (Strachan & Dowlatabadi, 2002), en donde se resaltan generalmente aspectos que identifican la GD como una alternativa con grandes proyecciones para diversos usuarios, que demandan consumos inferiores a 10 MW y/o ciertos requerimientos especiales de generación y distribución.

Las tecnologías de generación distribuida se dividen, a su vez, en convencionales y no

convencionales. Las primeras incluyen motores de combustión interna, microturbinas y turbinas a gas, mientras que las segundas se refieren a la implementación de PCH, turbinas eólicas (motores síncronos o de inducción), geotérmica, biomasa y módulos fotovoltaicos. Por tanto, para que este tipo de tecnologías ofrezca mayor confiabilidad al sistema es factible utilizar almacenadores de energía, puesto que en la mayoría de los casos no es posible controlar el recurso energético (Bayod, 2012). Entre las tecnologías de almacenamiento se encuentran los acumuladores químicos (baterías), volantes de inercia (flywheels), bobinas superconductoras (SNER), celdas de combustible hidrógeno y súper capacidores (Hernández, 2012).

Actualmente en Colombia se presentan casos que pueden enmarcarse dentro del concepto de generación distribuida, entre estos casos se destacan proyectos existentes como el de energía eólica a escala media y de energía solar a baja escala (Bayod, 2012), tomando como punto de partida lo mencionado en el objetivo del plan de desarrollo 2011-2030 para fuentes no convencionales de energía (FNCE) (Consorcio Energético CORPOEMA, Diciembre, 2010). Esto permite planear nuevas estrategias en aquellas áreas en donde se tenga el potencial necesario para lograr la implementación de este tipo de tecnologías de generación y almacenamiento y así, lograr mayor cobertura a niveles residencial, comercial e industrial en el contexto nacional colombiano.

En tal sentido, el enfoque que tiene esta investigación radica en el uso de tecnologías no convencionales para generación distribuida, utilizando principalmente módulos fotovoltaicos para su desarrollo. Conforme al uso histórico que han tenido los sistemas fotovoltaicos en Colombia, este generalmente está relacionado con su implementación en zonas apartadas o con difícil acceso al Sistema de Interconexión Nacional (SIN) debido a su alto costo de instalación (Rodríguez, Noviembre, 2008), por lo cual se plantea la idea de empezar a relacionar este tipo de tecnología dentro del SIN.

Lograr la propagación del concepto de generación distribuida mediante la aplicación de sistemas fotovoltaicos conlleva grandes retos relacionados con la planeación, inversión, operación y regulación de los sistemas eléctricos tradicionales. Para los sistemas interconectados, el usuario final podría llegar a entregar energía eléctrica al sistema en el lado de baja tensión, lo que permitiría reducir las pérdidas de transporte y distribución, al igual que incrementar la extensión del sistema y disminuir la dependencia de los sistemas centralizados. Por tal razón, observando el contexto colombiano, es necesario identificar las condiciones técnicas de interconexión para estos nuevos generadores, de tal forma que se mantengan los niveles de confiabilidad establecidos por la CREG 070 de 1998 (CREG, Comisión Reguladora de Energía y Gas, Mayo, 1998).

Los sistemas fotovoltaicos interconectados a la red en países como Alemania y España están siendo utilizados como complemento a los sistemas de generación centralizada (Caamaño, 1998). La generación distribuida ha sido pieza fundamental para que este tipo de tecnología alcance un grado de importancia para que empiece a ser implementada en áreas urbanas, donde las plantas de pequeña capacidad de generación son instaladas en los techos de edificios o residencias dentro del concepto "Photovoltaic Grid Connected Buildings" (PVGCB) (Caamaño, 1998).

## SISTEMA FOTOVOLTAICO

Un sistema fotovoltaico está constituido por una agrupación de módulos y un conjunto de elementos que adaptan la energía eléctrica que produce el generador a la aplicación (Caamaño, 1998; Fathpour, Tsia, & Jalali, 2007; Gerol & Neudck, 1990). Este sistema se puede clasificar en dos grandes grupos según su aplicación: sistemas autónomos y sistemas interconectados a la red eléctrica. En la figura 1 se muestra el diagrama de bloques para las dos clasificaciones.

El primer grupo requiere asegurar la disponibilidad de electricidad aun en los casos en donde la generación es inferior a la demanda o cuando no está visible el sol, con lo cual no hay generación. Para ello es indispensable almacenar la energía que se produce durante los períodos en que la generación supera a la demanda (Zuñiga & Botina, 2012).

En el segundo grupo no existen requerimientos de seguridad en el suministro de energía, de modo que los criterios para la elección de la potencia del generador son más ambiguos, en este caso la red es la fuente infinita de energía eléctrica. Este tipo de sistemas permite intercambiar energía eléctrica con la red cuando la generación excede las necesidades de energía del usuario y tomar energía de la red cuando la demanda es mayor que la energía generada por el arreglo fotovoltaico (Assi, Jama, & Al Kathairi, 2009).

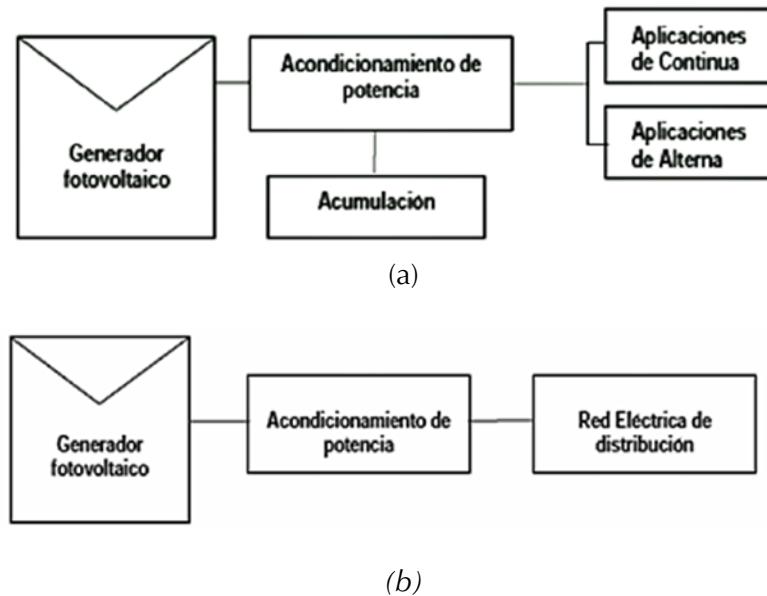
## SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A LA RED (SFVCR)

Un sistema fotovoltaico interconectado a la red consiste en un arreglo de elementos, entre los cuales están los módulos solares e inversores. El

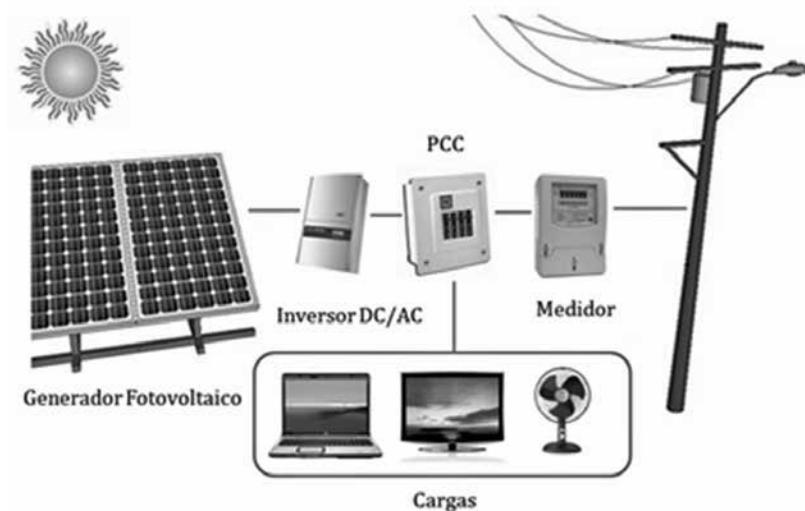
objetivo de este tipo de tecnología consiste en generar energía eléctrica a partir de radiación primaria (solar). Mediante el efecto fotovoltaico, los paneles solares transforman la energía proveniente de los fotones que inciden sobre el material, en un flujo de electrones que se comportan como una fuente de corriente directa (Fathpour, Tsia, & Jalali, 2007). Al ser conectados en instalaciones en donde la tensión de la red es de naturaleza alterna se hace necesario utilizar un inversor que permita inyectar al sistema de potencia electricidad desde el generador fotovoltaico.

La figura 2 muestra un diagrama de bloques específico para un SFVCR, donde se encuentran cada uno de los componentes que hacen parte de este y que pueden ser aplicados en la GD. Los seis bloques funcionales que lo conforman se describen a continuación.

- Generador fotovoltaico: formado por los módulos fotovoltaicos y su correspondiente estructura de soporte.
- Acondicionamiento de potencia: es el responsable de adecuar los parámetros de potencia producidos por el generador DC a tensión variable, a



**Figura 1.** Diagrama de bloques (a) Sistema autónomo, (b) Sistema interconectado.



**Figura 2.** Sistema fotovoltaico conectado a la red.

los parámetros requeridos por la red eléctrica de baja tensión (AC a 120 o 208 V), también conocido como inversor.

- Punto de acople común: (PCC, point of common coupling), donde se ubican los elementos de protección adoptados para garantizar la seguridad del propio SFVCR y la seguridad de la red eléctrica.
- Contador bidireccional de energía AC: tiene como objeto registrar la energía que se consume de la red además de la energía que está siendo entregada al sistema interconectado en un instante de tiempo específico.
- Carga: conformada por todos aquellos elementos (lineales y/o no lineales) que demandan energía eléctrica para su funcionamiento.
- Red eléctrica.

Su funcionamiento con la red de energía eléctrica consiste en la transformación de la energía DC producida por el generador fotovoltaico en corriente alterna; esta corriente debe garantizar los mismos parámetros de la red, para así poder interconectarse automáticamente con esta. El inversor es el encargado de realizar este proceso, proporcionando tensión de salida estable y corriente variable en función de la irradiancia solar. La

corriente alterna generada por el inversor es sincronizada con la frecuencia de la corriente de la red (60 Hz), posteriormente pasa por el medidor y es inyectada a la red.

## GENERACIÓN DISTRIBUIDA (GD)

Cuando se hace una revisión de la literatura, en realidad no existe una definición única y común acerca del concepto de generación distribuida y muchos autores manejan diferentes esquemas, así como intervalos de trabajo, para caracterizar servicios que pueden caer en el margen de la generación distribuida (GD). Ejemplos de ello pueden ser los países angloamericanos, los cuales le llaman a esto “generación embebida”; en Norteamérica le llaman “generación dispersa”, y en Europa y algunas partes de Asia se utiliza el término “generación descentralizada” (CIRED, 1999).

Adicionalmente, la GD puede ser clasificada de acuerdo con el rango de la unidad de la potencia de generación. El Instituto de Investigación de Potencia Eléctrica (EPRI, por sus siglas en inglés, Electric Power Research Institute), define la GD desde unos pocos kW hasta 50 MW (EPRI, 2013). De acuerdo con el Instituto de Investigación de

Gas, esta generación típicamente se encuentra entre pocos kW y 25 MW (Gas Research Institute, 1998). Otros autores (Sharma & Bartels, 1998; Cardell & Tabors, 1998) definen el tamaño de la planta entre 500 kW y valores superiores hasta 100 MW. El CIGRE (International Conference on Large High Voltage Electric Systems) las define como plantas pequeñas de 50-100 MW (CIGRE, 1998). Asimismo, diferentes autores (Ackerman, Andersson, & Söder, 2001) proponen una clasificación a las unidades de GD según su capacidad:

- Micro  $1 \text{ W} \leq 5 \text{ kW}$
- Pequeña  $5 \text{ kW} \leq 5 \text{ MW}$
- Mediana  $5 \text{ MW} \leq 50 \text{ MW}$
- Grande  $50 \text{ MW} \leq 300 \text{ MW}$

Sin embargo, en el contexto del presente documento se entenderá por generación distribuida el proceso de producción (o generación) y distribución de energía eléctrica a pequeña o mediana escala (desde cientos de KW hasta 10 MW), con una cercanía a los centros finales de consumo y con posibilidad de interactuar con las redes de interconexión eléctrica (Fathpour, Tsia, & Jalali, 2007).

Debe aclararse, sin embargo, que el concepto de generación distribuida no es un nuevo paradigma que haya sido formulado en los últimos años, pues en realidad se trata de un concepto básico que ha cobrado nuevo impulso, alentado por diversos factores tecnológicos, así como por condiciones del mercado y políticas energéticas y ambientales (Pepermansa, Driesenb, Haeseldonckx, Belmansc, & D'haeseleerc, 2005).

Los esquemas comerciales de venta de energía en el mundo comenzaron a optar por sistemas de electricidad apenas a mediados del siglo XIX, y aun así hicieron falta unos años más para tener opciones reales de sistemas de generación y comercialización similares a los que posteriormente consolidaron la energía eléctrica como una de las principales fuentes de energía, con su concepto de transporte a sitios distantes de las fuentes de generación (International Energy Agency, 2002).

Antes de esto, la mayoría de los sistemas de generación eran, de hecho, sistemas de generación distribuida. Los sistemas basados en vapor, carbón, gas o energía hidráulica suministraban la energía en lugares cercanos o en el sitio de carga, en donde se hacía el consumo directo.

Resulta necesario adicionar a la definición de GD algunos elementos más que marcan la esencia fundamental de esta alternativa de generación, como el empleo de diversas fuentes de energía, como pueden ser la energía eólica, solar, térmica, hidráulica, entre otras; diferentes tipos de combustibles, como biomasa, gas natural, diésel, biodiésel, etanol, gasolina, etc., en el caso de tecnologías basadas en sistemas de combustión; la alta eficiencia en la generación (normalmente asociada a procesos de cogeneración; Combined Heat and Power CHP); los altos niveles de confiabilidad en el suministro y de calidad en la energía entregada; y los relativamente bajos niveles de inversión inicial en los proyectos de generación (Jurado, Cano, & Carpio, 2004).

En la GD se pueden identificar cuatro tipos de aplicaciones básicas definidas como: generación para carga base, generación para carga pico, generación aislada y generación para soporte de la red de distribución (A, Ackerman, Andersson, & Söder, 2001).

El primer escenario ubica la GD como un sistema de generación principal y continua, interconectada a la red de distribución para operaciones de compra y venta de energía. El segundo escenario muestra la GD como un sistema alterno de respaldo para reducir el consumo desde la red de distribución en los períodos de mayor precio del kWh, de acuerdo con las fluctuaciones de la oferta en el mercado. El tercer caso sitúa la GD como un sistema de generación para poblaciones totalmente aisladas del sistema de interconexión eléctrica. Finalmente, el cuarto escenario sitúa la GD como un sistema de respaldo empleado especialmente en empresas de alto consumo energético solo en ciertos períodos del año, o para casos en los que se requiere elevar los niveles de confiabilidad en el suministro eléctrico (Ackerman, Andersson, & Söder, 2001).

## GD en Colombia

El avance de la generación distribuida en Colombia ha sido bastante reducido frente al potencial de su expansión. Aunque en los Planes de Desarrollo y en el Plan Energético Nacional se presentan lineamientos para apoyar la utilización de fuentes nuevas y renovables de energía (Ochoa, 2002), existen pocas metas e incentivos, como las metas del PROURE, establecidas en la Resolución 180919/2010, para trabajar en la capacidad instalada o en la producción de energía en el país.

Las plantas de generación distribuida han surgido por iniciativa de algunos industriales y regiones localizadas en zonas aisladas, en donde no hay otra opción distinta al diésel como generación centralizada. En la tabla 1 se observa la capacidad instalada en Zonas No Interconectadas (ZNI), lo cual justifica el uso de GD en las regiones del territorio colombiano.

**Tabla 1.** Capacidad instalada de generación en las ZNI.

Potencia instalada	118 MW
Generación diésel	92%
Generación con FNCE	8%

**Fuente:** (Consorcio Energético CORPOEMA, Diciembre, 2010)

En las ZNI las energías renovables (FNCE) son esencialmente sistemas fotovoltaicos en aplicaciones aisladas (principalmente telecomunicación). El IPSE (Instituto de Planeación y Promoción de Soluciones Energéticas) está desarrollando varios sistemas demostrativos, como la poli-generación de Nazaret (diésel + solar de 100 kW + eólica de 200 kW), el proyecto en isla fuerte (sistema fotovoltaico con gas propano licuado), y un gasífero en Necoclí (40 kW) (E.E.P.P.M, Febrero, 2008). Adicionalmente, dentro de la fase de contratos está un sistema de generación eólica de 7 MW y una planta para el procesamiento de desechos sólidos con una capacidad de generación de 1 MW en San Andrés (Murillo & Roldan, 2012).

## GD en Europa

Recientemente el cambio climático a nivel mundial ha llevado a que el continente europeo desarrolle políticas para afrontarlo. Por ello, los sistemas de generación y distribución han mejorado la seguridad y la confiabilidad, lo cual aporta al desarrollo y crecimiento de la GD al continente.

El crecimiento de la GD es un componente integral de la “Red Inteligente Europea”, la cual es efectiva y altamente sensible, por lo cual todas las partes interesadas deben estar integradas (Ruiz, Colmenar, Gil, & Molina, Mayo 2013).

**Tabla 2.** Capacidad instalada de GD en Europa.

País (2010)	Potencia instalada (GW)	COGEN (GW)	PV (MWp)	Eólico (MW)
Alemania	116	19	1600	18400
Reino Unido	69	6,6	10	1350
Dinamarca	13,6	4,9	36	3100
España	54	8,1	15	10000
Francia	115	3	2	750
Polonia	34,5	5	15	70

**Fuente:** (Meyer, Banberger, & Bel, 2010).

El continente europeo tiene problemas con recursos energéticos como el agua, la cual es escasa, y esto hace que algunos países (Lopes Ferreira, Costescu, L'Abbate, Minneo, & Fulli, 2011) se vean en la necesidad de buscar nuevas alternativas empleando recursos energéticos no convencionales y renovables, como energía solar, eólica, cogeneración, entre otras. En la tabla 2 se resume de modo general la capacidad instalada en Europa de dichas fuentes, que son utilizadas como GD.

Asimismo, se han puesto en marcha diversas estrategias regulatorias para la promoción de las estrategias renovables, las cuales son (Fundación de la Energía de la comunidad de Madrid, 2012):

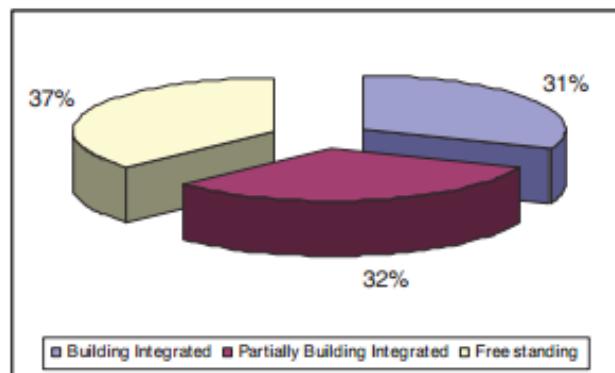
- Si la intervención regulatoria actúa sobre el precio o sobre la capacidad a instalar.
- Si la intervención actúa sobre la inversión o sobre la generación.
- Si los fondos para financiar la electricidad de origen renovable provienen de los consumidores finales o de los contribuyentes.

Estas estrategias se muestran a cabalidad en la tabla 3.

## GD en Italia

En Italia, lo que más predomina en GD son los sistemas fotovoltaicos. Estos han experimentado una

tasa de crecimiento anual cercana a 700% entre el año 2007 y 2009 (Aste, Adhikari, & Del Pero, 2011). Debido a este crecimiento surgieron diferentes problemas técnicos, como, por ejemplo, que las redes no estaban en capacidad de sopportar la potencia instalada que brindaban los nuevos generadores fotovoltaicos (sur de Italia, 70 GW) (Aste, Adhikari, & Del Pero, 2011). Esto llevó a la creación de una nueva norma técnica denominada ARG/elt 125/10, la cual dentro de su marco regulatorio estableció "zonas críticas" en donde se estableció los períodos de inicio y de finalización de la construcción de los generadores.



**Figura 3.** Integración de sistemas fotovoltaicos en edificios.

**Fuente:** (IEA, 2003).

**Tabla 3.** Estrategias regulatorias de promoción de las energías renovables.

		Directos		Indirectos
		Precio	Cuota	
Regulados	Inversión	Ayudas a la inversión	Certificado verde negociable TGC	Impuesto medioambiental
	Generación	Incentivos fiscales		
Voluntarios	Inversión	Primas fijas	Acuerdos Voluntarios	
	Generación	Subastas		
	Inversión	Fondos verdes		
	Generación	Precios verdes		

**Fuente:** (Fundación de la Energía de la comunidad de Madrid, 2012).

Durante los últimos años, alrededor de 4000 MWp de nuevos generadores fotovoltaicos han sido instalados en Italia (GSE, 2011); gran parte de estos se encuentran en edificaciones y algunos de ellos en zonas rurales. En la figura 3 se observa la distribución de los sistemas fotovoltaicos instalados en Italia durante los últimos años, de acuerdo con los niveles de integración de sistemas fotovoltaicos en edificios.

Con la instalación de estas plantas generadoras se estima reducir 5 Mt de CO<sub>2</sub>/año, considerando un promedio de factor de emisión del parque de generación nacional igual a 0,053 kg de CO<sub>2</sub> por kWh (EPIA, 2010).

## GD en Alemania

Diferentes estrategias que han incrementado la capacidad de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red de baja tensión se muestran en la tabla 4, dando una visión general acerca de las diferentes metodologías para la implementación de estas en Alemania.

## GD en España

Los sistemas fotovoltaicos solares en España se fundamentan en el autoabastecimiento de energía eléctrica

y generación distribuida (CNE, Enero 2011), debido a que el marco regulatorio español ha evolucionado, comprendiendo el alto recurso energético que disponen (Ruiz, Colmenar, Gil, & Molina, Mayo 2013); esto asegura niveles de rentabilidad sin ayuda, a corto y mediano plazos, denominado paridad de red (Ruiz, Colmenar, Gil, & Molina, Mayo 2013).

La paridad de red significa que el costo de la generación de energía sin incentivos es el mismo que el precio de compra de energía de la red. Este punto es el instante en que los usuarios se vuelven indiferentes con respecto a la compra o a la generación de energía que consumen (Ruiz, Colmenar, Gil, & Molina, Mayo 2013).

De acuerdo con el EPIA (European Photovoltaic Industry Association), los sistemas fotovoltaicos podrán competir en precio con las fuentes convencionales de generación en el año 2020 (EPIA, 2013).

El potencial más alto de España para aumentar la proporción de energías renovables en la generación de electricidad se encuentra principalmente en eólica y solar fotovoltaica (Ministry of Industry tourism and trade, 2010b, 2010). La producción de energía fotovoltaica en España sigue muy de cerca el patrón de demanda de energía eléctrica durante

**Tabla 4.** Estrategias de investigación para incrementar la capacidad de introducción a la red de baja tensión de los sistemas fotovoltaicos y la implementación de su estatus en Alemania.

Estrategia	Estatus de la implementación
Refuerzo de la red	<b>Statu Quo:</b> Medidas para incrementar la potencia de corto circuito de la red se emplean comúnmente en Alemania.
Limitación de potencia activa del alimentador a 70% de la capacidad instalada de los módulos en la prueba de condición estándar	<b>Statu Quo:</b> Obligatorio para todos los sistemas fotovoltaicos en Alemania con una capacidad instalada menor que 30 kWp y sin la característica de ser controlado remotamente. Desde 2012.
Potencia reactiva estática de provisión (caída del control del factor de potencia)	<b>Statu Quo:</b> Desde 2012 los usuarios son autorizados para demandar potencia reactiva de los generadores conectados a la red de baja tensión.
Limitación automática de tensión por control dinámico de potencia activa	<b>Futuro próximo:</b> El control no está disponible en el comercio. Los códigos de red necesitan revisiones futuras mediante investigación.
Limitación automática de tensión por control dinámico de potencia activa/reactiva	<b>Futuro próximo:</b> El control no está disponible en el comercio. Los códigos de red necesitan revisiones futuras mediante investigación.
Transformadores de distribución con OLTC (On-load Tap Changer)	<b>Futuro próximo:</b> Primeros prototipos están disponibles.

**Fuente:** (Stetz, Marten, & Braun, 2013).

todo el año y, por tanto, provoca relativamente menos problemas de integración a la red que los sistemas fotovoltaicos instalados en los países del norte de Europa (Cossent, Gómez, & Olmos, 2011).

## GD en Japón

En los últimos años Japón está introduciendo un nuevo concepto en el ámbito de la demanda para hacer frente en la alta penetración de la GD, la cual denominan área de demanda de un sistema autónomo de potencia. Este sistema adopta avanzados elementos de electrónica de potencia, así como alta inversión en tecnologías de comunicación, con el propósito de mantener la calidad de potencia y la seguridad de sistemas y así hacer uso eficiente de la energía, tanto para el usuario como el operador de red (Kobayashi & Uemura, Development of Autonomous demand area power system in CRIEPI, 2003).

En 2008 se inició una investigación llamada TIPS o Triple I (Intelligent, Interavtive and Integrated) Power Systems. Esta investigación se desarrolla para mantener la calidad de potencia, la seguridad, estabilidad y confiabilidad de todo el sistema, además de contribuir a la reducción de gases de efecto invernadero, todo ello con el uso efectivo de la GD (Kobayashi & Kurihara, Researche and development of grids integration distributed generation in Japan, 2009).

## GD en Estados Unidos

El departamento de energía de Estados Unidos (DOE), estima que hay instaladas en el país más de 12 millones de unidades GD, con una capacidad agregada de 200 GW, la mayoría solamente proporcionan electricidad en situaciones de emergencia cuando la energía procedente de la red no está disponible (EIA Energy Information Administration, 2011). Incluso aunque los usuarios operan alrededor de 82.000 MW de esta capacidad para funciones distintas a la potencia de apoyo, menos de 1% de los sistemas GD industriales se utilizan para producir electricidad que ayude a satisfacer los picos

de demanda u operan de manera continuada (EIA Energy Information Administration, 2011).

Un estudio llevado a cabo por el Instituto Politécnico de Virginia y la Universidad Estatal de Virginia concluyó ( Pipattanasomporn & Willingham, 2010):

- Las tecnologías de GD ofrecen ventajas comparativas respecto a las grandes plantas centralizadas en términos de eficiencia, fiabilidad y seguridad.
- En términos de eficiencia, la generación de energía próxima al lugar de consumo puede duplicar la eficiencia de las turbinas de gas de ciclo combinado y ofrece costos inferiores de capital y laborales.
- Algunos sistemas de GD son especialmente útiles para aplicaciones en donde pueda reciclarse energía de los residuos para proporcionar calor y frío a varias edificaciones.
- Tienen el potencial añadido de que la electricidad que producen es más fiable y segura en el caso de fallo del fluido eléctrico.
- Las tecnologías de GD permiten estabilizar la red y mejorar la fiabilidad del sistema en su conjunto.
- Debido a que los fabricantes de equipos pueden producir tecnologías de GD casi a cualquier escala, los operadores del sistema pueden situarla en cualquier sitio, y su modularidad significa que los generadores pueden adaptarse mejor a los pequeños incrementos de la demanda.

Los estados del sureste norteamericano (Arizona, California, Colorado, Nuevo México, Nevada, Texas y Utah), tienen el mayor potencial de energía solar del país, como se observa en la figura 4. Se estima que el recurso de energía solar tenga un potencial anual de producción de 56 millones de GWh de energía generada a partir de sistemas fotovoltaicos o con energía solar concentrada (United States Congressional Research Service (CRS), 2009).

La tasa de crecimiento anual de generación de energía eléctrica a partir de sistemas fotovoltaicos fue de 30% entre los años 2001 y 2010 (EIA Energy Information Administration, 2011). El elevado

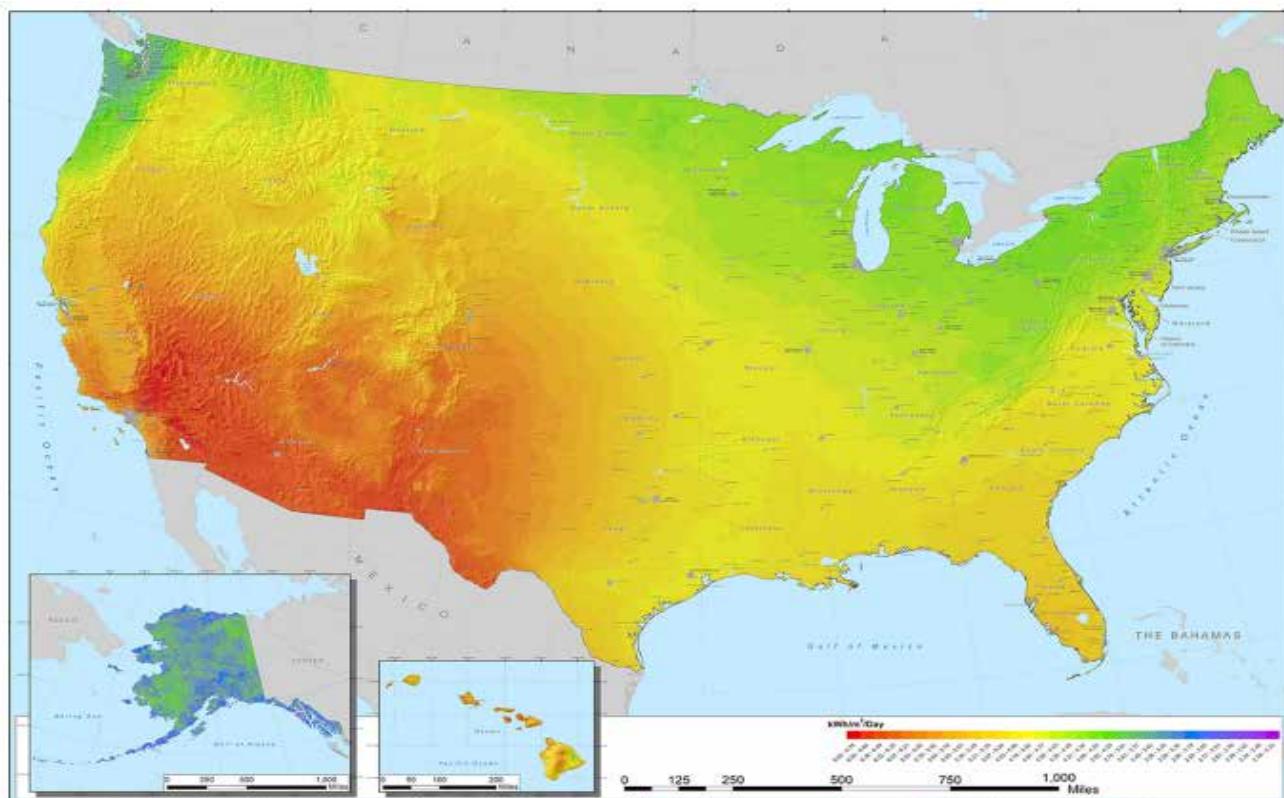
costo de la energía solar es el mayor desafío para la implementación de la GD a partir de este tipo de tecnologías. Por tal razón, DOE está financiando una iniciativa, conocida como el programa “SunShot”, cuyo objetivo es reducir el costo de generación por energía solar a menos de 60 USD/MWh (US Department of Energy (DOE), 2005).

## MARGO REGULATORIO DE LA GD

Debido a las diferentes regulaciones gubernamentales, el rango de los generadores varía dependiendo del país. En el Reino Unido las plantas de GD con capacidades menores que 50 MW no son despachadas en el mercado centralizado (Watson, 1999). La legislación sueca da tratamiento especial a los pequeños generadores con capacidad máxima hasta 1500 kW (Menges & Barsantny, 1997;

VDEW, 1998; Swedish Electricity, 1997; Wijesinghe & Lei Lai, 2011).

Las resoluciones que se encuentran en la legislación colombiana no tienen resaltadas las reglas o aspectos a tener en cuenta en el momento de hablar del concepto de GD. Sin embargo, existen ciertas definiciones que intentan introducir ideas relacionadas con esta temática, ya que algunos usuarios están empezando a emplear este tipo de tecnología para su propio uso. Dentro del marco regulatorio de Colombia se puede encontrar lo estipulado en las resoluciones CREG 084/96, CREG 085/96 y CREG 082/2002, las cuales hacen referencia a generación a pequeña escala, pero no ingresan en el marco que se tiene para generación distribuida (CREG, Comisión Reguladora de Energía y Gas, 1996; CREG, Comisión Reguladora de Energía y Gas, 2002).



**Figura 4.** Recurso solar US.

**Fuente:** (NREL National Renewable Energy Laboratory, 2013).

Como se encuentra definido dentro de la resolución CREG 084/96, se entiende por autogenerador aquella persona natural o jurídica que produce energía eléctrica exclusivamente para atender sus propias necesidades. Por tanto, no usa la red pública para fines distintos al de obtener respaldo del SIN, y puede o no ser el propietario del sistema de generación (CREG, Comisión Reguladora de Energía y Gas, 1996).

De igual forma dentro de la resolución CREG 085/96 se hace referencia a cogeneración cuando existe un proceso de producción combinada de energía eléctrica y energía térmica, que hace parte integrante de una actividad productiva, destinadas ambas al consumo propio o de terceros y destinadas a procesos industriales o comerciales (CREG, Comisión Reguladora de Energía y gas, 1996). Por tanto, cogenerador es aquella persona natural o jurídica que produce energía utilizando un proceso de cogeneración y que puede o no ser el propietario del sistema de cogeneración (CREG, Comisión Reguladora de Energía y gas, 1996).

A tenor de las definiciones dadas con anterioridad, se dice que un autoprodutor corresponde a los autogeneradores y cogeneradores, como se enuncia en la resolución CREG 082/2002 (CREG, Comisión Reguladora de Energía y Gas, 2002). Como en Colombia no existe un esquema regulatorio para la aplicación de la generación distribuida, el concepto de autoprodutor empieza a tomar bastante fuerza debido a que este es el único término que se encuentra en la reglamentación, siendo así el único instrumento al cual se acude en el momento de empezar a emplear este tipo de tecnologías.

Por otro lado, cuando se habla de la regulación sobre GD en el contexto internacional se debe mencionar países como Alemania o España, debido a que el primero se ha considerado como el país más avanzado en cuanto a generación mediante fuentes renovables, las cuales en muchos casos implican GD (Sepulveda, 2010). Un aspecto que tienen en común estos países es que no existe una definición oficial de GD, ni tampoco una regulación, estándar o norma que hable específicamente sobre el concepto de GD (Sepulveda, 2010).

En el caso español se tiene la regulación del nuevo sistema eléctrico, esta se fundamenta en la ley 54 de 1997 del sector eléctrico y su desarrollo normativo. En esta ley se incluyen esquemas de mercado en las actividades de generación y comercialización, además de la modificación del régimen especial. Cuando se modificó el régimen especial se agregó el tratamiento de residuos, biomasa, hidráulica, eólica, solar y cogeneración (Sepulveda, 2010). La mayor parte de las instalaciones de GD en España se acogen al régimen especial.

En el caso alemán cabe destacar que la nueva ley de energías renovables regula la adquisición, el transporte y la retribución de la electricidad producida mediante algunas tecnologías de GD, donde se fijan criterios de interconexión de las mismas. En cuanto a la cogeneración, esta viene regulada en forma independiente, con criterios técnicos y de interconexión propios (Bundesministerium Der Justiz, 2009).

En el caso de Norteamérica, a diferencia de Europa y Colombia, se está legislando directamente sobre GD, aunque se habla directamente de "Recursos Distribuidos de Energía (DER, Distributed Energy Resources). Cada estado establece su propia normatividad y reglamentación, manteniendo estándares federales en común, lo cual hace que el mapa de GD sea más complicado en este país. Para solucionar el dilema de la normatividad federal, el IEEE desarrolló en 2003 un estándar para conexión de GD (IEEE Guide for IEEE Std. 1547), el cual muestra cómo trabajar con este tipo de tecnologías avaladas normativamente. Un ejemplo de iniciativa estatal es el caso del estado de California, en donde se tienen tres organismos trabajando en torno a la normatividad de GD, los cuales son la California Public Utilities Commission (CPUC), la California Energy Commission (CEC) y la California Air Resources Board (CARB) (Ackerman, Andersson, & Söder, 2001)". Estos organismos fomentan la GD a través de subsidios, incentivos para la inclusión de la misma en planes futuros de actuación. Asimismo, se incluye el sistema de medición neta, el cual permite al usuario medir la energía consumida menos la energía inyectada a la red (Grundi, 2008).

## GESTIÓN DE LA DEMANDA

La gestión de la demanda de energía (GDE) es un término ambiguo que ha sido interpretado de diversas formas en la regulación. Una definición restringida incluye todas las medidas que promuevan la reducción y/o el desplazamiento del consumo eléctrico final, mejorando la eficiencia en su utilización, pero sin modificar el contenido de los servicios finales (calor, iluminación, fuerza) que la energía eléctrica proporciona (Zeng, Liu, Wu, & Nagan, 2011; Józef, Piotr, & Mariusz, 2009). Sin embargo, es posible también contemplar medidas encaminadas a la adopción de nuevas pautas de consumo, que no han de significar necesariamente una pérdida de bienestar.

Ampliando el concepto con mayor detalle, se incluye el conjunto de acciones, ya sean impulsadas o realizadas por las empresas eléctricas, por otras empresas o instituciones o por la administración, cuyo objetivo común es influir sobre el uso que los consumidores hacen de la electricidad, de modo que se produzcan los cambios deseados, produciendo un ahorro de energía, así como el incremento de la eficiencia (Pérez, Sánchez, & Pardo, 2005), bien sea en el ámbito de un solo usuario o en la curva de demanda que represente un grupo de estos.

El establecimiento de procedimientos que hagan posible la participación activa de la demanda por parte de los consumidores hace que no solo sean informados de los precios para que puedan reaccionar ante los mismos, sino que además contribuyan activamente a la formación de estos, además de poder proporcionar servicios al conjunto del sistema eléctrico con valor de mercado, como la interrupción en situaciones de emergencia, o para resolver congestiones, proveer reservas de operación y participar en la gestión de desvíos o de la compensación de energía reactiva (Pérez, y otros, 2007; Carmeli, Marco, Catellif, Marchegiani, & Rosati, 2012).

Estos procedimientos se completan con otros que posibilitan al consumidor conocer el origen

de la electricidad que consume, con lo que se permite la diferenciación de productos. De esta forma se proporciona a los consumidores una verdadera capacidad de elección en su suministro de electricidad, junto con las contribuciones a la eficiencia y a la mejora de la operación del sistema eléctrico.

Por ello, con la implementación de la GDE es posible obtener un ahorro energético y económico por la menor utilización de combustibles fósiles importados. Finalmente, a causa de la mayor eficiencia energética y de la menor utilización de combustibles fósiles, habrá menores emisiones de CO<sub>2</sub> y de contaminantes atmosféricos.

## RECOMENDACIONES

En este documento se reunieron los conceptos y aplicaciones que se han investigado en países como Estados Unidos, España, Alemania, Italia, Japón y Colombia, sobre la generación distribuida, especialmente en los sistemas fotovoltaicos. Asimismo, se mostraron distintos marcos regulatorios, donde algunos países impiden el desarrollo de este tipo de tecnología, o por el contrario, favorecen el avance de estas.

Por tanto, partiendo de todos los contenidos presentados en este documento, es preciso mencionar que para lograr adecuar e implementar los sistemas fotovoltaicos como alternativa de GD se debe trabajar con un sistema que permita entregar energía tanto al sistema de potencia como al usuario; conocido como SFVCR (Sistema Fotovoltaico Conectado a la Red).

Se recomienda trabajar con SFVCR, puesto que este permite ser adaptado en las futuras tecnologías que utilicen el concepto de GD aplicado a redes inteligentes, donde el usuario puede tener conocimiento de los eventos en tiempo real de su sistema de generación y del sistema de potencia, lo cual lo convierte en una parte activa de la gestión de la energía.

Por el alto costo de este tipo de tecnología, es pertinente realizar un estudio económico que muestre cómo se recuperaría la inversión inicial a mediano

y largo plazos. De este modo es posible conocer la factibilidad que este tipo de aplicaciones puede brindar tanto al usuario como al sistema de potencia.

En aquellos países en donde no se cuenta con un marco regulatorio que no comprenda el uso masivo de generadores fotovoltaicos a pequeña escala, se recomienda que no exista inyección de energía a la red. Pero en el caso en que esto no se cumpla, los excedentes deberán ser mínimos, es decir, la generación debe ser cercana a la demanda. Esto permitirá que no existan discrepancias entre el operador de red y el usuario que tenga su propio sistema de generación a pequeña escala.

## FINANCIAMIENTO

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

## REFERENCIAS

- Ackermann, T.; Andersson, G., & Söder, L. (2001). Distributed Generation: A definition. *IEEE Electric Power System Researche*, 57, 195-204.
- Assi, A.; Jama, M., & Al Kathairi, K. (2009). MATLAB-Based Modeling tool for designing, predicting and analyzing Grid Tied Photovoltaic Systems. *ACTEA International conferences on:Advance in computational tools for engineering applications*, 508-513.
- Aste, N.; Adhikari, R., & Del Pero, C. (2011). Photovoltaic Powered Distributed Generation Development in the Italian Context. *Clean Electrical Power (IC-CEP), International Conference on*, 769-773.
- Bayod, A. (2012). Future development of the electricity systems with distributed generation. *Electric Power Systems Research*, 84, 195-200.
- Bundesministerium Der Justiz (2009). *Ley de Energía Renovables*. (Ministerio Federal Alemán de Justicia). Recuperado el 12 de noviembre de 2012, de: [http://bundesrecht.juris.de/eeg\\_2009](http://bundesrecht.juris.de/eeg_2009)
- Caamaño, M. (1998). Edificios fotovoltaicos conectados a la Red Eléctrica: Caracterización y Análisis. En *Tesis doctoral*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de ingenieros de Telecomunicaciones.
- Cardell, J., & Tabors, R. (1998). Operation and control in a competitive market: distributed generation in a restructured industry. *The Energy Journal Special Issue: Distributed Resources: Toward a New Paradigm of the Electricity Business, The International Association for Energy Economics*, 111-135.
- Carmeli, S.; Marco, M.; Catellif, Marchegiani, G., & Rosati, D. (2012). Control Strategies and configuration on hybrid distributed generation systems. *Renewable Energy*, 41, 294-305.
- Casmus, C., & Eusebio, E. (2008). *Micro-generation evalution of the zero emission technologies in the Portuguese market*. Lisboa, Portugal: Instituto Superior de Engenharia.
- CIGRE (1998). *Impact of increasing contribution of dispersed generation on the power system; CIGRE Study Committee no 37 , Final Report*. CIGRE.
- CIRED (1999). Dispersed Generation; Preliminary Report of CIRED. *Working Group WG04*, 35-40.
- CNE (enero 2011). *Statistical information about the sales of electricity on special regime. December 2010*. España: CNE.
- Consorcio Energético CORPOEMA (diciembre, 2010). Plan de Desarrollo para las fuentes no convencionales de Energía en Colombia. Bogotá.
- Cossent, R.; Gómez, T., & Olmos, L. (2011). Large-Scale Integration of Renewable and Distributed Generation of Electricity in Spain: Current situation and Future needs. *Energy Policy*, 39, 8078-8087.
- CREG, Comisión Reguladora de Energía y Gas. (1996). *Resolución 084/96, Autogenerador conectado al sistema de interconexión nacional*. Bogotá, Colombia: Ministerio de Minas y Energía.
- CREG, Comisión Reguladora de Energía y gas (1996). *Resolución 085/1996, Conegerador conectado al SIN*. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía.
- CREG, Comisión Reguladora de Energía y Gas (2002). *Resolución 082/2002, Cargos por uso de los sistemas de transmisión regional y distribución local*. Bogotá, Colombia: Ministerio de Minas y Energía.
- CREG, Comisión Reguladora de Energía y Gas (mayo, 1998). *Resolución 070/98, Regalamento de*

- Distribución de Energía Eléctrica.* Bogotá, Colombia: Ministerio de Minas y Energía.
- E.E.P.P.M. (febrero, 2008). Jepirachi wind farm-monitoring periods January 2004-July 2006. Medellín, Colombia.
- EIA Energy Information Administration (2011). *Annual Energy Outlook 2011, Report number: DOE/EIA-0383 2011.* Estados Unidos: EIA.
- EPIA (2010). *Solar Generation 6, 2010b.* (EPIA) Recuperado el 11 de mayo de 2013, de: [www.epia.org](http://www.epia.org)
- EPIA (2013). *European Photovoltaic Industry Association* (EPIA). Recuperado el 01 de 06 de 2013, de: <http://www.epia.org/about-us/about-epia/mission-activities/>
- EPRI (2013). *Distributed Electricity Resources* (EPRI). Recuperado el 11 de mayo de 2013, de: <http://www.epri.com/Our-Work/Pages/Distributed-Electricity-Resources.aspx>
- Fathpour, S.; Tsia, K., & Jalali, B. (2007). Two-photovoltaic effect in silicon. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 43(12).
- Fundación de la Energía de la comunidad de Madrid (2012). *Guía básica de la Generación distribuida.* Madrid, España: Gráficas Elisa, S.A.
- Gerol, W., & Neudck (1990). The PN junction diode. En: *Modular series on solid state devices* (segunda ed.) Addison-Wesley Publishing Company.
- Gischler, C., & Janson, N. (noviembre 2011). *Perspectivas sobre la generación distribuida mediante energías renovables en América Latina y el Caribe.* Banco Interamericano de Desarrollo.
- Grundi, P. (2008). *Shell Energy Scenarios to 2050.* pp. 8-10: Shell Internation BV.
- GSE (2011). *Aggiornamento del numero degli impianti e della potenza installata al 28 de Febbraio 2011* (GSE). Recuperado el 11 de mayo de 2013, de: [www.gse.it](http://www.gse.it)
- Hernández, A. (2012). Conference Electric Mobility. Bogotá, Colombia: [Conferencia], Seminar: Smart Grids on Electri Mobility.
- IEA (2003). *Potetial for Building integratged photovoltaics* (IEA). Recuperado el 11 de mayo de 2013, de: [www.iea-pvps.org](http://www.iea-pvps.org)
- IEEE Guide for IEEE Std. 1547 (s.f.). *IEEE Standard for interconecting distributed resources with electric power systems.* IEEE.
- Institute, G. R. (1998). *Distributed Power Generation: A Strategy for a Competitive Energy Industry.* USA: Gas Research Institute.
- International Energy Agency (2002). *Distributed Generation in Liberalized Electricity Markets.* New York.
- Józef, P.; Piotr, B., & Mariusz, K. (2009). Hybrid Power Systems-An Effective way of utilising primary energy sources. *Renewable Energy*, 34, 2414-2421.
- Jurado, F.; Cano, A., & Carpio, J. (2004). Biomass based on micro-turbine plant and distribution network stability. *IEEE Energy Conversion and Management* (45), 2713-2727.
- Kobayashi, H., & Kurihara, I. (2009). Researche and development of grids integration distributed generation in Japan. *Power and Energy Society General Meeting 2009*, 1-8.
- Kobayashi, H., & Uemura, S. (2003). Development of Autonomus demand area power system in CRIEPI. *IFAC, Symposium on power plants and power system control 2003.*
- Lopes Ferreira, H.; Costescu, A.; L'Abbate, A.; Minneo, P., & Fulli, G. (2011). Distributed Generation and Distribution Market Diversity in Europe. *Energy Policy*, 39, 5561-5571.
- Menges, R., & Barsantny, K. (1997). Die Liberalisierung der Strommärkte in Norwegen und Schweden. *Zeitschrift für Energiewirtschaft, Energiewirtschaftliches Institute an der Universität Köln*, 21, 39-56.
- Meyer, B.; Banberger, Y., & Bel, I. (2010). Integration of distributed energy resources. *IEEE Power and Energy Society General Meeting.*
- Ministry of Industry, Turism and Trade (2010). *National Action Plan on Renewable Energies in Spain (PANER) 2011-2020.* España: Ministry of Industry, Turism and Trade.
- Murillo, S., & Roldan, P. (2012). Model of Application of Distributed Generation in Colombia Rural Zones. *IEEE Transmission and distribution conferences and exposition (T&D); Power and Energy Society*, 1-9.
- NREL, National Renewable Energy Laboratory (2013). *United States Photovoltaic Solar Resource: Flat*

- Plate Tilted at Latitude (NREL). Recuperado el 01 de 06 de 2013, de: [http://www.nrel.gov/gis/images/map\\_pv\\_national\\_hi-res\\_200.jpg](http://www.nrel.gov/gis/images/map_pv_national_hi-res_200.jpg)
- Ochoa, F. (2002). *El sector eléctrico colombiano: orígenes, evolución y retos, un siglo de desarrollo (1882-1999)*. Interconexión Eléctrica Colombia S.A ESP (ISA).
- Pepermans, G.; Driesen, J.; Haeseldonckx, D.; Belmans, R., & D'haeseleer, W. (2005). Distributed Generation: Definition, Benefits and Issues. *Energy Policy*, 33, 787-798.
- Pérez, A.; Alfonso, D.; Álvarez, C.; Ibáñez, F.; Sánchez, C., & Segura, L. (2007). Hybrid Biomass-wind Power Plant for Reliable energy Generation. *Renewable Energy*, 35, 1436-1443.
- Pérez, J.; Sánchez, L., & Pardo, M. (2005). La gestión de la demanda de electricidad. *Fundación Alternativas*, 1, 7, 8, 25.
- Pipattanasomporn, M., & Willingham, M. (2010). *White Paper on "Distributed Generation"*. Virginia: Alexandria Research Institute, Virginia Tech, VA.
- REN21 (2012). *Renewable Energy Policy Report. Global Statutus Report 2011*. pp. 1-80.
- Rodríguez, H. (noviembre, 2008). Desarrollo de la Energía Solar en Colombia y sus perspectivas. *Revista de ingeniería Universidad de los Andes* (9), 83-100.
- Ruiz, S.; Colmenar, A.; Gil, R., & Molina, A. (mayo 2013). Distributed Generation: The Definitive Bost for Renewable Energy in Spain. *Renewable Energy*, 53, 354-364.
- Sepúlveda, J. (2010). La generación distribuida en España. *Tesis de pregrado*. Madrid, España: Universidad Carlos III de Madrid, Ingeniería Técnica Industrial-Electricidad.
- Sharma, D., & Bartels, R. (1998). Distributed electricity generation in competitive energy markets: a case study in Australia. *The Energy Journal Special issue: Distributed Resources: Toward a New Paradigm of the Electricity Business, The International Association for Energy Economics*, 17-40.
- Singh, A. K., & Parida, S. K. (diciembre 16-19 2012). Need of distributed generation for sustainable development in coming future. *International Conferences on Power Electronics, Drives and Energy Systems*, 1-6.
- Stetz, T.; Marten, F., & Braun, M. (2013). Improved Low Voltage Grid-Integration of photovoltaic systems in Germany. *Sustainable Energy, IEEE Transactions*, 4(2), 534-542.
- Strachan, N., & Dowlatbadi, H. (2002). *Distributed Generation and Distribution Utilities*. Energy Policy. Swedish Electricity (1997). *SFS 1997:857*. Swedish Electricity.
- United States Congressional Research Service (CRS). (2009). *Annual Energy Review 2009*. Estados Unidos: CRS.
- US Department of Energy (DOE). (2005). *Basic Research Needs for Solar Energy Utilization: Report on the basic energy sciences workshop on solar energy utilization*. Washington D.C: DOE.
- VDEW (1998). *Die Nordische Elektrizitätswirtschaft im Wettbewerb, Bericht über die VDEW Studienreise nach Norwegen*. Frankfurt, Alemania: VDEW.
- Watson, J. (enero de 1999). Perspective of Decentralised Energy Systems in a liberalised Market: The UK Perspective. *Rolf Wüstenhagen, Thomas Dyllick, St. Gallen, Institute for Wirtschaft und Ökologie (IWO)-Diskussionsbeiträge* (72), 38-47.
- Wijesinghe, A., & Lei Lai, L. (2011). *Small Hydro Power Plants Analyse and Development*. Beijing, China: State Grid Energy Research Institute.
- Wizwlius, T. (1998). Series of Offshore Projects Planned. *Wind Power Monthly*, 14 (10), 23-24.
- Zeng, J.; Liu, J.; Wu, J., & Nagan, H. (2011). A multi-agent solution to energy management in hybrid renewable energy generation system. *Renewable Energy*, 36, 1352-1363.
- Zuñiga, I., & Botina, Y. (2012). Technical Economic study for the implementation of autonomous photovoltaic system in the residential sector of Colombia. *Transmission and Distribution: Latin America Conferences and exposition*, 1-5.



## **Diseño y construcción de un fotogoniómetro para el laboratorio de iluminación de la Universidad Distrital, Sede tecnológica**

### **Design and construction of a goniophotometer for the lighting laboratory at District University, faculty of technology**

José David Cortés Torres\*, Wilson Fernando Rodríguez Rodríguez\*\*,  
Hugo Armando Cárdenas Franco\*\*\*

Citation / Para citar este artículo: Cortés Torres, J. D., Rodriguez Rodríguez, W. F., & Cárdenas Franco, H. A. (2014). Diseño y construcción de un fotogoniómetro para el laboratorio de iluminación de la Universidad Distrital, Sede Tecnológica. Revista *Tecnura*, Edición especial, 173-187.

**Fecha de recepción:** 4 de febrero de 2014 / **Fecha de aceptación:** 16 de mayo de 2014

#### **RESUMEN**

En este artículo se presentan los resultados del diseño y construcción de un fotogoniómetro para un laboratorio de iluminación. El dispositivo cuenta con la instrumentación y mecánica necesarias para efectuar fotometrías de tipo C sobre luminarias de alumbrado público. En particular, pueden realizarse las pruebas conocidas como matriz de intensidad, curvas polares y curvas isolux. El equipo trabajó con luminarias no superiores a 10 kg de peso y 1.27 m de longitud. El proceso de diseño incluyó la instrumentación de dos sensores fotométricos, los cuales enlazados con un procesador PSoC Cypress hacen que la adquisición y tratamiento se hagan en tiempos inferiores a los requeridos por equipos convencionales. En el futuro cercano, se realizarán ajustes con el fin de implementar fotometrías de tipo B.

**Palabras clave:** curva fotométrica, fotogoniómetro, PSoC, sensor fotométrico.

#### **ABSTRACT**

This paper presents the design and construction of a goniophotometer for a general purpose lighting laboratory. The construction process required the tuning of instruments as well as building mechanical components to perform type C goniophotometries of street lighting. In particular, the device allows carrying out tests such as intensity matrix, and polar and isolux curves. The mechanism capacity allows luminaries under 10 kg weight and 1.27 m length. The design process included the tuning of two photometric sensors, which in conjunction with a PSoC Cypress processor allow acquiring and processing signals faster than conventional devices. In the near future, minor adjustments in the device will permit type B goniophotometries.

**Key words:** Goniophotometer, photometric curve, photometric sensor, PSoC.

\* Ingeniero eléctrico, estudiante de maestría en ingeniería eléctrica, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, jose.cortes@correo.uis.edu.co

\*\* Ingeniero eléctrico, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. wfrodriguezr@correo.udistrital.edu.co

\*\*\* Ingeniero electricista, especialista en cartografía digital, diplomado en iluminación y alumbrado público; docente Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. hacardenas@udistrital.edu.co

## INTRODUCCIÓN

Un instrumento llamado fotogoniómetro es un elemento que permite caracterizar la distribución espacial regular e irregular del flujo luminoso de las luminarias que son puestas a prueba, por medio de la variable de iluminancia. En este proyecto se diseña y se construye un instrumento para la medición de esta características en luminarias de alumbrado público y luminarias pequeñas, con la debida integración de elementos de tecnologías de punta, como tarjetas de desarrollo (PSoC), interfaz gráfica Labview y comunicación USB. El núcleo central del proyecto consiste en el control general del sistema y se basa en la tarjeta de desarrollo PSoC 3/5 (tecnología de desarrollo Cypress CY8C-KIT030); se usan dos motores paso a paso con caja reductora para cada uno de los ejes de movimiento al igual que el acople individual de codificadores (encoder) incrementales/absolutos de resolución de 11 bits (expandibles a 4 x 11 bits mediante software). La conexión entre los periféricos y la tarjeta de control principal se hizo mediante cable UTP de categoría 6 debido a las conexiones físicas de calidad superior para la alimentación, control y lectura de los diferentes dispositivos. Adicionalmente la interface máquina-humano, HMI (Human Machine Interface) y el control del fotogoniómetro fueron desarrollados en Labview, mediante una aplicación que permite controlar y registrar las diferentes mediciones que se deseé realizar. Todos estos elementos serán instalados en el laboratorio de iluminación destinado para dicho propósito.

Para hacer el diseño del fotogoniómetro se tuvieron en cuenta tres aspectos básicos. El diseño mecánico, el diseño fotométrico y el diseño óptico, según consideraciones generales de las normas CIE 84 (Commission Internationale de L'éclairage, 1989), CIE 121 (CIE Commission Internationale de L'éclairage, 1996), CIE 70 (CIE Commission Internationale de L'éclairage, 1987), CIE 69 (CIE Commission Internationale de L'éclairage, 1987), CIE 102 (CIE Commission Internationale de L'éclairage,

1993), LM-75 (IESNA Illuminating Engineering Society of North America, 2001) , LM-63 (IESNA Illuminating Engineering Society of North America, 2002) e LM-69 (IESNA Illuminating Engineering Society of North America , 2002).

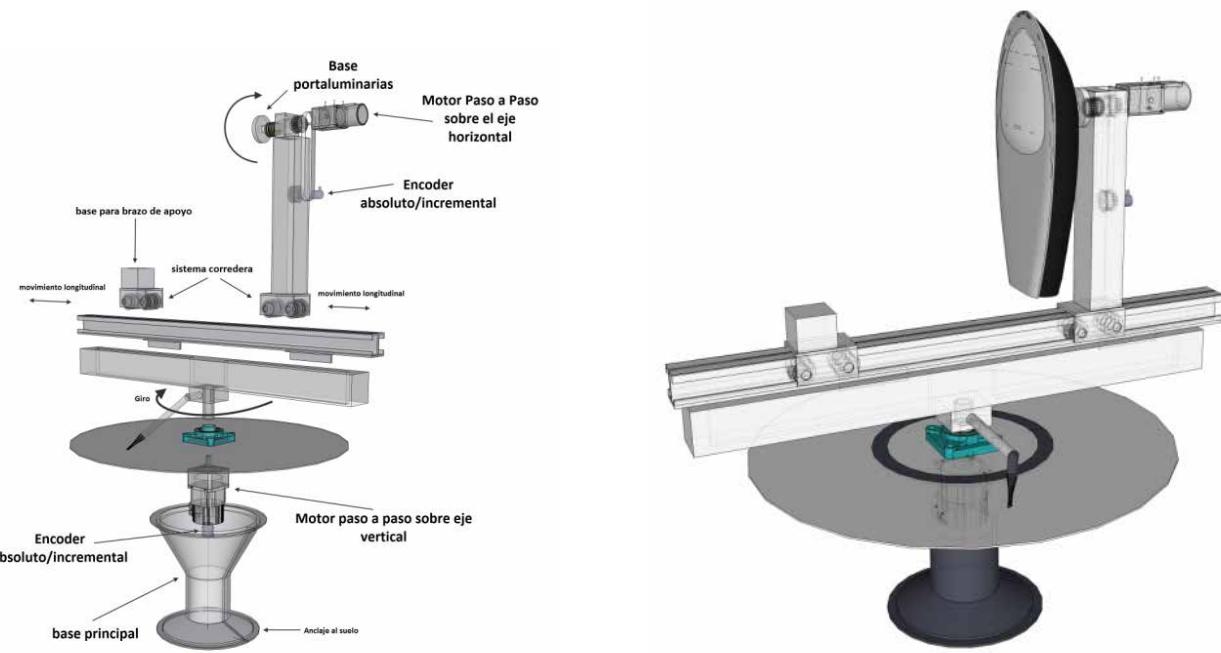
## METODOLOGÍA DE DESARROLLO

Para el diseño y construcción del fotogoniómetro se tuvieron en cuenta aspectos propios en el desarrollo del prototipo, como diseño mecánico, óptico, fotométrico, eléctrico y la interfaz de usuario.

### Diseño mecánico

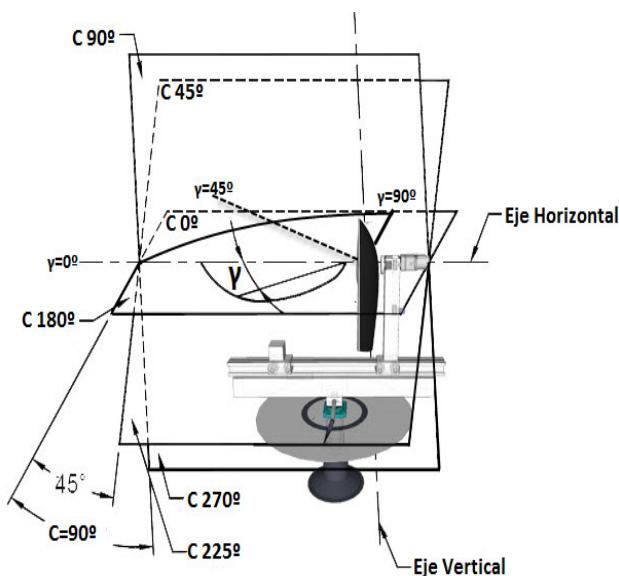
El diseño mecánico está constituido básicamente por una estructura empotrada al suelo con tuercas de sujeción, como se puede observar en la figura 1. La estructura principal posee un riel con un sistema de corredera sobre el cual se sopor- ta un mecanismo o columna, soportando uno de los motores paso a paso para la rotación sobre el eje horizontal; este es el encargado de dar rotación al plano C para obtener una fotometría de tipo C. A su vez, este riel está soportado sobre un rodamiento axial de otra base, la cual tiene otro motor paso a paso para la rotación del plano Y para el mismo tipo de fotometría. Los motores que están acoplados a este sistema son del tipo paso a paso, puesto que garantizan la exactitud en los desplazamientos angulares que se desea conseguir para las pruebas; además de ser mucho más económicos que los servomotores actuales, tienen las características mecánicas y eléctricas suficientes para la aplicación.. Las figuras 2 y 3 muestran las razones mecánicas de diseño por las que el fotogoniómetro se estableció de esta manera. En la gráfica se aprecia la relación entre la máquina y la referencia de los tipos de fotometría C y B, respectivamente.

El eje horizontal puede girar libremente ya que posee un sistema sencillo de escobillas que evitan el cable de energización de la luminaria.



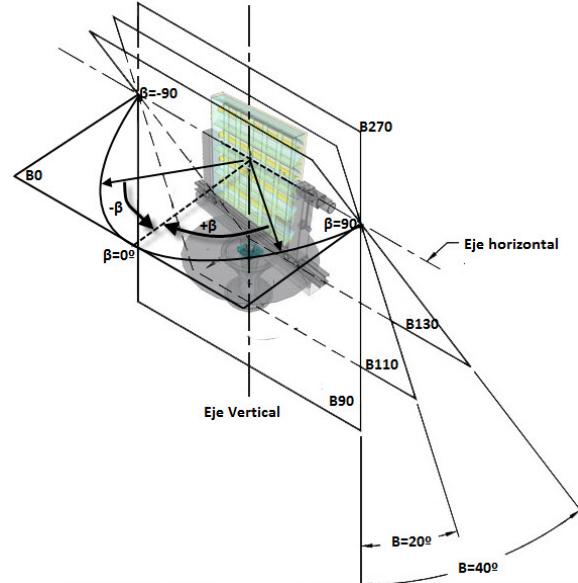
**Figura 1.** Fotogoniómetro automático computarizado: a) Vista isométrica en explosión; b) Sistema ensamblado en el laboratorio.

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 2.** Sistema de coordenadas y montaje luminaria AP para fotometría de tipo C.

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 3.** Sistema de coordenadas y montaje luminaria interior para fotometría de tipo B.

**Fuente:** Elaboración propia.

Es posible realizar la conversión entre los diferentes tipos de fotometrías, ya que para luminarias de tamaño superior a 30 cm se debe hacer una fotometría de tipo B (NTC Instituto de Normas Técnicas Colombianas, 2002) y convertirla a la requerida mediante las fórmulas consignadas en la tabla 1; sin embargo, el prototipo diseñado contempla la fotometría de tipo C. El procedimiento para la conversión entre fotometría está consignado en la Norma Técnica Colombiana (NTC Instituto de Normas Técnicas Colombianas, 2002).

Para el dimensionamiento de los requerimientos mecánicos del dispositivo fue necesario tener

en cuenta el peso de las luminarias (máximo 10 kg). Este determina cuánto torque deben tener los motores en cada uno de los ejes para que al girar, estos sean capaces de vencer la inercia y cargas de masa adicionales (usando el teorema de ejes paralelos), (Hibbeler, 2004) a la que son sometidos debido al movimiento. Se decide usar motores paso a paso con cajas reductoras puesto que la precisión de posicionamiento angular es uno de los factores clave para que las mediciones sean coherentes. La tabla 2 muestra las especificaciones técnicas de los motores que se usaron en desarrollo del proyecto.

**Tabla 1.** Ecuaciones de conversión para sistemas de planos.

Dirección		Ángulo de inclinación del plano	Ángulo en el plano
Dada	Deseada		
<i>A,a</i>	<i>B,b</i>	$\tan B = \tan a / \cos A$	$\sin b = \sin A / \sin a$
<i>A,a</i>	<i>C,g</i>	$\tan C = \tan a / \sin A$	$\cos g = \cos A / \cos a$
<i>B,b</i>	<i>A,a</i>	$\tan A = \tan b / \cos B$	$\sin a = \sin B / \cos b$
<i>B,b</i>	<i>C,g</i>	$\tan C = \sin a / \tan b$	$\cos g = \cos B / \cos b$
<i>C,g</i>	<i>A,a</i>	$\tan A = \cos C \tan g$	$\sin a = \sin C / \sin g$
<i>C,g</i>	<i>B</i>	$\tan B = \sin C \tan g$	$\sin g = \cos C / \sin g$

**Fuente:** (NTC Instituto de Normas Técnicas Colombianas, 2002).

**Tabla 2.** Características técnicas de los motores paso a paso.

	Motor horizontal	Motor vertical
<b>Referencia</b>	A4249-9215HG-A1 Oriental Motor	UPK596BA-PG36 Oriental Motor
<b>Resolución en grados half step</b>	0,036	0,01
<b>Torque generado</b>	18,4 N.m	37 N.m
<b>Palanca máxima permitida</b>	8 kg a 0,4 m	37 kg a 1 m
<b>Frecuencia máxima de pulsos Arranque con carga</b>	2,5 kHz	3,5 kHz
<b>Número de pasos por vuelta</b>	1000	500
<b>Inercia del rotor</b>	1,09 oz/in <sup>2</sup>	7,65 oz/in <sup>2</sup>
<b>Torque de retención</b>	18,4 N.m	37 N.m
<b>Corriente</b>	1,4A	1,4 A

**Fuente:** (Oriental Motors, 1996).

Cada motor paso a paso tiene un encoder de tipo incremental con Index (esto lo convierte en absoluto) para referenciar el cero de cada uno de los ejes y la resolución puede ser aumentada por software mediante PsoC Creator. La tabla 3 muestra las especificaciones técnicas del encoder.

**Tabla 3.** Características técnicas de ambos encoders.

#### Encoder TAMAGAWA TS5643 N110

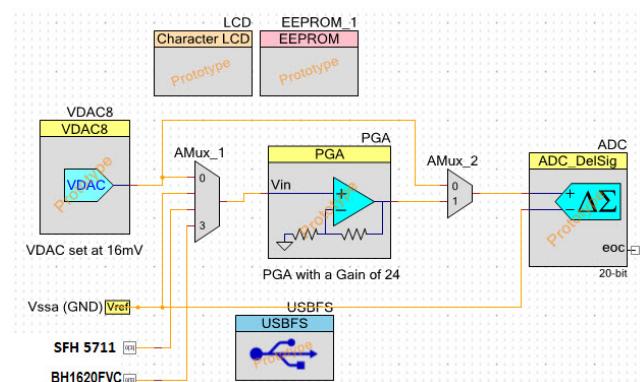
Resolución	11 bits o 2048 cuentas por vuelta
Voltaje	5 V
Corriente	150 mA
Protocolo de comunicación	26C31
salida al driver	ANSI TIA/EIA 422-B/423-B
Máxima respuesta en frecuencia	170 kHz
Momento de inercia	$1 \times 10^{-6} \text{ kg.m}^2$

**Fuente:** (Tamagawa Seiki Co, s.f.)

## Diseño fotométrico

Previamente se eligió un sensor de luz cuyo ajuste es acorde con la curva fotópica estandarizada por la CIE 121 (CIE Commission Internationale de L'éclairage, 1996); este sensor de luz fabricado por la empresa OSRAM SFH 5711 (Osram, 2006), cumple con este objetivo, dando una responsividad luminosa de 3% según el fabricante, respecto a la curva fotópica (Molina & Bermúdez, 2006), cualquier tipo de longitud de onda visible. Esto garantiza que no se requiere filtro de corrección de respuesta con relación a otros tipos de sensores de luz fabricados en silicio. El sensor de luz fue sometido a una serie de pruebas con el objetivo de determinar su comportamiento. Para hacer esta comparación se usó un luxómetro Extech HD450 (Extech, 2013), con el fin de observar cómo se comporta ante fuentes de luz estándar como son las incandescentes, fluorescentes, LED, sodio de alta presión, luz solar, entre otras, y mediante estas pruebas se desea comparar qué tan acertadas son las lecturas de iluminancia capturadas por el sensor con respecto al luxómetro, determinando un coeficiente

de correlación, el cual se ajuste con el mínimo permitido. En el sensor fotométrico se usó una tarjeta con un PsoC 3 que incorpora una ADC de 20 bits, LCD y comunicación USB HID en modo interrupción. La resolución obtenida es de 0,095 lux en un rango de 1 a 100.000 lux. El instrumento tiene auto-calibración cada vez que se conecta al computador, ajuste de ganancia, offset y errores propios de este tipo de dispositivos (Cypress, 2014). Para iluminancias menores que 1 lux se usa el sensor BH1620FVC con una resolución de 0,0005 lux en una escala de 0,05 a 500 lux. (Ver la figura 4).

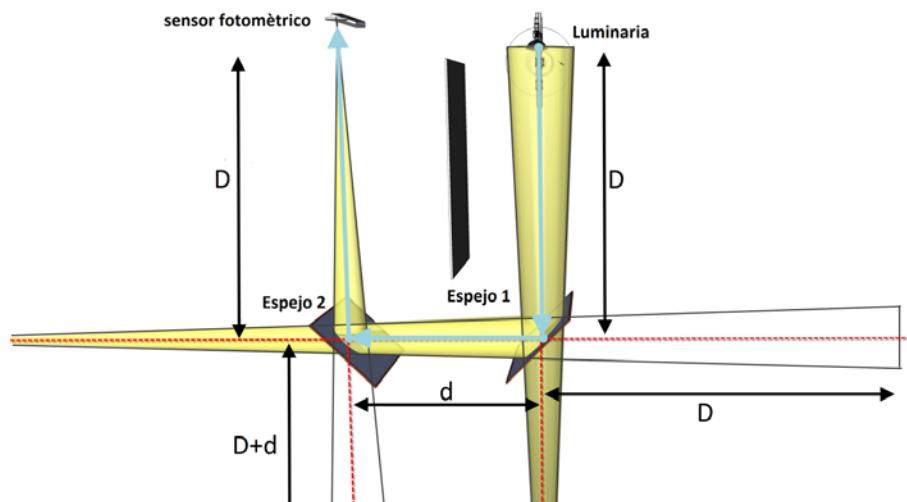


situó, los espejos deben tener una medida mínima. La figura 6 muestra la distribución de la energía radiante desde el punto en donde está la luminaria hasta el punto en donde está la cabeza fotométrica. La distancia total está definida por la suma de  $2D+d$ , la cual en este caso es 10 m.

La figura 6 muestra cuáles son las distancias efectivas que la energía en forma de radiación de la luminaria recorrerá desde la fuente luminosa

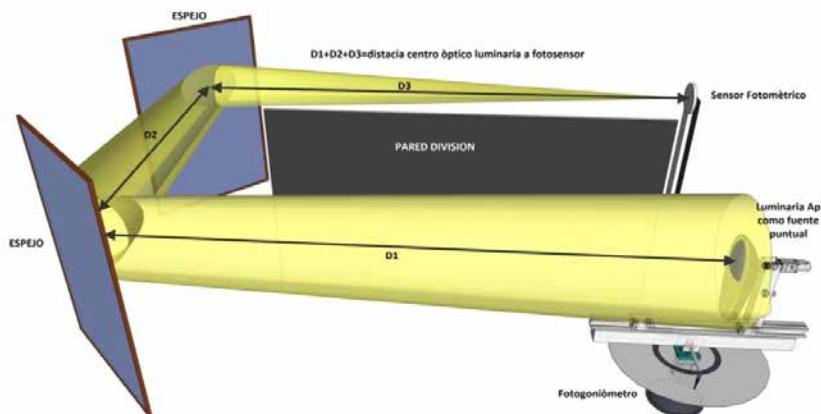
hasta la cabeza fotométrica. Están representadas por  $D_1$ ,  $D_2$  y  $D_3$ .

Para calcular el tamaño mínimo que deben tener los espejos se utiliza la trigonometría, asumiendo que el área efectiva del sensor se comporta como un punto en el espacio a la distancia en la cual se situó.



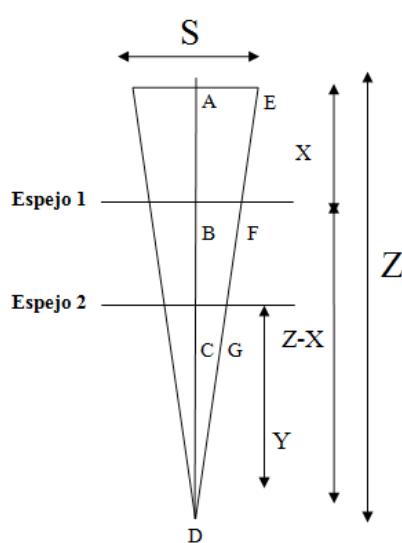
**Figura 5.** Distribución espacial de los espejos en el sitio de pruebas.

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 6.** Distribución óptica de los espejos para trasladar la energía radiante de la luminaria como fuente puntual a la cabeza fotométrica.

**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura 7.** Cálculo de los espejos del fotogoniómetro.

Fuente: Elaboración propia.

Se tiene la distancia  $S$  que representa el tamaño máximo que ocupa la luminaria en el eje horizontal de la máquina,  $X$  representa la distancia del centro de la máquina o centro óptico de la luminaria al centro geométrico del primer espejo en el eje vertical y horizontal,  $Y$  representa la distancia entre el centro geométrico del primer espejo al segundo espejo y  $Z$  representa la distancia entre el centro de la máquina y el centro de la cámara fotométrica. En la figura 7 se muestra cuáles son las mediciones que se mencionan.

Por semejanza de triángulos se llega a la conclusión de que  $\Delta ADE \cong \Delta BFD$ . Esta relación da como resultado la ecuación (1):

$$\frac{Z}{S} = \frac{Z-X}{BF} \quad (1)$$

Donde  $\overline{BF}$  es el lado de interés para calcular la longitud horizontal del espejo 1. De manera análoga se efectúan los cálculos para hallar la altura mínima que deben tener los espejos. Los resultados se muestran en la tabla 4.

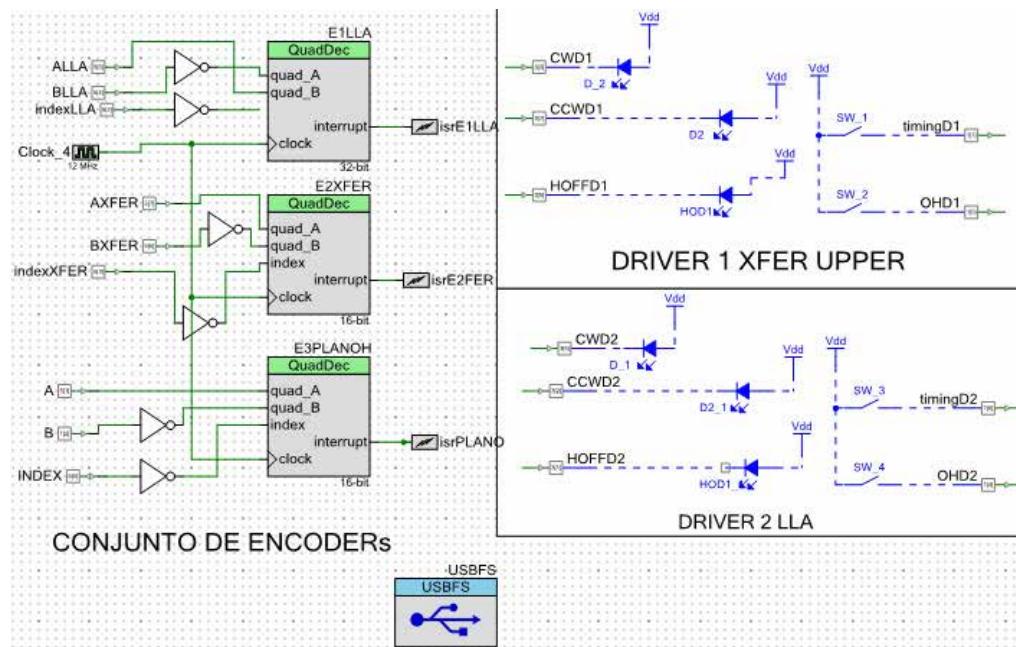
**Tabla 4.** Medidas mínimas de los espejos.

	ALTURA [ m ]	ANCHO [ m ]
ESPEJO 1	1,24	1,24
ESPEJO 2	0,77	0,77

Fuente: Elaboración propia.

## Diseño electrónico

La adquisición de datos, control del sistema mecánico y el sistema fotométrico se hicieron mediante una tarjeta de desarrollo CY8CKIT030 PsoC 3, el cual se encarga de la lectura de los codificadores incrementales/absolutos que dan la referencia y posicionamiento de cada uno de los giros de ejes del fotogoniómetro, como también el control de los perfiles de velocidad en cada uno de los motores paso a paso. En el algoritmo del procesador estará integrada la rutina para ejecutar una prueba fotométrica de tipo C o B, de acuerdo con la normatividad. La figura 8 muestra un esquema de control y lectura de los dispositivos asociados como son los encoders y drivers Super Vexta UDX5114N de los motores paso a paso. La comunicación de los primeros se hace mediante protocolo serial diferencial ANSI TIA/EIA-422-B, TIA/EIA-423-B propios del dispositivo y los segundos mediante comunicación serial sin protocolo de comunicación.



**Figura 8.** Esquema de configuración de la tarjeta de desarrollo PSoC 3.

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 9.** Funcionamiento básico del motor.

**Fuente:** Elaboración propia.

El funcionamiento básico del motor y su driver se observa en la figura 9, en la cual por cada pulso enviado al driver el motor avanza un paso. En general, es el controlador principal quien determina cuántos pasos debe girar un motor de acuerdo con la cantidad de grados que debe moverse el fotogoniómetro en el eje que se especifique.

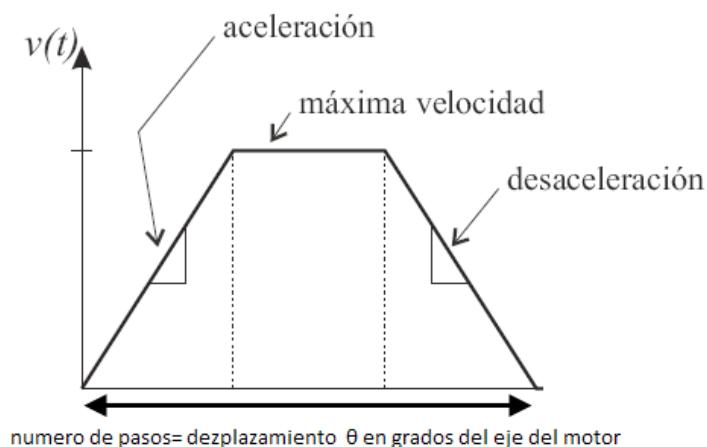
### Perfiles de movimiento

Cada luminaria tiene características (Atmel, 2006) importantes que deben tenerse en cuenta a la hora de hacer un control. Sin embargo, una de las características que desempeñan un papel importante a la hora de dimensionar los motores que desplazarán

angularmente en los planos C y Gamma (B- $\beta$ ), es el torque al iniciar el giro (Hibbeler, 2004). El peso de la luminaria genera una inercia, que el motor debe vencer. Si un motor no tiene suficiente fuerza para generar el torque adecuado podría perder sincronización con los pulsos de giro, o en el peor de los casos podría no ser capaz de realizar el movimiento que se desea. El torque requerido para hacer girar una masa depende de la aceleración angular a la cual se quiere hacer girar y la propia inercia del sistema, lo cual significa que se puede disminuir notablemente si se arranca a una baja velocidad y luego se acelera, se llega a una velocidad máxima de desplazamiento y al finalizar el recorrido se desacelera nuevamente hasta llegar al reposo. Estos cambios de velocidad en virtud del movimiento que se hace para desplazar la masa una cantidad angular definida se denominan perfil de movimiento. El perfil de movimiento depende básicamente de 3 variables importantes: la velocidad máxima, el factor de aceleración o desaceleración y la cantidad de pasos que representa el desplazamiento angular de la masa (Hibbeler, 2004). En la figura 10 se muestra gráficamente el movimiento que debe seguir el perfil para mover una masa un determinado número de pasos. Esto garantiza que la inercia de la luminaria se traslade en forma suave y adecuada a lo largo del desplazamiento angular.

## Subrutinas de programación tarjeta de desarrollo

La primera rutina consta de la calibración del ADC (Conversor Análogo Digital), en el cual se hace la adquisición de señal de fotocorriente que entrega el sensor y que posteriormente lo convierte en señales discretizadas digitales de 20 bits. La segunda rutina aporta la interconexión de los datos con la interfaz gráfica en Labview. Envía los datos que brinda información de los periféricos de manera instantánea y también recibe, de manera simultánea, las órdenes de control que el usuario desee hacer sobre la máquina. La tercera rutina ejecuta los perfiles de movimiento, dependiente de la cantidad de grados de giro que se desee en los planos C y Gamma, de la velocidad y de la aceleración de los ejes de rotación de la luminaria. La cuarta rutina envía los pulsos, su número y frecuencia a los drivers de los motores con los datos obtenidos en el cálculo del perfil de movimiento en los motores paso a paso de cada uno de los ejes. Dentro de la rutina de perfiles de movimiento existen 4 estados que son importantes para el desplazamiento de los motores en cada uno de los ejes. En la figura 11 se muestran los estados de aceleración, velocidad constante, desaceleración y parada.

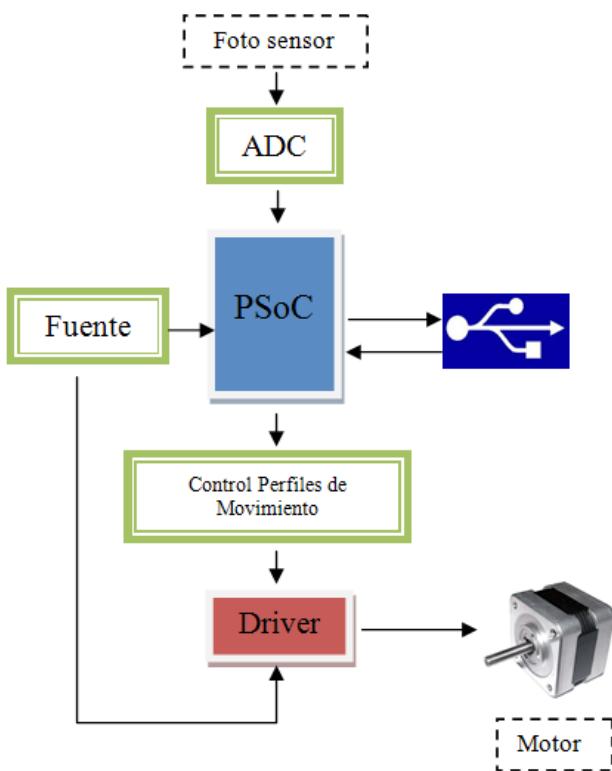


**Figura 10.** Perfil de velocidad para una cantidad de pasos establecida.

**Fuente:** (Atmel, 2006).

## Esquema general de periféricos del fotogoniómetro

La tarjeta de desarrollo es básicamente el procesador central de cada uno de los subprocesos que debe llevar a cabo una prueba fotométrica. En la figura 11 se muestra el esquema general, compuesto por los periféricos que tiene el fotogoniómetro y que forman parte fundamental del diseño.



**Figura 11.** Diagrama de bloques para procesos.

**Fuente:** Elaboración propia.

## CALIBRACIONES

### Cabeza fotométrica

Como se mencionó antes, las pruebas para comprobar la respuesta del sensor SFH5711, en comparación con las mediciones del luxómetro HD450, arrojaron los siguientes comportamientos: la figura 12 muestra

las curvas de variación de iluminancia de la fuente luminosa y la respuesta del luxómetro y del sensor SFH 5711 ante una fuente incandescente, de fabricante Sylvania, de 100 W a una distancia de 1 m.

Los resultados de las pruebas arrojan que la cabeza fotométrica diseñada tiene un coeficiente de correlación de 0.990 con respecto al instrumento referencia, lo cual permite tener confiabilidad en las mediciones que se realizarán y tendrán al menos 90% de confiabilidad.

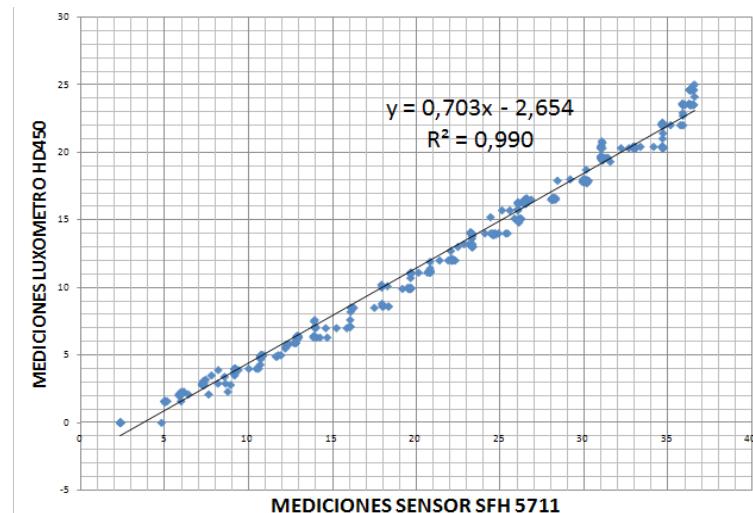
### Reflectancia de los espejos

La reflectancia de los espejos es una medida que se requiere para ajustar la magnitud de las iluminancias obtenidas, puesto que al desviar la energía radiante en forma de luz hacia la cabeza fotométrica ocurren pérdidas por absorbancia y transmittancia (Olsen, 1990) propias del material. (Hongn, Flores, Altamirano, & L. Saravia, 2011).

Existen pruebas técnicas y experimentos que sirven para determinar las características de reflectividad de estos materiales, de los cuales la opción más adecuada se encuentra en el espejo de 2 mm de espesor, pues su reflectancia ponderada es 0,79 en el espectro electromagnético de la luz visible (Olsen, 1990) (Hongn, Flores, Altamirano, & L. Saravia, 2011). Adicionalmente, debido a las fabricaciones propias de cada marca de espejos se llevó a cabo un experimento similar en donde se observa la reflectancia en virtud del ángulo de incidencia del rayo. La figura 13 muestra las pruebas que se hicieron a los diferentes espesores de espejos como función del ángulo de incidencia de la luz.

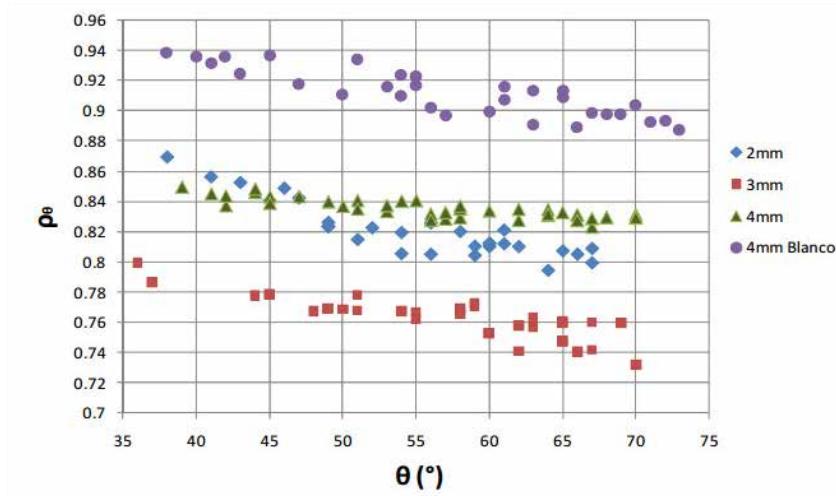
## RESULTADOS EXPERIMENTALES

Una de las pruebas que se hacen a un dispositivo con el cual se desea efectuar mediciones de variables físicas es la intercomparación con un patrón que esté certificado. Cuando se hizo dicha comparación entre la matriz que facilita el fabricante con la matriz que se obtuvo del fotogoniómetro construido, se obtuvo que el coeficiente de correlación



**Figura 12.** Resultados de prueba de intercomparación SFH5711 vs. Extech en la bombilla incandescente de 100 W.

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 13.** Experimento para determinar la reflectancia de los espejos usados.

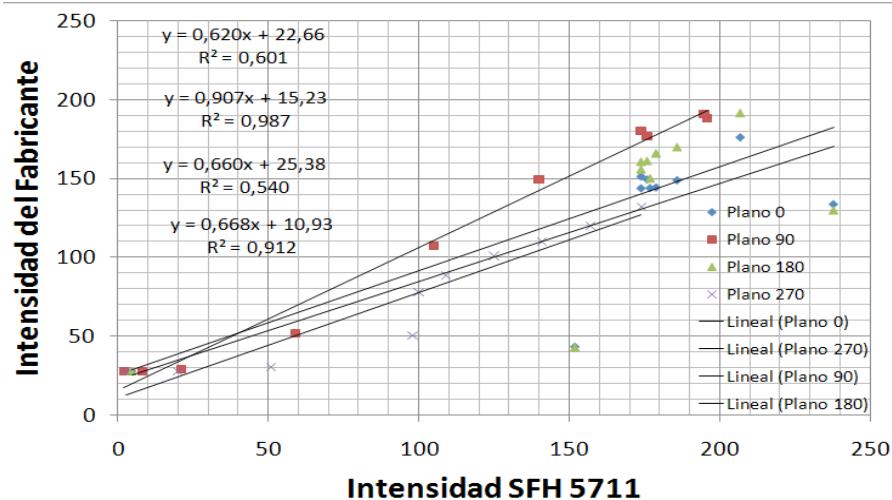
**Fuente:** (Hongn, Flores, Altamirano, & L. Saravia, 2011).

entre los dos es de 90% para la CALIMA I de 150 W, 95% para la CALIMA I de 70 W y 93% para la NANO de Schrèder, todas de sodio de alta presión. La luminaria de prueba es la NANO 1 de Schreder, cuya bombilla de prueba fue una Sylvania de sodio de alta presión de 70 W. Se hicieron mediciones en los planos representativos de la luminaria, como son el plano 0,90, 180 y 270. En las tablas

se muestran los datos de cada plano que se desea analizar y los datos del ángulo gamma entre 0 y 90 grados, la intensidad del fabricante, la intensidad medida del fotogoniómetro, el ajuste de los datos medidos a la curva de correlación, el error relativo entre los datos corregidos y los datos del patrón, y el error medio cuadrático en cada uno de los planos observados.

La figura 14 muestra la gráfica de correlación de los puntos para los planos  $C = 0$ ,  $C = 90$ ,  $C = 180$  y  $C = 270$  y las ecuaciones de correlación.

La tabla 5 muestra las mediciones efectuadas en los planos  $C = 0$ ,  $C = 90$ ,  $C = 180$  y  $C = 270$  para el ángulo gamma comprendido entre 0 y 90.



**Figura 14.** Gráfica de intensidades, plano  $C = 0$ ;  $C = 90$ ;  $C = 180$  y  $C = 270$ .

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 5.** Valores medidos por el sensor y valores dados por el fabricante.

Gamma / C	Intensidad fabricante				Intensidad SFH5711			
	0	90	180	270	0	90	180	270
0	174	174	174	174	143,677	180,017	155,716	131,669
10	176	196	176	157	149,304	188,403	161,197	119,529
20	174	195	174	141	151,17	190,955	160,621	109,907
30	177	176	177	125	143,84	177,126	150,08	100,695
40	179	140	179	109	144,251	149,624	165,99	88,4852
50	186	105	186	100	148,78	107,118	169,947	77,5685
60	207	59	207	98	176,021	51,4874	191,513	50,2877
70	238	21	238	51	133,574	28,9759	129,76	29,977
80	152	7,83	152	20	43,0783	27,5127	42,68	27,5147
90	4,52	1,96	4,52	2,56	27,5127	27,5126	27,5144	27,5149

**Fuente:** Elaboración propia.

En la tabla 6 se muestra el cálculo de los ajustes de los valores medidos por el sensor con la recta de ajuste calculada.

En la tabla 7 se muestra el cálculo de los errores en cada uno de los planos de observación y sus respectivos errores cuadráticos.

**Tabla 6.** Corrección de valores a la recta de ajuste.

Gamma / C	Corrección a la recta de ajuste			
	0	90	180	270
0	130,54	178,50573	183,23533	174,80089
10	131,78	186,11119	187,71935	158,09609
20	130,54	188,42632	187,24821	144,85571
30	132,4	175,88334	178,62543	132,17969
40	133,64	150,939	191,64015	115,37957
50	137,98	112,3864	194,8766	100,35823
60	151	61,929064	212,51759	62,819872
70	170,22	41,511135	162,0036	34,872312
80	116,9	40,183982	90,772215	31,484209
90	25,4624	40,183935	78,366804	31,484481

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 7.** Errores absolutos y errores cuadráticos de cada plano.

Gamma / C	Error relativo				E <sup>2</sup>			
	0	90	180	270	0	90	180	270
0	0,333	0,03	-0,05	0	1,20118	0,00064	0,00254	0,00002
10	0,336	-0,05	-0,06	-0,01	2,05691	0,00282	0,00390	0,00005
20	0,333	-0,03	-0,07	-0,03	2,81531	0,00122	0,00501	0,00071
30	0,337	0	-0,01	-0,05	0,90986	0,00000	0,00008	0,00295
40	0,339	0,07	-0,07	-0,06	0,78050	0,00525	0,00435	0,00306
50	0,348	0,07	-0,05	0	0,78398	0,00432	0,00207	0,00001
60	0,371	0,05	-0,03	0,56	3,55678	0,00224	0,00067	0,31362
70	0,398	0,49	0,47	0,46	10,05404	0,24415	0,22006	0,21389
80	0,3	0,81	0,67	-0,36	126,50545	0,64826	0,45498	0,13305
90	-0,82	0,95	-0,94	-0,92	0,15280	0,90483	0,88797	0,84399

**Fuente:** Elaboración propia.

En la tabla 8 se observa el resumen de los errores medios y los coeficientes de correlación en cada uno de los planos de observación.

**Tabla 8.** Errores absolutos y errores cuadráticos de cada plano.

Error medio	Coeficiente de correlación
0	3,86
90	0,42588
180	0,39769765
270	0,38876007
Error medio cuadrático general	1,9604

**Fuente:** Elaboración propia.

Después de observar los resultados, los errores medios cuadráticos en cada uno de los planos  $C = 0$  y  $C = 180$  son considerables puesto que su coeficiente de correlación es muy bajo. En los planos  $C = 90$  y  $C = 270$ , son mucho mejores puesto que el coeficiente de correlación es mucho más representativo. Sin embargo, las mediciones tienen márgenes de error considerables debido a ciertas interferencias en el mismo proceso.

## CONCLUSIONES

Se desarrolló un dispositivo que cumple con las especificaciones requeridas para el laboratorio y funciona para caracterizar luminarias de alumbrado público de sodio de alta presión.

Se logró implementar una tecnología novedosa y muy flexible en el control del fotogoniómetro y la cabeza fotométrica, como lo es la tarjeta de desarrollo PSoC 3, permitiendo así darle un instrumento al laboratorio de Iluminación de la Facultad Tecnológica, que permita construir curvas fotométricas y efectuar prácticas de laboratorio referentes a la luminotecnia.

Según la norma CIE121-1996, el tipo de fotogoniómetro apropiado para la disposición de espacio con que cuenta el laboratorio de Iluminación de la

Facultad Tecnológica es del tipo B, que está en capacidad de construir fotometrías de tipo C.

Se implementó un sensor de luz adecuado y que se aproxima con una exactitud de 98% a la curva fotópica del ojo humano, información dada por el fabricante, el cual brinda medidas de iluminancia con un porcentaje de 90% de confiabilidad respecto al luxómetro HD450 Extech debidamente patronado y calibrado. propiedad del laboratorio de Tecnología en Electricidad de la Universidad Distrital.

Se desarrolló una aplicación basada en LAB View, que permite hacer el control del fotogoniómetro por medio de un computador en conexión USB.

Las mediciones no se aproximan a lo esperado debido a ciertas interferencias propias a causa de la limitación en el presupuesto del prototipo. Realizar el ajuste en cero para todos los ejes es una tarea que puede generar errores en las mediciones. No se diseñó un dispositivo que cumpliera con esa labor. También la fuente de alimentación eléctrica para las luminarias no cumple con lo pedido por la norma. Es necesario calcular la reflectancia de los espejos para la longitud de ondapectral en cada una de las luminarias de prueba.

## FINANCIAMIENTO

Este proyecto de investigación fue financiado por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

## REFERENCIAS

- Atmel (06 de 2006). *Atmel AVR446*. Recuperado el 02 de 2013, de: <http://www.atmel.com>
- CIE Commission Internationale de L'éclairage (1996). CIE 121. *Technical Report. The photometry and Goniospectrometer of Luminaries*.
- CIE Commission Internationale de L'éclairage (1987). CIE 69. *Methods of characterizing Illuminance meters and Luminance meters*.
- CIE Commission Internationale de L'éclairage (1987). CIE 70. *The measurements of absolute luminous intensity distributions*.

- CIE Commission Internationale de L'éclairage (1993). CIE 102. *Recommended file format for electronic transfer of Luminarie*.
- Commission Internationale de L'éclairage (1989). CIE 84. *Measurement of Luminous Flux*.
- Cypress (13 de 02 de 2014). Cypress. Recuperado el 12 de 04 de 2013, de: <http://www.cypress.com/?rID=50320>
- Extech (07 de 2013). *Extech Instruments*. Recuperado el 12 de 04 de 2013, de: [http://www.extech.com/instruments/resources/manuals/HD450\\_UMsp.pdf](http://www.extech.com/instruments/resources/manuals/HD450_UMsp.pdf)
- Hibbeler, R. (2004). *Mecánica Vectorial para Ingenieros* (vol. 1). México: Pearson.
- Hongn, M.; Flores, L. S.; Altamirano, M., & L. Saravia, M. G. (2011). Estudio de reflectancia de espejos para un concentrador solar Fresnel lineal. *ASADES*, 197.
- IESNA Illuminating Engineering Society of North America (2002). LM-69 IESNA. *Approved guide for interpretation of roadway luminaire photometric*. North America.
- IESNA Illuminating Engineering Society of North America (2002). LM-63 IESNA. *Standart file format for the electronic transfer of photometric data and related information*. North America.
- IESNA Illuminating Engineering Society of North America (2001). LM-75 IESNA. *Goniophotometer types and photometric coordinates*. North America: Illuminating Engineering Society of North America.
- Marcos, A. M. (2007). *Apuntes de Fotometría*.
- Mark, R. S. (2000). *The IESNA, Lighting Handbook- Reference and Application* (vol. 1). New York: IESNA.
- Molina, J. C., & Bermúdez, J. C. (2006). Calibración de responsividad absoluta de detectores fotométricos para la realización de la candela, p. 5. Carretera a los cués, El marquéz.
- NTC Instituto de Normas Técnicas Colombianas (2002). NTC 5109. *Medición de flujo luminoso*. Colombia.
- Olsen, E. D. (1990). *Métodos Ópticos de Análisis* (vol. 1). New York: Reverté.
- Oriental Motors (1996). *Oriental Motors Catalog*. Obtenido de: <http://www.orientalmotor.com/products/CatalogPdfs.htm>
- Osram (18 de 08 de 2006). Recuperado el 01 de 07 de 2013, de: [http://www.osram.com/osram\\_com/](http://www.osram.com/osram_com/)
- Tamagawa Seiki Co. (s.f.) Recuperado el 15 de 01 de 2013, de: <http://www.tamagawa.com.tw>





## Aplicación al control de procesos batch

### Application to batch process control

Enrique Yamid Garzón González\*, Carlos Eduardo Cotrino Badillo\*\*

Citation / Para citar este artículo: Garzón González, E. Y., & Cotrino Badillo, C. E. (2014). Aplicación al control de procesos Batch. Revista *Tecnura*, Edición especial, 189-204.

**Fecha de recepción:** 29 de noviembre de 2013 / **Fecha de aceptación:** 11 de julio de 2014

#### Resumen

En este documento se muestra el diseño e implementación de una plataforma de control para proceso Batch, dicha plataforma de control permite la elaboración y aplicación de secuencias programadas (recetas), así como la modificación y operación de los diferentes lazos de control a partir de las variables de proceso. Para esto, se integraron tres plantas en cascada de análisis de pH, térmica y nivel (flujo de la marca Amatrol que se encuentran en los Laboratorios de la Universidad Distrital, Facultad Tecnológica), la sensórica de campo (RTD, pH metro, medidor de caudal, ultrasonido, presión diferencial) empleada mide de manera continua las variables de la receta a través de los PLC S7-300, y procesa la variable medida en cada uno de los lazos de control. En caso de presentarse alguna variación en el proceso dada por la materia prima, cambios ambientales, etc., el controlador PID y sus variantes regulan el sistema de tal manera que se mantengan las cantidades requeridas de la mezcla, todo por medio del software TIA Portal 12 (Step 7 y WINCC). Asimismo, se puede verificar el histórico de las alarmas y un reporte que indica las recetas generadas con el PLC Siemens (SIMATIC CPU 313C) en el tablero de control, en el PC

con visualización en 42'', y en la interfaz hombre – máquina HMI. Esta investigación y su desarrollo fueron co-financiadas con los equipos existentes en los laboratorios de la Universidad Distrital, por un valor aproximado de \$170.000.000 de pesos.

**Palabras clave:** control PD, control PI, control proporcional, control de procesos, sistemas de producción Batch, sistemas SCADA.

#### Abstract

This paper presents the design and implementation of a control platform for Batch process, this control platform enables the development and application of programmed sequences (recipes), as well as the modification and operation of the different control loops from variables in the process. For this, three plants were integrated in a cascade pH analysis-based model, Thermal and Level (Flow of Amatrol brand found in the Laboratories of District University, Faculty of Technology), the field sensor technology (RTD, pH meter, flow meter, ultrasound, differential pressure) used measures recipe variables continuously through the PLC S7-300, and processes the measured variable in each of the control loops. In case of any variation in the process given

\* Ingeniero en control electrónico e instrumentación, especialista en instrumentación electrónica, magíster en ingeniería electrónica. Docente, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: [eygarzong@udistrital.edu.co](mailto:eygarzong@udistrital.edu.co)

\*\* Ingeniero electrónico, magíster en ciencias de la state. Profesor asociado de la Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia. Contacto: [ccotrino@javeriana.edu.co](mailto:ccotrino@javeriana.edu.co)

by raw material, environmental changes, etc., the PID controller and its variants regulate the system so that the required amounts of the mixture are kept, all by means of the TIA Portal 12 (Step7 and WinCC). Likewise, it is possible to check the alarms record and a report indicating the recipes generated with Siemens PLC (SIMATIC CPU 313C) in the control panel, in the PC with 42" display, and in the

human-machine interface HMI. This research and its development was co-funded with the available equipment in the laboratories at District University, with an approximate value of (COP) \$ 170 million.

**Keywords:** Batch production systems, PD Control, PI Control, Proportional Control, Process control, SCADA systems.

## INTRODUCCIÓN

Se ha desarrollado una plataforma didáctica (entrenador) emulando un proceso industrial en donde se involucran los equipos, actuadores y sensores que a continuación se mencionan, así como un marco conceptual asociado a los procesos de automatización.

La integración de los tres niveles de la estructura jerárquica de automatización, esto es, los niveles de campo, de control y de supervisión junto con la generación de un control de proceso de tipo Batch, teniendo en cuenta lazos de control para sistemas de pH, térmicos, nivel y flujo, involucrando sensores y actuadores, controladores lógicos programable PLC, interfaz humano-máquina (HMI) a través de medios de comunicaciones industriales, se pueden estudiar con el modelo de plataforma didáctica, cuyos componentes se describen a continuación.

## CONTROL BATCH

Generalmente se entiende como sistemas Batch aquellos sistemas de control que gestionan y ejecutan una fabricación acotada, en número de unidades o en tiempo, de un determinado producto de características predefinidas por una fórmula o especificación (Rockwell Automation, 2003). A estas producciones se les asigna una matrícula que identifica a todos los componentes que forman parte de la fabricación. También pueden utilizar sistemas

Batch para procesos continuos, consiguiendo de algún modo ordenar y secuenciar la utilización de las instalaciones que forman parte del proceso productivo (Chacon R, Rondon M, Quintero G, & Rojas A, 2009)(Holy & Pozivil, 2002).

Dentro de la pirámide de automatización, estos sistemas están comprendidos entre la parte de supervisión (sistemas Scada) y la parte de MES (gestión y ejecución de la información de planta), (Fonseca Velasquez & Fino Sandoval, 2003), (Garzón Gonzalez, Camargo Casallas, & Bejarano, 2011). La parte de supervisión es la encargada de ejecutar las órdenes hacia los sistemas de control, la parte de MES es la encargada de recoger, almacenar y empaquetar la información procedente de los sistemas de control durante la fabricación del Batch. Al tratarse de sistemas con capacidad de decisión, a cuanta más información puedan acceder, mayor criterio tienen para decidir. Deben ser capaces de comunicarse con otros sistemas de fábrica. Es probable que deban comunicarse con sistemas corporativos para conocer el estado de los stocks de las materias que se pretende utilizar para la fabricación. También es probable que dichos sistemas corporativos requieran que el sistema Batch les reporte las cantidades realmente utilizadas de cada material (Behary, Ah King, & Rughooputh, 2004). También deberán comunicarse con los sistemas de control de calidad para avisarles que se debe efectuar algún test y con otros departamentos que intervienen en el ciclo de producción. El

sistema de control Batch es un sistema de control de procesos de producción por lotes cuyo estándar queda definido en la normativa ISA.S88. Se basa en la ejecución de una receta de producción, garantizando la trazabilidad y seguridad del sistema (Chacon R, Rondon M, Quintero G, & Rojas A, 2009).

En un proceso Batch se ejecuta una secuencia de operaciones encadenadas, cada una de las cuales está controlada por una o varias fases que realizan funciones simples como carga de agua, adición, agitación, calentamiento, enfriamiento, mezcla, etc. (Serna Quilindo, Vergara González, & Flórez Marulanda, 2011). En el sistema de gestión Batch el operador podrá seleccionar, previa autorización, la receta de producción, la fórmula y ejecutar en modo automático o manual las distintas secuencias de operación (Ibrahimkadiü & Kreso, 2011) (Deitz, Todd, & Murray, 2003).

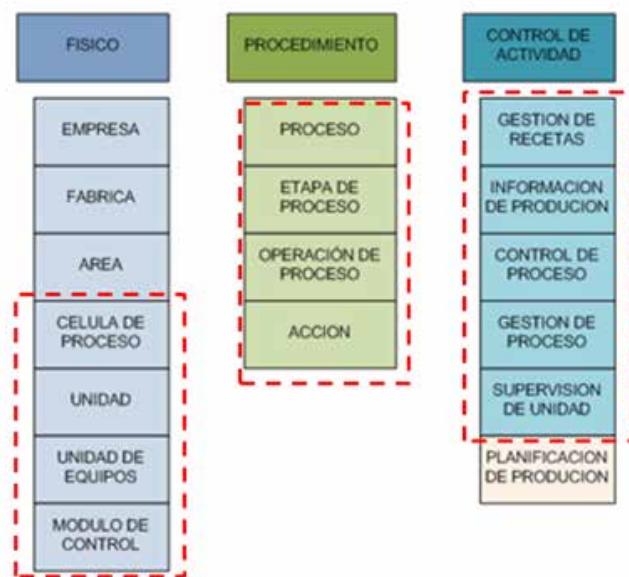
En la figura 1 se presenta un resumen que describe el modelo de proceso batch acorde con la norma ISA-S88 dada en sus apartes: Parte 1. Modelos,

definición de términos, tipos de recetas, secuencia de actividades; Parte 2. Estructura de datos, estructura de lenguaje, materiales (entradas, parámetros y salidas); Parte 3. Implementación, receta, estructura de fabricación; Parte 4. Registro de producción, lote, identificación de objetos, descripción de clases de objetos y atributos.

## METODOLOGÍA

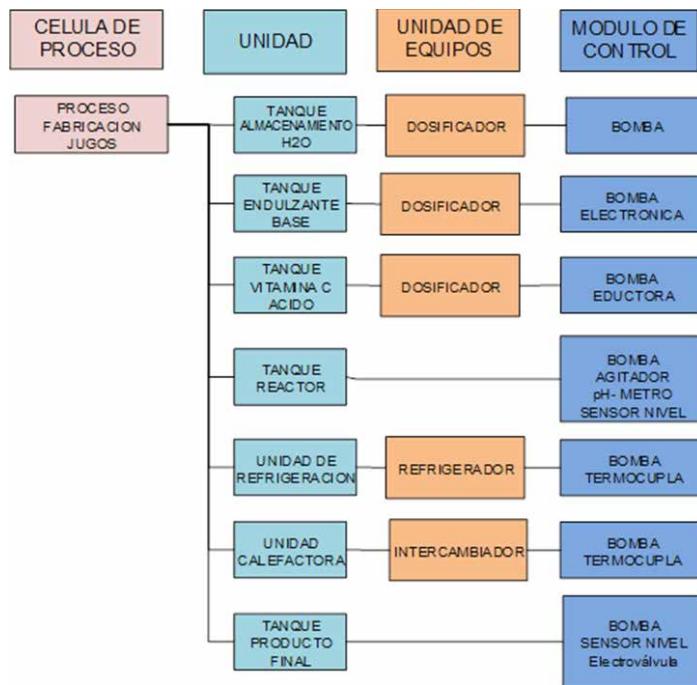
El sistema de control Batch desarrollado permite procesar la información y operar en tiempo real bajo un sistema de automatización realizando tareas de control, supervisión y monitoreo constante al proceso, permitiendo desarrollarse como una herramienta práctica en la enseñanza de procesos industriales a manera de entrenador.

En la figura 2 se muestra el modelo físico de la solución propuesta; en él se propone una solución para la fabricación de jugos, el modelo descrito presenta las unidades, los equipos y el módulo de control.



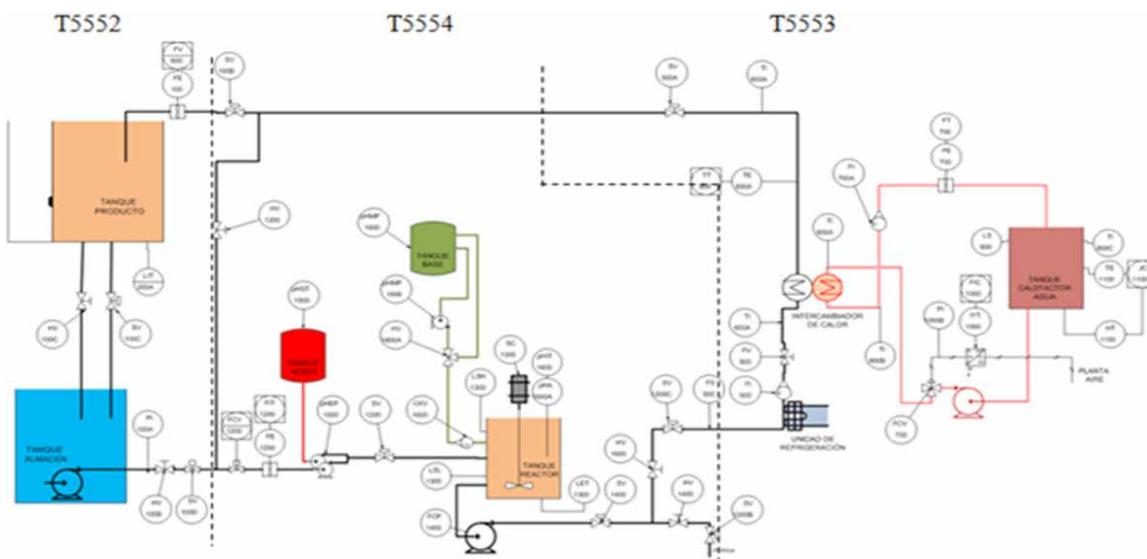
**Figura 1.** Descripción de un proceso batch – ISA-S88.

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 2.** Modelo físico del control batch.

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 3.** Diagrama P&ID de las plantas en cascada para control Batch.

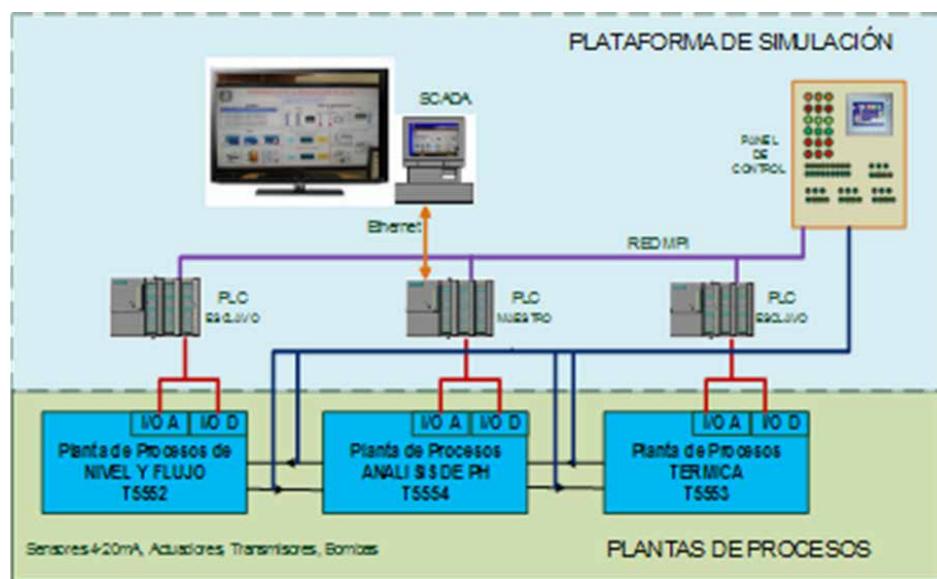
**Fuente:** Elaboración propia.

Se integraron tres plantas de procesos AMATROL. INC. en cascada; en la figura 3 se presenta el diagrama P&ID de las plantas: Nivel flujo (T5552), Análisis de pH (T5554) y térmica (T5553), con otros equipos e instrumentos, PLC Siemens (SIMATIC CPU 313C), tablero de control, PC con visualización en 42" y la Interfaz hombre-máquina HMI, todo por medio del software TIA Portal 12 (Step 7 y WINCC). Dicha plataforma de control permite la elaboración y aplicación de secuencias programadas (recetas) y la modificación y operación de los diferentes lazos de control a partir de las variables de proceso.

Ya que las tres plantas de procesos son sistemas independientes se puede desarrollar lazos de control abiertos y cerrados o controles ON/OFF, permitiendo observar y evaluar los diferentes elementos de un sistema control y automatización como sensores, transmisores, registradores e indicadores y actuadores; en la figura 4 se muestra como se enlazaron las tres plantas en un proceso de automatización a partir de la medición de las diferentes variables como temperatura, nivel,

caudal, flujo y pH por medio de diferentes principios de medición como de diferentes sensores, con indicadores locales para monitoreo, transmisores industriales de 4-20 mA y elementos finales de control como bombas, válvulas proporcionales y electroválvulas, todo esto controlado por medio de los PLC S7-300 SIEMENS a través de los lazos de control abiertos, cerrados u on/off, que por medio de una comunicación industrial Ethernet enlaza un PC con el PLC maestro, permitiendo implementar el control por lotes (control batch) para todo el sistema; a su vez se incorporó una interfaz hombre-máquina (HMI) para supervisión y monitorero, ayudando a monitorizar la capacidad de proceso, el rendimiento y la calidad del producto y al mismo tiempo reducir las variaciones del proceso y las intervenciones humanas.

La plataforma de simulación fue desarrollada bajo un control de proceso batch, en donde se mide de manera continua las variables de proceso y se genera la receta de manera secuencial, como se muestra en el diagrama de procesos (tabla 1) y el usuario define la mezcla requerida y la cantidad.



**Figura 4.** Red multi-sistema.

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 1.** Diagrama de procesos.

PROCESO	ETAPA DE PROCESO	OPERACIÓN PROCESO	ACCIÓN DEL PROCESO
FABRICACIÓN DE JUGO	Tanque de almacenamiento materia prima	Cargar tanque de almacén con jugo (agua y jugo natural)	Llenar tanque depósito 50 litros de jugo. Transfiere hasta 20 litros al tanque reactor.
	Tanque endulzante (base)	Adicionar endulzante (carbonato de sodio)	Bomba dosificadora transfiere al tanque reactor en un porcentaje de 40% en un rango de 0-100% y con un control de 4-20 mA de acuerdo con la receta solicitada.
	Tanque vitamina C (ácido)	Adicionar vitamina C (bisulfato de sodio)	Bomba Eductora transfiere a la línea de proceso a diferentes rangos de mezcla de acuerdo con el flujo del líquido en un rango de 0-2 GPM para una dosificación de 67-2,5
	Tanque reactor	Mezcla de agua-jugo y endulzante y vitamina C	Agitar contenido de la mezcla y se adiciona base para encontrar el pH de la receta deseada.
	Unidad de refrigeración	Pasa por el refrigerador de placas	Se activa si la temperatura deseada en la receta está por encima de la temperatura ambiente (rango de 5° C – T° amb.)
	Unidad calefactora	Pasa por el intercambiador de calor de placas paralelas	Se activa si la temperatura deseada en la receta está por encima de la temperatura ambiente (T° amb. 80 °C)
	Tanque producto final	Llena el tanque y dosifica en cantidades de 1 litro	Llenado tanque de producto hasta un máximo de 20 lt y dosificación en cantidades de 1 lt.

**Fuente:** Elaboración propia.

Para lograrlo se integraron las tres plantas de procesos (nivel-flujo, análisis de pH y térmica), se conectaron en cascada, el control se realiza a través de un PLC maestro y dos esclavos interconectados por MPI y supervisados por la pantalla HMI y un PC con un pantalla 42'', que se comunica con el PLC maestro a través de Ethernet; desde allí se controla todo el sistema, se generan recetas, supervisa las variables de proceso, verifica y modifica los lazos de control permitiendo llevar registro histórico del proceso y las alarmas.

Los módulos de control de proceso batch se toman a partir de los sensores de campo (RTD, pH metro, medidor de caudal, nivel por ultrasonido o presión diferencial); estos miden de manera continua las variables de la receta a través de los PLC S7 300 y procesa la variable medida en cada uno de los lazos de control; en caso de presentarse alguna variación en el proceso dada por la materia prima, cambios ambientales, etc., el controlador PID y sus variantes regulan el sistema de tal manera que se mantengan las cantidades requeridas de la mezcla.

La plataforma permite variar las constantes P, I, D de los lazos de control, así mismo puede verificar el histórico de las alarmas y un reporte que indica las recetas generadas; en conclusión, los históricos de producción.

### Descripción de las plantas de procesos

El Sistema de Control de Procesos de Flujo y Nivel (T5552 de AmatrollInc) incluye una estación de trabajo, un panel de control, instrumentos industriales montados y cableados en un circuito cerrado, para controlar el flujo de agua entre dos tanques o el nivel de líquido en un tanque, este nos permite medir señales y conectar los dispositivos en una amplia variedad de configuraciones de control, y ofrece 3 tipos de controladores: control por relé, uno estándar y un controlador de tipo PID. El control por relé incluye interruptores manuales de entrada, válvulas de solenoide y flotadores para realizar encendido o apagado automático de control de nivel de líquido. La opción de controlador PID permite un

control programado de cualquiera de los niveles de líquido o flujo (Amatrol Inc., 2013).

El Sistema de Control Proceso Térmico (T5553 AmatrolInc) permite calibrar, ajustar, instalar, operar y optimizar los sistemas de control de procesos térmicos en aplicaciones industriales. Todos los componentes eléctricos están conectados al panel de control para permitir medir las señales y conectar los dispositivos en lazos de control de tipos PID, On /Off y control manual. El T5553 enfriá el fluido del proceso a través de un sistema de refrigeración mecánico donde es menos afectado por las temperaturas del medio ambiente elevadas y puede proporcionar una refrigeración continua del proceso. Cuenta con sensores de temperatura como termopar, termistor y RTD donde se puede acceder directamente desde el panel e interconectar a un transmisor programable para la conversión a una señal de 4 -20 mA. Un intercambiador de calor industrial y la válvula de control proporcional permiten observar lo que está sucediendo en el interior del sistema y entender más claramente los efectos por las perturbaciones externas y de sus propios ajustes (Amatrol Inc., 2013).

El sistema de Control Analítico pH (Ref. T5554 de AMATROL Inc.) permite evaluar conceptos de control analítico en situaciones industriales, a través de variables como nivel, caudal, temperatura y pH. El control de procesos es fundamental en las industrias química, energía, productos farmacéuticos, tratamiento de aguas, procesamiento de alimentos, entre otras, y así mismo permite al estudiante hacer un análisis de riesgos, controlar los flujos a través de las bombas de inyección de los tanques del ácido y la base; la medición se hace mediante dos electrodos, uno en tubería y el otro sumergido en el tanque reactor de mezcla de pH. El T5554 incluye una estación de trabajo de mesa con la parte superior de un panel de control, bombas de inyección, un reactor continuo de tanque agitado (CSTR), el transmisor y la sonda de pH, depósitos de reactivos. Los estudiantes pueden crear lazos de procesos reales que los preparan para usar aplicaciones de procesos industriales y les

enseñan a utilizar esto para mantener soluciones mixtas a concentraciones deseadas, manteniendo los límites de nivel superior e inferior para evitar desbordamiento o fallas de la bomba en vacío (Amatrol Inc., 2013).

## Instrumentos de proceso

A continuación se presentan en la tabla 2 los instrumentos de proceso utilizados en el desarrollo de la aplicación de control Batch.

## Calibración de los sensores

Las plantas de control de procesos T5552, T5553, T5554 de Amatrol Inc. cuentan con diferentes tipos de sensores; a continuación se explica la metrología aplicada en los sensores utilizados en el desarrollo del proyecto; sensor de nivel de ultrasonido y por presión diferencial, sensor de pH, sensores de caudal y RTD con transmisores de temperatura.

Se realizó un proceso de linealización para obtener la ecuación característica de cada uno y poder mostrar la lectura en la interfaz gráfica de usuario desarrollada para el PLC.

Además de ello se hizo calibración y ajuste del transmisor de flujo y pH, tratando de corregir el error del instrumento para lograr medidas en el experimento de identificación con mayor precisión.

En la tabla 3 se describen las características técnicas de cada sensor utilizado para hacer una caracterización de los instrumentos de medida de los que dispone el sistema de control T5554.

La linealización del transmisor de flujo se realizó a partir de la comparación de la señal del transmisor de flujo vs. rotámetro en un lazo cerrado de flujo en donde se compara la cantidad de GPM (galones por minuto) que pasan por el rotámetro y se tomó la misma medida en el transmisor comparando la señal de entrada (GPM) y salida corriente (mA). Se obtiene la función de la pendiente para programar el lazo de flujo en el PLC.

Para la calibración de los sensores de nivel (sistemas T5552 y T5554) se utilizó como guía la escala

**Tabla 2.** Instrumentos de proceso.

Nombre	Descripción
Bomba sumergible	La bomba situada en el interior del tanque de depósito es de tipo centrífuga y bombea agua desde el tanque de almacenamiento a la red de tuberías, conexión a 110 VAC, caudal aproximado de 3 gpm, 0-20 psi
Sensor ultrasónico	El sensor de ultrasónico proporciona una señal de retroalimentación de 4-20 mA que es proporcional al nivel del líquido en uno de los tanques. Este transductor se monta convenientemente a una distancia ajustable en la planta.
Válvula neumática reguladora de flujo	Este actuador es necesario para realizar el control de flujo que llega a los diferentes sensores para la medición con el transmisor inteligente de flujo.
Conversor I/P	Un convertidor I / P es un acondicionador de señal que recibe una señal analógica eléctrica de 4-20 mA y la convierte en una señal neumática; esta señal es utilizada para controlar la válvula neumática.
Rotámetro	El rotámetro indica la velocidad de flujo a través del bucle principal del proceso en una escala. También cuenta con una válvula de cierre ajustable que proporciona un medio para ajustar manualmente la velocidad máxima del flujo dentro del bucle principal del proceso.
Tanque de reactivo del proceso principal	Este depósito contiene el reactivo (bisulfato de sodio) usado para bajar el pH del proceso. El depósito está conectado a la bomba depuradora con una manguera flexible. Normalmente se carga hasta 6 L y se agrega bisulfato de sodio hasta 600 mL.
Bomba depuradora	También conocida como bomba de inyección, la bomba inyecta un volumen seleccionable del reactivo en el proceso a una velocidad (frecuencia) determinada por el flujo, y tiene un interruptor para encender o apagar la bomba.
Bomba de circulación	La bomba de circulación hace circular el fluido a través del bucle principal de proceso.
Válvula solenoide	Las válvulas solenoides se encuentran una al lado de la entrada del depósito del reactor y la otra al lado de la salida del tanque del reactor. Sirven para evitar el paso del líquido hacia el tanque en caso de que esté lleno y para proteger la bomba en caso de que esté vacío. 10 V-24 V
Sensor de flujo	Este es un sensor de flujo de paletas que convierte el caudal a través de la tubería principal en una señal de 4-20 mA
Válvula proporcional	El actuador proporcional permite a la válvula de solenoide operar de manera gradual mediante una señal de 4 -20 mA.
Depósito de reactivo	Este depósito tiene el reactivo (carbonato de sodio) que neutraliza el ácido para elevar el pH del proceso. El depósito está conectado a la bomba dosificadora electrónica con mangueras, una transparente (conduce agua) y una de color blanco (conduce aire). 0-12 L
Bomba dosificadora electrónica	La bomba dosificadora electrónica mezcla una cantidad de reactivo con el líquido que se encuentre en el tanque de proceso inyectando una cantidad de volumen de reactivo en el depósito de reactor a una velocidad establecida por el usuario; puede ser operada manualmente o en modo automático utilizando una señal de control de 4-20 mA.
pH metro	Electrodo de pH Honeywell Durafet, es un electrodo de estado sólido que utiliza un tipo especial de transistor llamado transistor de efecto de campo sensible a iones (ISFET). Conectado con el electrodo, hay una indicación del transmisor que muestra el nivel de pH medido por el electrodo y transmite una señal de 4-20 mA que representa la medición del pH.
Tanque reactor de proceso	El tanque reactor del proceso mantiene el fluido del proceso y permite que los reactivos se mezclen en él; incluye un agitador para mezclar el reactivo. El tanque reactor también incluye interruptores de nivel alto y bajo, así como un sensor de presión/transmisor montado en la parte inferior del tanque para medir el nivel del tanque. Capacidad del tanque, 0-12 L. Rango del sensor, 4-20 mA, interruptor de nivel off/on, 0-24 V
Válvula reguladora neumática	Válvula reguladora de caudal del lazo de control de temperatura activada neumáticamente.
Intercambiador de calor	El intercambiador de calor consta de un intercambiador tanque depósito con resistencia interna de calefacción y circuito de tubería de alta temperatura; rango de temperatura, 23 °C hasta 70 °C.
Unidad refrigeradora	Unidad de condensación de tipo axial, rango de 3 °C a temperatura ambiente.
RTD	Sensor de temperatura PT100 montado en línea de proceso, con transmisor de 4-20 mA.

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 3.** Datos técnicos.

	<b>Sensor ultrasonido</b>	<b>Transmisores de flujo</b>	<b>pH_metro</b>	<b>Sensores de nivel P. diferencial</b>	<b>Transmisores de temperatura</b>
Resolución	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
Sensibilidad	1 mL	1 m GPM	7 m	6.5 mL	0,1 °C
Precisión	0,001	0,298%	1,597%	8,6879%	0,05%

**Fuente:** Elaboración propia.

de un recipiente marcado, se verificó el volumen de líquido en el tanque reactor por cada variación de corriente del sensor de nivel por presión diferencial, para poder determinar la cantidad de líquido que puede almacenarse dentro de este y el valor en corriente del sensor por cada valor de volumen de agua conocido en varios puntos diferentes de la escala para efectuar la linealización del sensor.

Para hacer la linealización de nivel por presión diferencial se tomó como patrón de referencia el tanque de agua que tiene una regla de indicación de capacidad de 24 litros, en donde se encuentra instalado el sensor, se hace una comparación en el rango del sensor de 4-20 mA, donde se toma un máximo de 10 niveles.

Para la linealización del sensor de ultrasonido se aplicó el mismo proceso del sensor de nivel por presión diferencial.

Para la calibración del sensor de temperatura (sistema T5553) se utilizó como guía la escala de un termómetro bimetálico, se verificó el rango de trabajo entregado por el transmisor de temperatura de 4-20 mA, según la indicación del termómetro bimetálico.

Para el sensor de temperatura RTD se hizo una programación al transmisor a partir de la hoja técnica del fabricante de las plantas y posteriormente se hizo la comparación con un termómetro de indicación local montado en la línea de proceso; esto se verificó en un lazo cerrado de temperatura.

Para la calibración del sensor de pH (sistema T5554) se utilizó una solución buffer (pH = 4 y pH = 7), se verificó el nivel de concentración de pH

con el transmisor de pH en dos puntos diferentes para hacer la linealización del sensor.

El pH utilizó dos buffer de 4 y 7 dados por el fabricante de las plantas para la calibración de este sensor y de igual forma se tomaron datos en un lazo cerrado de pH y se validó los datos para linealizar el sensor.

Para la linealización del sensor de flujo de pH se hizo a partir de la comparación de la señal del transmisor de flujo vs. rotámetro en un lazo cerrado de flujo en donde se compara la cantidad de GPM (galones por minuto) que pasan por el rotámetro y se toma la misma medida en el transmisor, la señal de entrada (GPM) se compara con la salida corriente (mA).

## Software del PLC e interfaz gráfica

Para el desarrollo de la aplicación del PLC e interfaz gráfica se escogió el modelo de cascada, conocido también como modelo lineal secuencial o ciclo de vida clásico; se ha tomado este modelo como referencia debido a que permite el desarrollo secuencial de la aplicación, lo cual parece ventajoso para no incurrir en errores al tratar de incursionar en otras etapas sin haber completado otras necesarias, lo que garantiza que al finalizar el desarrollo de la aplicación todas las etapas estén terminadas y las aplicaciones funcionan a 100%.

Proponiendo un enfoque metodológico que ordena rigurosamente las fases del proceso para el desarrollo de software, de tal forma que el inicio de cada fase debe esperar la finalización de la fase

anterior, las fases que se tuvieron en cuenta fueron: Fase I, Análisis de requisitos; Fase II, Diseño del sistema; Fase III, Diseño del programa; Fase IV, Codificación; Fase V, Pruebas; Fase VI, Implementación (Ponsa & Granollers, 2009).

## Aplicación HMI

La aplicación destinada a la monitorización de los sistemas de control de proceso se compone de una pantalla de inicio, la cual tiene tres botones y cuando se selecciona uno de ellos, redirigen la pantalla al mímico correspondiente al sistema de control de proceso seleccionado (ver la tabla 4); una vez abierto este se generan dos botones que permiten el avance y el retroceso entre imágenes.

La pantalla principal muestra el valor numérico de cada variable de proceso debido a que es la más importante dentro de la funcionalidad del sistema, además en la parte inferior tiene un botón para activar un menú de ayuda y otro para mostrar las advertencias de posibles errores que pueda tener el sistema.

En el primer nivel se observa la conectividad de la tubería y el valor de cada variable de proceso, además de indicar si la planta está activa o no lo está.

En el segundo nivel se observa el gráfico de comportamiento contra tiempo de cada variable de proceso sobre la cual se está efectuando alguna acción de control.

**Tabla 4.** Niveles.

PANTALLA DE INICIO	PRIMER NIVEL	SEGUNDO NIVEL

**Fuente:** Elaboración propia.

## Aplicación PC

El primer nivel o pantalla principal (ver la figura 5) se compone de un menú de selección de sistemas y las indicaciones de los instrumentos más importantes que tiene cada sistema de control, además de botones de selección que permiten conocer la posición inicial de las válvulas manuales.

Este primer nivel se subdivide en varios paneles entre los cuales se encuentran: un panel de visualización de alarmas, el cual muestra cada evento que ocurre sobre la red de elementos de control y/o posibles errores de los mismos.

El segundo nivel muestra el mímico relacionado al lazo de control de cada sistema de control y

cuenta con un panel de control para operar cada sistema en forma remota (figura 6). En la parte inferior se encuentra un panel de control que cuenta con unos botones de Start, Stop y Paro de emergencia, luego un menú de selección de estrategia de control, la cual se aplicará sobre la variable de proceso a la cual pertenezca la visualización y, por último, una caja de texto que permite digitar el valor de consigna o valor a reflejar sobre el lazo de control.

El tercer nivel (figura 7) depende de la selección hecha en el segundo nivel ya que se puede escoger la visualización del sistema en forma de PI&D, gráfico de control o la fotografía del sistema de control.



Figura 5. Pantalla principal o primer nivel.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 6.** Selección de lazo.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 7.** Gráfico de control.

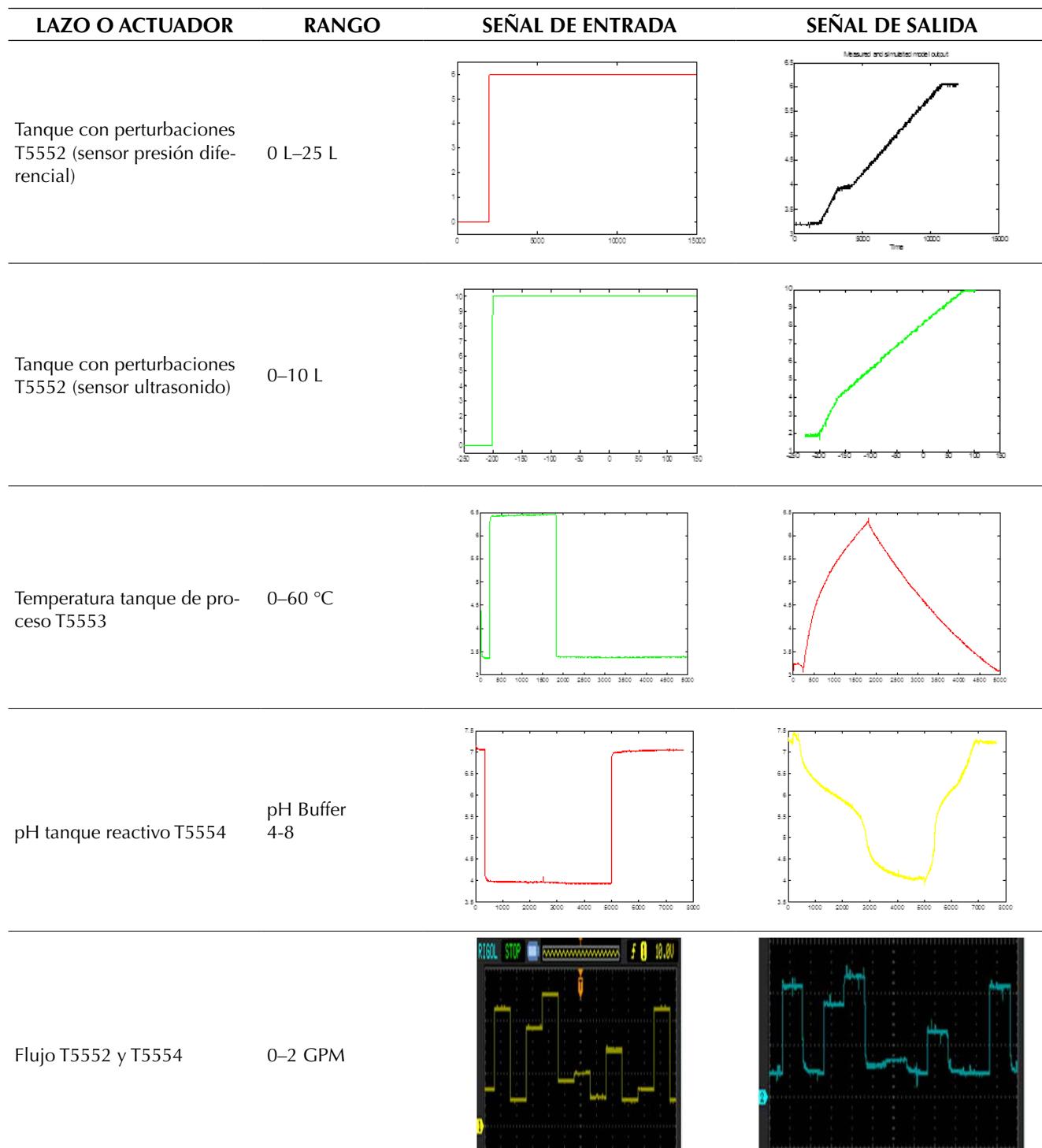
Fuente: Elaboración propia.

## RESULTADOS

En el caso de los lazos de pH y temperatura no se realizaron muchas oscilaciones debido a que el proceso es lento y se tendrían las siguientes eventualidades.

Los reactivos de los tanques de almacenamiento por el tamaño de estos últimos se acaban los reactivos, se debería agregar más reactivo a los tanques, lo que ocasionaría errores en el experimento; por tanto, se optó por dejarlo en un intervalo de 0-10 min, rango

**Tabla 5.** Respuesta de los lazos de control, una señal pulso.



**Fuente:** Elaboración propia.

en el cual los reactivos no se acabarán y se puede visualizar la respuesta del lazo en un rango de trabajo de 4-7 en la escala de pH.

En el caso del lazo de temperatura, la variación de temperatura en ascenso y en descenso es bastante lenta (alrededor de 2 horas para recorrer todo el rango desde 0 C° hasta 100 C°), por consiguiente se hizo con una variación de 0 hasta 60 C° con una duración de 1.2 horas.

A continuación se muestra en la tabla 5 la respuesta de los lazos de control, una señal pulso.

El desarrollo de la estación maestra de supervisión y control se muestra en la figura 8; esta se desarrolló en TIA Portal software ofrecido por Siemens y que integra las herramientas necesarias

para el diseño de entornos de visualización y control junto con la programación de paneles táctiles que permiten la implementación de una automatización completa.

Para el desarrollo del sistema de supervisión y control se ha hecho uso del software WinCC Runtime Advanced que se encuentra incorporado en el TIA (Totally Integrate Automation), software de Siemens que permite el desarrollo de Sistemas PC con las siguientes características.

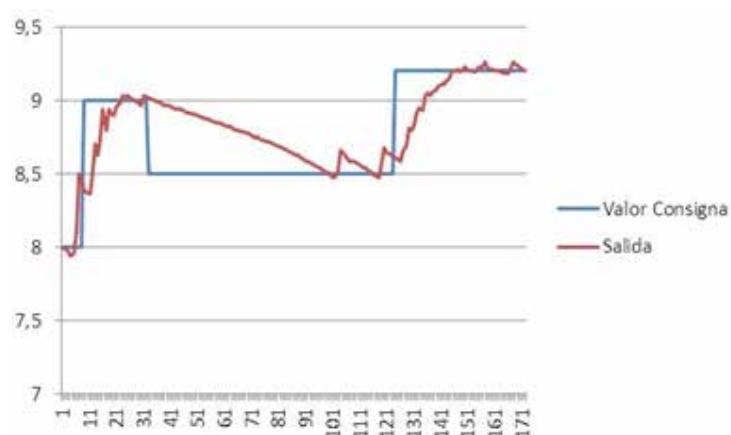
### Controlador ON\_OFF

Este controlador se implementó en el lazo de pH debido a que es un proceso lento ya que al



**Figura 8.** Interconexión del sistema.

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 9.** Respuesta ON\_OFF.

**Fuente:** Elaboración propia.

tratar de hacerlo con el lazo de flujo el sistema se tornaba inestable. Los resultados obtenidos con este controlador se presentan en la gráfica mostrada a continuación, en donde se refleja un error de estado estacionario promedio de 3% y el sistema se torna oscilante alrededor del punto de valor de consigna, pero en general el controlador sigue a la entrada y es bastante fácil de implementar cuando se requieran aplicaciones de control rápidas (ver la figura 9).

Funciona controlando la bomba dosificadora electrónica ya que cuando el sensor de pH detecta que está por debajo del nivel de pH, la frecuencia de dosificación es máxima para lograr subir el nivel de pH, y cuando es al contrario la apaga y espera que el ácido proveniente de la bomba reductora baje el nivel de pH.

## CONCLUSIONES

Para obtener las características de operación de los sensores en los lazos de control se deben establecer condiciones ambientales similares, debido a que la respuesta del sistema puede influir como una perturbación adicional al sistema y el error en la medición se introduce en las ecuaciones programadas en el PLC.

Para el lazo de control de pH, siendo la variable más relevante del proceso se encontró que una vez sintonizado la respuesta mantiene algunas oscilaciones de baja amplitud; se analiza que la causa es la concentración de ácido y base presentes en los tanques de almacenamiento, a medida que estos son agregados al tanque de proceso la señal crece y decrece de manera aleatoria debido a que la frecuencia en que se agregan los reactivos a la mezcla es automática, pero el ajuste de la cantidad se hace de manera mecánica y no hay una forma de ajustarlo en un valor deseado sino de un valor predeterminado.

A través del análisis comparativo de los lazos de control PI, PD, PID obtenidos durante el desarrollo del proyecto, contra los lazos de control AMATROL® se observa una mayor tendencia de

estabilización, debido a la disminución de sobre-impulso y el error de estado estacionario.

En general, las líneas del proceso Batch de los tanques deben ser purgadas ya que cuando se hace un cambio de agua o se remplazan los instrumentos, se comprobó que las bombas se llenan de aire y producen un fenómeno de cavitación y ocasiona caídas del flujo nominal en los lazos del proceso; por consiguiente, cada vez que se haga el cambio de agua hay que establecer condiciones de operación.

El SCADA de desarrollo mediante el paquete de software de Siemens TIA Portal V12 permite el desarrollo completo de sistemas de control y supervisión. La programación e interconexión de dispositivos y diseño de entornos gráficos permiten la interacción en entornos académicos e industriales.

Mediante la realización de una encuesta se logró determinar el nivel de aceptación de esta herramienta en el programa académico de ingeniería en control, determinando su pertinencia en asignaturas como: sensores y actuadores, instrumentación industrial, instrumentación de procesos, automática y redes industriales.

## FINANCIAMIENTO:

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

## REFERENCIAS

- amatrol Inc. (2013). Analytical Process Control Student Reference. Jefferson Village, Indiana, U.S.A.
- Behary, M.; Ah King, R., & Rughooputh, H. (2004). Automatitation of sugar boiling process in batch vacuum pans using ABB-Freelance PLC (AC800F) and conductor NT SCADA. *Industrial Technology*, pp. 853-858, Vol. 2. IEEE International Conference.
- Chacon R., E. A.; Rondon M., I. V.; Quintero G., K. R., & Rojas A., O. A. (2009). Aplicación del estandar ISA88 en el modelado del proceso de producción de azúcar en un Central Azucarero. *7th Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology*, p. 10. San Cristóbal, Venezuela.

- Deitz, C.; Todd, H., & Murray, S. (2003). Writing a Functional Specification for an S88 Batch Project. *Chemical Engineering*.
- Fonseca Velásquez, A., & Fino Sandoval, R. A. (2003). *Red de datos para instrumentación*. Bogotá: Fondo de Publicaciones Universidad Distrital.
- Garzón González, E. Y.; Camargo Casallas, E., & Bejarano, E. H. (2011). *Estudio, diseño e implementación de una red industrial para robot FIREBOT*. Bogotá: Fondo de Publicaciones de la Universidad Distrital.
- Holy, R., & Pozivil, J. (2002). Batch control system project for a project for a pharmaceutical plant. *ISA Transactions*, 245-254.
- Ponsa, P., & Granollers, A. (2009). *Diseño y Automatización Industrial*. Cataluña: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Rockwell Automation (2003). The ISA S88 Standard A Roadmap for automation a Powerful Management tool. *Benefits of Manufacturing Control*, 1-17.
- Serna Quilindo, W. Y.; Vergara González, D. C., & Flórez Marulanda, J. F. (2011). Procedimiento de Modelado ISA S88 para Ejecución de Órdenes de Producción Basadas en Récipes. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 107-129.



## Prototipo de sistema experto en diagnóstico médico basado en síntomas de los pacientes. Caso de estudio: esclerosis múltiple

Expert system prototype on medical diagnosis based on patients' symptoms.  
Case study: multiple sclerosis

Juan Guillermo Rivera Berrío\*, Héctor Aníbal Tabares Ospina\*\*

Citation / Para citar este artículo: Rivera Berrio, J. G., & Tabares Ospina, H. A. (2014). Prototipo de sistema experto en diagnóstico médico basado en síntomas de los pacientes. Caso de estudio: esclerosis múltiple. Revista Tecnura, Edición especial, 215-216.

Fecha de recepción: 16 de julio de 2013 / Fecha de aceptación: 7 de marzo de 2014

### Resumen

Se presenta en este artículo un modelo de sistema experto para el diagnóstico de la esclerosis múltiple. Esta labor no es una tarea trivial, debido a la subjetividad que puede presentarse en su evaluación. Este proceso se puede complementar usando un sistema de apoyo a la toma de decisiones. El sistema desarrollado se dividió en cuatro fases: toma de requisitos, diseño, implementación y puesta en marcha. Con el prototipo software se logró modelar el conocimiento específico del experto neurólogo, lo que permitió obtener un diagnóstico de la esclerosis múltiple.

**Palabras clave:** sistema experto, esclerosis múltiple.

### Abstract

This paper presents a model of expert system for the diagnosis of multiple sclerosis. This task is not a trivial task, due to the subjectivity that may occur in their evaluation. This process can be supplemented using a system to support decision making. The developed system was divided into four phases: making requirements, design and implementation, and its set-up. With the software prototype, it was possible to model the specific knowledge of the expert neurologist, allowing a diagnosis of multiple sclerosis.

**Keywords:** Expert system, multiple sclerosis.

\* Ingeniero civil, especialista en estructuras, doctor en estudios de ciencia y tecnología. Vicerrector académico, Institución Universitaria Pascual Bravo. Contacto: [jg.rivera@pascualbravo.edu.co](mailto:jg.rivera@pascualbravo.edu.co)

\*\* Ingeniero electricista, especialista en ingeniería del software, magíster en ingeniería de sistemas, estudiante de doctorado en sistemas energéticos. Docente, Institución Universitaria Pascual Bravo. Medellín, Colombia. Contacto: [h.tabares@pascualbravo.edu.co](mailto:h.tabares@pascualbravo.edu.co)

## INTRODUCCIÓN

El objetivo fundamental de este artículo consiste en hacer un desarrollo software para detectar la esclerosis múltiple, EM. Su diagnóstico ha sido una de las constantes preocupaciones de los expertos en el tema, debido a la dificultad que existe en formalizar adecuadamente los síntomas. Para su diagnóstico, la subjetividad está presente como una característica permanente, lo que llevó para su solución, al desarrollo de un sistema experto –SE- del tipo determinista, titulado SistemaExperto\_IUPB, en el cual se confirmó que los SE brindan grandes posibilidades en el campo clínico.

Este trabajo comienza con el estado del arte de los SE usados para el diagnóstico de enfermedades. A continuación se presenta la metodología utilizada para la implementación de este sistema. Continúa el artículo mostrando las pruebas de validación y los resultados más importantes. Finaliza presentando las principales conclusiones del trabajo investigativo y el esbozo de trabajos futuros.

### Los sistemas expertos

Un SE es una aplicación informática que, sobre una base de conocimientos –BC-, posee información de uno o más expertos para solucionar un conjunto de problemas en un área específica. La BC es un tipo especial de bases de datos –BD- para la gestión del conocimiento, que posee una considerable capacidad de deducción a partir de la información que contiene. La diferencia entre la BD y la BC consiste en que la primera almacena únicamente hechos (afirmaciones que sirven para representar conceptos, datos, objetos, etc.) y las funciones del motor de la BD son las de edición y consulta de los datos. La segunda, por otra parte, puede almacenar, además de hechos (base de hechos que describen un problema), un conjunto de reglas. Una regla es una estructura condicional que relaciona lógicamente

la información contenida en la parte del antecedente con otra información contenida en la parte del consecuente. En una BC, las reglas se sirven de esos hechos para que el motor de inferencia –MI- obtenga razonamiento deductivo automático, seleccionando las reglas posibles para solucionar un determinado problema y así conseguir información que no se encuentra almacenada en forma explícita.

Tanto con la BD como con la BC se pueden realizar consultas dinámicas. En el primer caso, es la posibilidad que tiene el usuario final para configurar la consulta en tiempo de ejecución. En el segundo caso, el usuario introduce la información del problema actual en la base de hechos y el sistema empareja esta información con el conocimiento disponible en la base de conocimientos para deducir nuevos hechos.

Los SE pueden clasificarse en dos tipos principales, según la naturaleza de los problemas para los que están diseñados: deterministas y estocásticos. Los SE que tratan problemas deterministas se conocen como “sistemas basados en reglas”, porque sacan sus conclusiones basándose en un conjunto de reglas utilizando un mecanismo de razonamiento lógico.

Los sistemas que tratan problemas estocásticos, es decir, problemas que involucran situaciones inciertas, necesitan introducir medios para medir la incertidumbre. Algunas medidas de incertidumbre son los “factores de certeza” y la “probabilidad”. Estos SE utilizan una distribución de probabilidad conjunta de un grupo de variables para describir las relaciones de dependencia entre ellas y así sacar conclusiones usando fórmulas de la teoría de probabilidad. Para una lograr definición más eficiente de la distribución de probabilidad conjunta se utilizan modelos de redes probabilísticas, entre los que se incluyen las *redes de Markov* y las *redes Bayesianas*.

Un detallado estudio sobre SE está más allá del ámbito de esta sección. En (Giarratano & Riley, 2001) se ofrece un excelente estudio con referencias específicas.

## Antecedentes

La EM es una enfermedad desmielinizante, neurodegenerativa y crónica del sistema nervioso central. En su génesis actúan mecanismos autoinmunes y a causa de sus efectos, puede tener como consecuencia una movilidad reducida e invalidez en los casos más severos. Después de la epilepsia, es la enfermedad neurológica más frecuente entre los adultos jóvenes desde la erradicación de la poliomielitis, y es la causa más frecuente de parálisis en los países occidentales (Gutierrez, Gonzalez, Lopez, Ojeda, Sanchez, & Toro, 2001). En (AMERICAN ACADEMIC OF NEUROLOGY, 2011) se informa que la EM afecta aproximadamente a 1 de cada 1.000 personas con edades entre 20 y 40 años, más comúnmente en las mujeres.

Con el propósito de estudiar la evolución clínica de la enfermedad, se han comenzado a usar nuevas herramientas informáticas inteligentes. En (Shin, Tolum, & Hassanpour, 2012) se presenta un análisis estadístico de los enfoques de sistemas expertos aplicados en medicina, en el que se indica un aumento en el número de publicaciones sobre sistemas interconectados con redes neuronales artificiales –RNA- y neurodifusos–ND-. Estos últimos combinan las técnicas de las RNA y las técnicas de inferencia borrosa. La lógica borrosa proporciona un mecanismo de inferencia sobre la incertidumbre y las redes neuronales ofrecen las ventajas computacionales en cuanto al aprendizaje y la generalización.

Así las cosas, un sistema neuronal artificial fue aplicado en (Chiou & Lure, 1994) para detectar células que producen cáncer de pulmón. A partir de este estudio surgieron otros trabajos en reconocimiento de imágenes en radiología, dermatología, patología, endoscopia (Xu, Brown, Breit, & Nakamura, 2006), análisis de rayos X aplicados en exámenes de mamografía y radiografías de pecho (Wang & Shiun, 2009).

Dentro de la literatura médica existen numerosos estudios que emplean modelos ND. En (Celona, Grasso, & Puccio, 2009) realizaron una clasificación morfológica de imágenes obtenidas con exámenes

de resonancia magnética. Consiste en procesar las imágenes usando una RNA para aumentar su tasa de reconocimiento. Como resultado final, se presenta una RNA capaz de distinguir los diferentes contornos de plaquetas producidas por la EM.

Otros estudios evaluaron la aplicación de sistemas ND para el diagnóstico de infarto del miocardio (Buarque, 2000), (Bizios, Heij, & Bengtsson, 2007), artritis celular (Aston, Wener, Thomas, Hunder, & Bloch, 1994), (Borges, Moura, & Steiner, 2010), tipos de cáncer (Bourdes, Bonnevay, Bachelot, & Perol, 2007), pronosticar la duración de pacientes en la unidad de cuidados intensivos (Cook, 2005), evolución de enfermedades después de realizarse una operación de trasplante (Doyle, y otros, 1994), (Gil, Johnsson, Garcia, & Soriano, 2009). Otros estudios que usan RNA están relacionados con enfermedades cardio-pulmonares y grado de sobrevida después del trauma (Ebel, 1993), (Harrison & Kennedy, 2005), interpretación de pruebas de diagnóstico relacionadas con el páncreas (Kasmierczak, Catrou, & Van Lente, 1998), (Bartosh, Andersson, & Nilsson, 2008) y tiroides (Sharpe, Solberg, Rootwelt, & Yearworth, 1993), (Gannous & Elhaddad, 2011).

Con respecto a la EM, varios ensayos experimentales sobre terapia están en curso, con el fin de descubrir un tratamiento exitoso. La mayoría de estos estudios de investigación utilizan una escala de calificación clínica denominada Escala Ampliada del Estado de Discapacidad (EAED) como herramienta de evaluación de los efectos de las drogas. Esta escala se define por un conjunto de reglas que proporcionan una cuantificación numérica de la exploración neurológica. Aunque EAED ha sido ampliamente utilizado durante casi 20 años, su aplicación sigue dependiendo de la interpretación del neurólogo, por lo que la evaluación efectuada por diferentes neurólogos en el mismo paciente puede dar resultados diferentes. Este es un problema grave para los ensayos internacionales debido a que carecen de una medida fiable de los efectos de las drogas. En (Gaspari, Roveda, Scandellari, & Stecchi, 2012) se presenta un sistema experto para

la evaluación automática de EAED en la EM. El sistema experto es una herramienta de evaluación complementaria capaz de apoyar al usuario para hacer una representación explícita de reglas EAED.

El uso de la resonancia magnética como una herramienta de apoyo en el diagnóstico y seguimiento de la EM y en la evaluación de los efectos del tratamiento, requiere la determinación precisa de la lesión cerebral que produjo la enfermedad. Para apoyar de manera automática a los neurorradiólogos en la clasificación de la lesión cerebral, en (Esposito & De Pietro, 2011) se desarrolló un sistema experto para apoyar las decisiones difusas basadas en ontologías(DSS). El DSS codifica el conocimiento médico de alto nivel, especializado en términos de ontologías y reglas difusas, y aplica este conocimiento en conjunción con un motor de inferencia borrosa para clasificar la lesión cerebral. El rendimiento de la DSS ha sido evaluado cuantitativamente en 120 pacientes afectados por EM. Un análisis estadístico se ha llevado a cabo para evaluar la influencia de DSS en las tareas de diagnóstico de los médicos. La evaluación ha demostrado que el DSS ofrece una forma innovadora y valiosa para llevar a cabo la clasificación de las lesiones cerebrales, en forma automatizada y en entornos clínicos reales.

A pesar de lo anterior, es un reto implementar en software una evaluación global para el diagnóstico de la EM. Esta es una razón por la cual en la INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO-IUPB-se ha trabajado en el diseño de modelos computacionales usando SE, como el expuesto en (Primorac & Mariño, 2010), (Tabares, Monsalve, & Diez, 2013) desarrollado para asistir decisiones turísticas, tomado y adaptado para los propósitos de este trabajo investigativo. Se pretende superar las limitaciones de los previos modelos expuestos, referidos a la exactitud y precisión de los resultados finales.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Los actores que intervienen en el aplicativo SistemaExperto\_IUPB son: el ingeniero de sistemas, que en este caso hace las veces de ingeniero del

conocimiento –IC-, el experto en el dominio de conocimiento –EDC- sobre esclerosis múltiple–EM- y los usuarios finales –UF- que interactúan con el sistema con miras a determinar si un paciente tiene EM.

La metodología abordada para la implementación del SE contempló las siguientes etapas:

- Identificación del problema, en este caso, la determinación de la enfermedad EM.
- Selección de la variable objetivo y sus valores. El EDC definió como variable objetivo el diagnóstico de la enfermedad EM.
- La selección de las variables de entrada y sus posibles valores: sobre la base del conocimiento del EDC, se seleccionaron el conjunto de variables de entrada relevantes. En el modelo abordado en este trabajo, las preferencias están determinadas por los indicadores básicos de síntomas de que se detallan en la Tabla 1. Debido a que los nervios en cualquier parte del cerebro o la médula espinal pueden resultar dañados, los pacientes

**Tabla 1.** Indicadores variables de entrada (síntomas básicos).

Síntomas musculares
Pérdida del equilibrio
Espasmos musculares
Entumecimiento o sensación anormal en cualquier área
Problemas para mover los brazos y las piernas
Problemas para caminar
Problemas con la coordinación y para hacer movimientos pequeños
Temblor en uno o ambos brazos o piernas
Debilidad en uno o ambos brazos o piernas
Síntomas intestinales
Estreñimiento y escape de heces
Dificultad para comenzar a orinar
Necesidad frecuente de orinar
Urgencia intensa de orinar
Escape de orina (incontinencia)
Síntomas oculares
Visión doble
Movimientos oculares rápidos e incontrolables
Pérdida de visión (usualmente afecta un ojo cada vez)

con EM pueden tener síntomas en muchas partes del cuerpo. Por tanto, su clasificación es muy variada, por lo que, para los propósitos de este artículo, se listan los más destacados según sus efectos a nivel muscular, intestinal u ocular.

Si se activan cualesquiera de los síntomas a nivel muscular, intestinal u ocular, entonces se infiere la EM.

Los síntomas listados no constituyen la universalidad de casos, por lo que el programa SistemaExpero\_IUPB provee los medios para la recolección de nuevos síntomas.

Es importante recalcar que los síntomas anteriores listados no siempre son indicios de EM, dado que pueden deberse de igual manera a otros trastornos neurológicos. Así mismo, el hecho de presentar uno o dos de estos síntomas en forma aislada tampoco significa necesariamente la EM. Por lo general, para considerarla se requieren tres o más de dichos síntomas presentados en forma conjunta.

Además del análisis de los síntomas, el médico puede sospechar de EM si hay disminución en el funcionamiento de dos partes diferentes del sistema nervioso central (como los reflejos anormales) en dos momentos diferentes. En este caso, se efectúa un examen neurológico como el presentado en la Tabla 2. Las pruebas de funciones neurológicas pueden mostrar disminución en la función nerviosa en un área del cuerpo o diseminación sobre muchas partes del cuerpo.

**Tabla 2.** Exámenes neurológicos.

#### Pruebas funciones neurológicas

- Reflejos nerviosos anormales.
- Sensibilidad anormal o disminuida.
- Disminución capacidad motora.
- Respuestas anormales de la pupila.
- Cambios en los campos visuales o en los movimientos oculares.
- Movimientos oculares rápidos provocados por movimiento del ojo.

Los exámenes clínicos realizados para estudiar el estado y progresión de la EM abarcan los listados en la tabla 3.

**Tabla 3.** Exámenes para el diagnóstico.

#### Exámenes para el diagnóstico de la EM

- Punción lumbar.
- Resonancia magnética del cerebro y la columna.
- Estudio de la función neurológica (potenciales provocados).

Hasta el momento, no se conoce cura para la EM; sin embargo, existen terapias que pueden retardar el progreso de la enfermedad. El objetivo del tratamiento es controlar los síntomas y ayudar a mantener una calidad de vida normal.

Los medicamentos utilizados para disminuir la progresión de la EM se toman durante un tiempo prolongado y pueden abarcar, de manera genérica, los que se presentan en la Tabla 4.

El pronóstico de la evolución de la enfermedad es variable y difícil de predecir. Aunque el trastorno es crónico e incurable, la expectativa de vida puede ser normal o casi normal. La mayoría de las personas con EM continúan caminando y desempeñándose en el trabajo con discapacidad mínima durante 20 años o más.

- Diseño de las preguntas. El desarrollo del cuestionario es la parte más complicada y en general es una actividad iterativa. El proceso se puede comenzar identificando los rasgos y características, representadas en las variables de entrada, presentes o no en los valores que asume la variable objetivo identificada para el dominio del problema.

**Tabla 4.** Tratamiento.

#### Tratamiento

- Interferón.
- Esteroides (utilizados para disminuir la gravedad de los ataques).
- Lioresal (para disminuir los espasmos musculares)
- Medicamentos colinérgicos (para disminuir los problemas urinarios)

En esta fase intervinieron el IC y el EDC. La adquisición de la información relevante se obtuvo consultando con el EDC y el IC extrajo las principales características de la EM. Con base en los rasgos identificados en el paso anterior, el IC y el EDC diseñan las reglas por evaluar y las preguntas por formular a los usuarios finales –UF- del sistema cuando interactúa con el subsistema de interfaz de UFI. En la Tabla 5 se presentan las reglas por evaluar.

El SE intercambia datos entre las tablas 1, 2, 3, 4 y 5 para inferir la EM. La clasificación de la EM es muy variada, agrupándose por los síntomas –muscular, intestinal u ocular–.

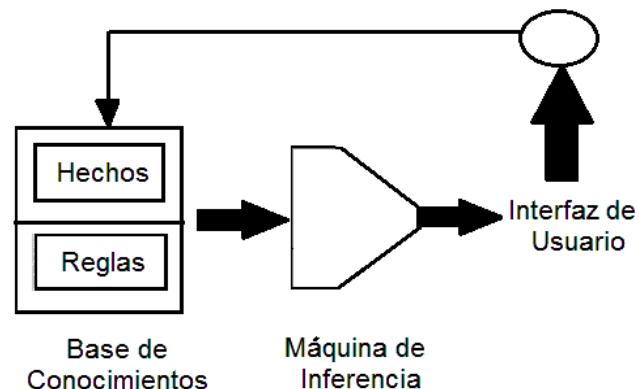
**Implementación software.** En las especificaciones de diseño del aplicativo SistemaExperto\_IUPB se manejaron tres capas: interfaz, lógica de programa, datos; esto para lograr que la interfaz sea completamente independiente del sistema y la BC pueda alterarse sin tener que hacer cambios en la programación. La BC reside en un manejador de bases de datos. La base de reglas y el MI se implementaron en lenguaje C# para ambiente de escritorio, utilizando el escenario de desconectado para tener acceso al motor de la BD.

La arquitectura básica del aplicativo SistemaExperto\_IUPB se puede observar en la figura 1.

El programa SistemaExperto\_IUPB está compuesto por tres subsistemas: i) el editor de variables de entrada y salida, ii) la base de conocimiento, iii) la interfaz de usuario final.

**Tabla 5.** Subclases.

No	Regla antecedente (daños o efectos)	Consecuente
1	Síntomas a nivel muscular, intestinal u ocular	Síntomas de EM
2	Síntomas de EM	Efectuar pruebas de función neurológica (PFN)
3	PFN de reflejos o disminución de capacidad motora.	Diagnóstico EM
4	Diagnóstico EM.	Realizar exámenes punción lumbar, RM cerebral y columna, potenciales evocados.
5	Si exámenes punción lumbar, RM cerebral y columna, potenciales evocados confirman diagnóstico de EM.	Tratamiento con interferones y esteroides.



**Figura 1.** Arquitectura del aplicativo SistemaExperto\_IUPB.

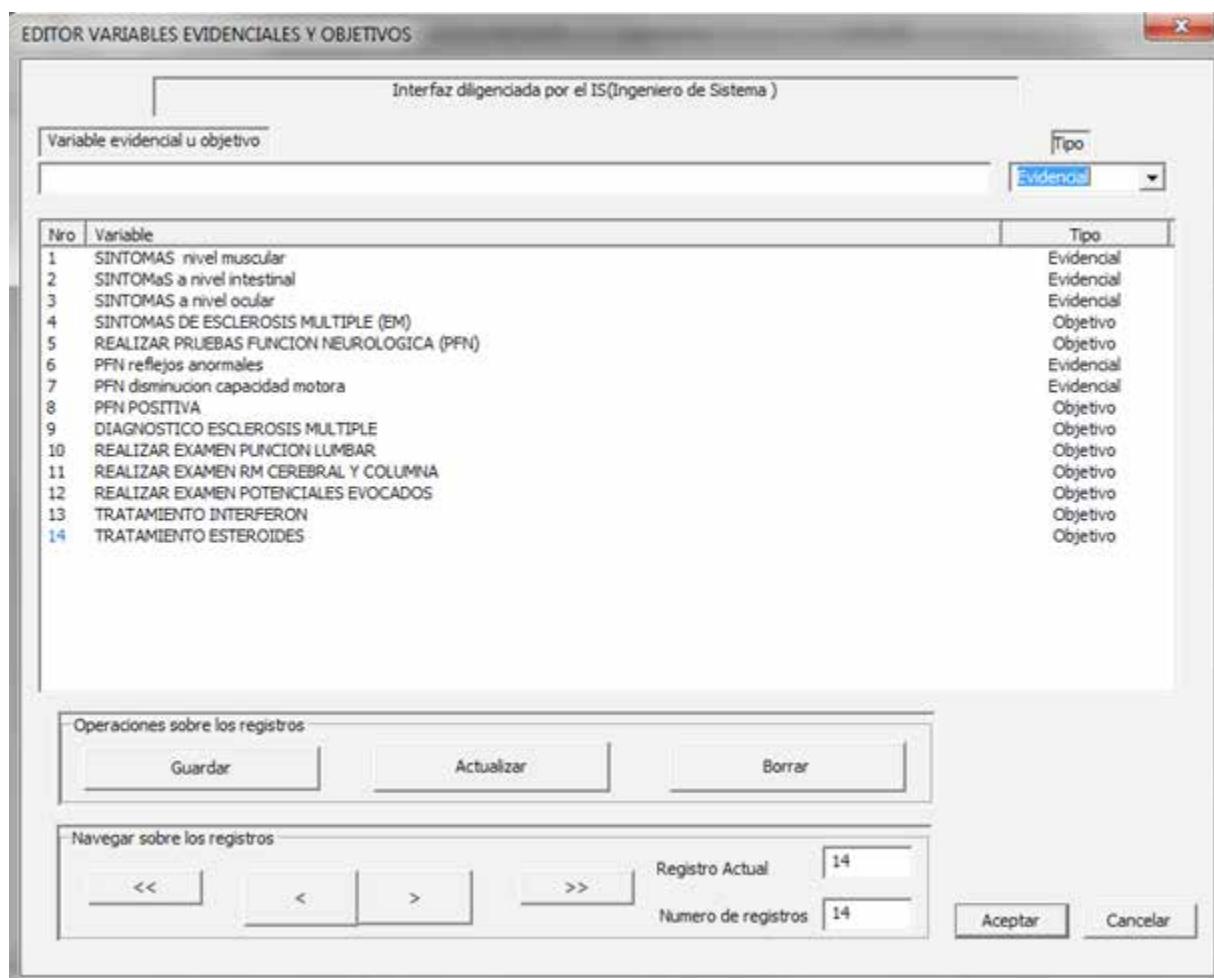
## Editor de variables de entrada y salida

Con base en los rasgos identificados en las variables de entrada, el IC y el EDC las registran utilizando el subsistema editor de variables de entrada (antecedentes) y salida (objetivos o consecuentes). En la figura 2 se ilustran algunas formulaciones que estarán disponibles.

El control combo titulado “Tipo Variable” permite ingresar una nueva variable del tipo antecedente o consecuente.

## Editor base de conocimiento

El archivo de las variables de entrada y salida se carga en el subsistema de adquisición del conocimiento. Inicialmente el sistema no contiene posibles



**Figura 2.** Editor de variables de entrada y salida. El IC implementa el editor y el EDC lo diligencia en tiempo de ejecución.

reglas. Como se presenta en la figura 3, el EDC carga las variables generadas por el IC y configura las reglas en la base de conocimiento. Este proceso se repite hasta que se hayan configurado todas las soluciones posibles para cada una de las preguntas formuladas.

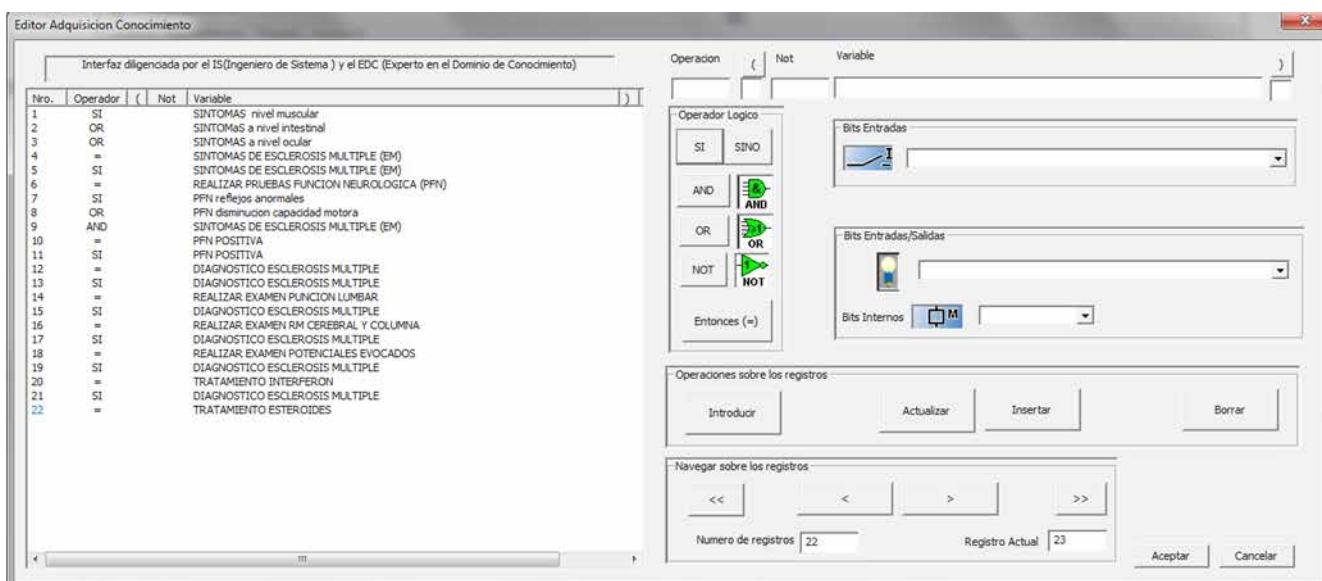
Es frecuente que diferentes sucesos estén correlacionados, siendo necesario hacer cierta pregunta si la respuesta seleccionada a la pregunta anterior lo requiere. El subsistema permite establecer dependencias por medio de su opción “Crear Dependencia”.

Finalizado este proceso, las preguntas formuladas, las dependencias y la importancia asignada se guardan en una base de datos.

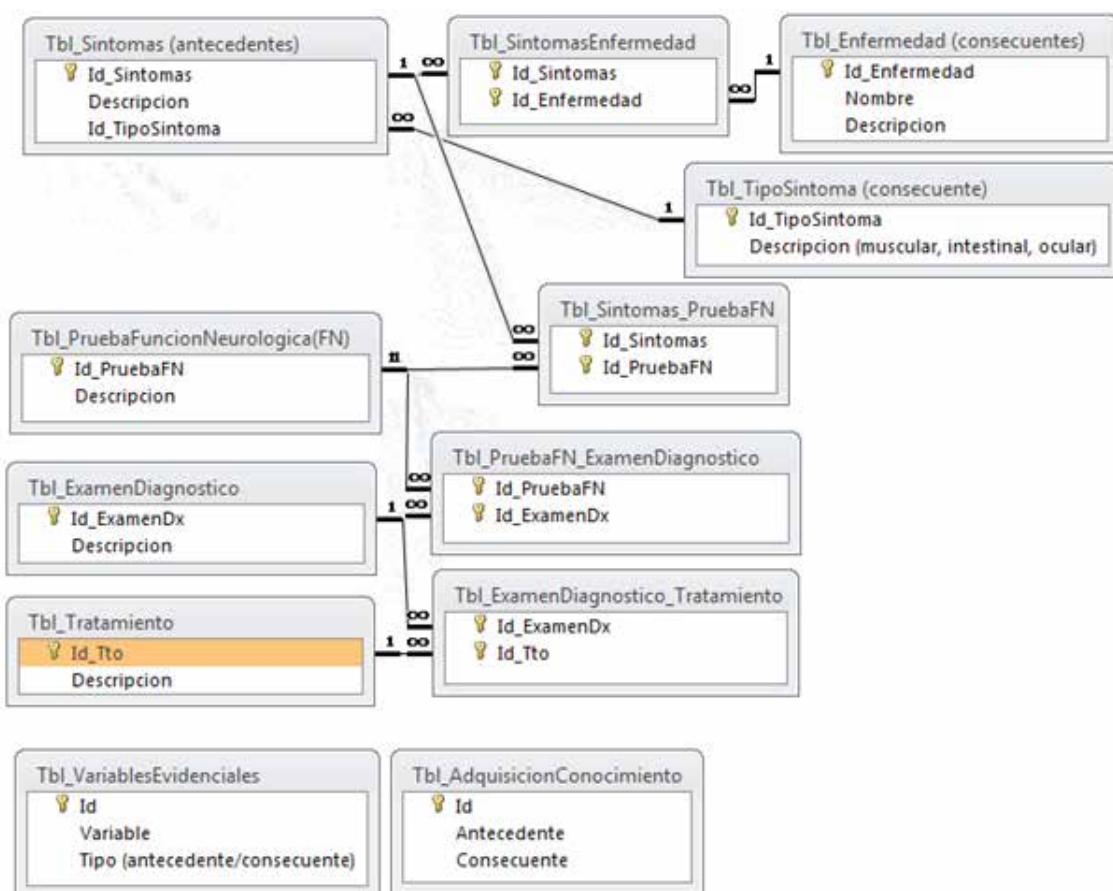
## Bases de datos

Todo el sistema está relacionado como una base de datos Access (MDB) titulada SistemaExpero-EM\_IUPB.db, y centra su gestión en tres aspectos principales: síntomas, clasificación (muscular, intestinal u ocular), exámenes neurológicos, diagnóstico y tratamiento. El esquema de la base de datos relacional que cumple con el planteamiento de los requisitos se presenta en la figura 4. El significado de las tablas y sus relaciones es el siguiente:

- Tbl\_Sintomas. Representa los síntomas.



**Figura 3.** Editor adquisición del conocimiento. Diligenciado en tiempo de ejecución por el EDC.



**Figura 4.** Diagrama entidad-relación de la BC del SE.

- Tbl\_TipoSintoma, indica la clasificación de los síntomas según su afectación a nivel muscular, intestinal u ocular.
- Tbl\_Enfermedad, contiene el listado de enfermedades.
- Tbl\_VariablesEvidenciales, variables del tipo entrada o salida del SE.
- Tbl\_AdquisicionConocimiento, comprende el listado de reglas que evalúa el SE.

El significado de los atributos que componen las diferentes tablas es explícito, de tal manera que los lazos entre las relaciones son fáciles de entender. Por ejemplo, el lazo que conecta Tbl\_Sintomas (Antecedentes) con Tbl\_TipoSintoma (Consecuentes) sirve para clasificar el síntoma a nivel muscular, intestinal u ocular.

La relación entre Tbl\_Sintomas (Antecedentes) y Tbl\_Enfermedad (Consecuentes), al tratarse de una relación con cardinalidad VARIOS a VARIOS, no está permitida por cuanto contradice la definición de llave primaria y las reglas de normalización de bases de datos. En estos casos, se hace necesario crear una nueva tabla que permita transformar las relaciones en cardinalidades UNO a VARIOS. De

ahí que se haya creado la entidad relación Tbl\_SintomasEnfermedad. En este caso, un síntoma puede estar presente en muchas enfermedades y una enfermedad puede presentar muchos síntomas.

## Interfaz de usuario final

La figura 5 ilustra el subsistema de interacción con el UF. El subsistema de interacción con el UF permite el acceso al conocimiento especializado, que puede consultarse interactivamente en cada paso, luego de seleccionar la variable de entrada y su valor en el recorrido desde el inicio a la meta.

El cuestionario primero se presenta al EDC cuando utiliza el subsistema de adquisición del conocimiento para completar la BC y verificar cómo están relacionadas cada una de las opciones disponibles para recomendar una solución.

El funcionamiento general del subsistema de interacción con el UF es el siguiente: el UF selecciona el conjunto de variables evidenciables relevantes sobre los síntomas, y responde las preguntas planteadas por el SE. En el modelo abordado en este trabajo, las preferencias están determinadas por las variables: i) síntomas, ii) clasificación.

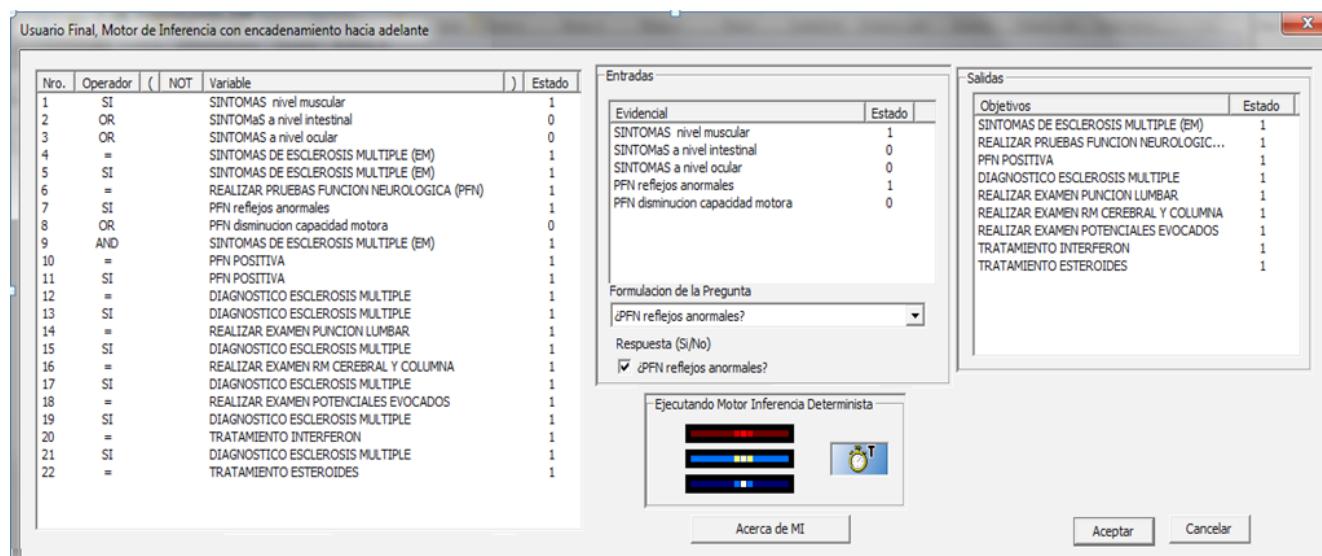


Figura 5. Interfaz UF.

La interfaz que maneja la interacción entre el SE y el UF es altamente interactiva y sigue el patrón de la conversación a nivel de escritura entre seres humanos. Por tanto, un requerimiento básico de la interfaz es la habilidad de hacer preguntas. Para obtener información fiable del usuario, es necesario prestar especial cuidado en el diseño del cuestionario. Esto requirió diseñar la interfaz usando menús o gráficos.

La consulta transcurre en general según el esquema siguiente: primero se plantea al usuario la pregunta sobre los síntomas para alcanzar una determinación aproximada del contexto. El diálogo, por parte del sistema, está a menudo dimensionado para ir confirmando o rechazando hipótesis (por ejemplo, comprobación de la presencia de EM), o para realizar una aproximación sucesiva hacia un objetivo introducido de antemano (por ejemplo, clasificación).

Una vez finalizado el diálogo, el componente explicativo suministra, si es necesario, el historial completo de la consulta.

La configuración efectuada por el UF es empleada por el MI para obtener razonamiento deductivo automático, seleccionando las reglas posibles para especificar el tipo de EM.

## RESULTADOS

Para probar el sistema, se empleó el subsistema de interfaz de interacción con el UF. Con los datos definidos en los filtros, el sistema SistemaExperto\_IUPB

simula al experto humano, usando el MI, aplicando un encadenamiento de reglas hacia adelante para contrastar los hechos particulares de la base de hechos con el conocimiento contenido en la BC y obtener conclusiones acerca de la consulta realizada. El algoritmo consiste en asignar a los objetos sus valores conocidos como lo dan los hechos o evidencias. Seguidamente se ejecuta cada regla de la base de conocimiento y se concluye nuevos hechos si es posible. Finalmente, se repite el paso anterior hasta que no puedan obtenerse nuevos hechos. Para la evaluación de cada regla, el MI la convierte de notación infijo a posfijo. Seguidamente, el MI aplica una subrutina evaluadora de expresiones en notación posfijo. En la tabla 3 se presenta la inferencia del SE ante 3 posibles síntomas.

## CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo consistió en desarrollar el prototipo software SistemaExperto\_IUPB orientado a diagnosticar la esclerosis múltiple. El programa se consultará ante todo cuando existan síntomas de la enfermedad que no requieren tratamiento inmediato y no se pueda o quiera recurrir primero al experto humano. Asimismo, el aplicativo sirve también al mismo experto que lo alimenta como diccionario dinámico, que mantiene el conocimiento de reglas antiguas, mientras se concentran en los nuevos desarrollos.

El prototipo de SE usando un MI para obtener razonamiento deductivo automático permite

**Tabla 3.** Operación del SE.

SISTEMA EXPERTO EM	
VARIABLES DE ENTRADA ANTECEDENTE	VARIABLES DE SALIDA ACTIVADAS POR EL MI CONSECUENTE
Si <b>Síntomas de EM a nivel muscular, intestinal u ocular</b>	Entonces realizar <b>pruebas función neurológica</b>
Si <b>pruebas función neurológica</b> confirman indicios iniciales de EM	Entonces realizar <b>examen punción lumbar, RM cerebro y columna</b>
Si <b>examen punción lumbar o RM cerebro y columna</b> confirman definitivamente la presencia de la EM.	Entonces realizar <b>tratamiento con interferón y esteroides</b>

obtener una recomendación sobre el tipo de EM de acuerdo con los siguientes indicadores: i) síntomas musculares, ii) síntomas intestinales, iii) síntomas oculares. SistemaExperto\_IUPB se encuentra registrado en Colombia, Dirección Nacional de Derecho de Autor, con número 13-34-113 del 27 de julio de 2012. El prototipo de sistema desarrollado está accesible en la dirección:

<http://www.itm.edu.co/trabajosdegradodestacados/index.html>.

Es de interés efectuar otros estudios en los que se usen los SE en problemas que requieran inferencia determinista para hacer clasificaciones, por ejemplo de virus/antivirus, delitos, e intrusiones informáticas.

## AGRADECIMIENTOS

Esta sección reconoce la asesoría de los expertos en esclerosis múltiple, pertenecientes al Instituto Neurológico de Antioquia. Este trabajo hace parte del grupo de investigación en Neurociencias de la Universidad CES y del grupo GIIEN de la Institución Universitaria Pascual Bravo –IUPB-.

## FINANCIAMIENTO

Institución Universitaria Pascual Bravo

## REFERENCIAS

- AMERICAN ACADEMIC OF NEUROLOGY, C. (10 de 5 de 2011). *Lifelong learning in neurology*. Recuperado el 20 de 2 de 2012, de Lifelong learning in neurology: <http://www.aan.com/elibrary/continuum/?event=home.showIssue&issue=ovid.com/:issue/ovftdb/00132979-200412000-00000>.
- Astion, M., Wener, M., Thomas, R., Hunder, G., & Bloch, D. (1994). Application of neural networks to the classification of giant cell arteritis. *Arthritis and Rheumatism* , 760-770.
- Bartosh, A., Andersson, B., & Nilsson, J. (2008). Artificial neural networks in pancreatic disease. *British journal of surgery* , 817-826.
- Bizios, D., Heij, A., & Bengtsson, B. (2007). Trained artificial neural network for galucoma diagnosis using visual field data: un comparison with conventional algorithms . *Journal of glaucoma* , 20-28.
- Borges, K., Moura, R., & Steiner, A. (2010). Diagnosis of headache using artificial neural network. *IJCSNS International Journal of Computer Science and NetworkSecurity* , 128-142.
- Bourdes, V., Bonnevay, S., Bachelot, T., & Perol, D. (2007). Breast cancer predictions by neural netwroks analysis: a comparison with logistic regression. *Engineering in medicine and and biological society. 29th anuual international conference of the IEEE* , 5424-5427.
- Buarque, F. (2000). Multiple sclerosis plaque: computer model and simulations. *Internal report. Imperial college of science technology and medicine, EEE Departure* , 12, 51.
- Celona, A., Grasso, G., & Puccio, L. (2009). Artificial neural network. Morphological classification by euclidean distance histograms for prognostic evaluation of magnetic resonance imaging in multiple sclerosis. *SIMAI Congress* , 283-292.
- Chiou, Y., & Lure, Y. (1994). Hybrid lung module detection (HLND) system. *Cancer Letters* , 119-126.
- Cook, D. (2005). Artificial neural network to predict mortality in critial care patients. An applocation of supervised machine learning. *Australasian anaesthesia* , 205-224.
- Doyle, H., Dvorchik, I., Mitchell, S., Marino, I., Ebert, F., McMichael, J., y otros. (1994). Predicting outcomes after liver transplantations. A connectionist approach. *Annals of surgery* , 408-415.
- Ebell, M. (1993). Artificial neural netwokrs for predicting failure to survive following hospital cardiopulmonary resuscitation. *Journal of family practice* , 297-303.
- Esposito, M., & De Pietro, G. (2011). An ontology-based fuzzy decision support system for multiple sclerosis. *Elsevier. Engineering applications of artificial intelligence* , 1340-1354.
- Gannous, A., & Elhaddad, R. (2011). Improving an artificial neural network model to predict thyroid bending protein diagnosis using preprocessing

- techniques. *World academic of science, engineering and technology* , 132-141.
- Gaspari, M., Roveda, G., Scandellari, C., & Stecchi, S. (2012). An expert system for the evaluation of EDSS in multiple sclerosis. *Elsevier. Artificial intelligence in medicine* , 187-210.
- Giarratano, J., & Riley, G. (2001). *Sistemas experto. Principios y programacion*. Mexico D.F.: International Thompson Editors.
- Gil, D., Johnsson, M., Garcia, J., & Soriano, A. (2009). Applications of artificial neural networks int the diagnosis of urological dysfunctions. *Expert systems with applications*, 5754-5760.
- Gutierrez, A., Gonzalez, J., Lopez, P., Ojeda, E., Sanchez, J., & Toro, J. (2001). Esclerosis Multiple. *Consensos en Neurologia: guias de practica clinica* , 1-13.
- Harrison, R., & Kennedy, L. (2005). Artificial neural network models for prediction of acute coronary syndromes using clinical data from de time of presentation. *Annals of emergency medicine. American collage of emergency* , 228-251.
- Kasmierczak, C., Catrou, G., & Van Lente, F. (1998). Diagnostic accuracy of pancreatic enzymes evaluated by use of multivariate data analysis. *Clinical chemistry*, 817-826.
- Primorac, C., & Mariño, S. (4 de 12 de 2010). *Un sistema experto para asistir decisiones turisticas. Diseño de un prototipo basado en la web*. Recuperado el 9 de 5 de 1012, de Un sistema experto para asistir decisiones turisticas. Diseño de un prototipo basado en la web: <http://www.eumed.net/rev/turyes/10/index.htm>
- Sharpe, P., Solberg, H., Rootwelt, K., & Yearworth, M. (1993). Artificial neural networks in diagnosis of thyroid function from in vitro laboratory tests. *Clinical chemistry* , 2248-2253.
- Shin, S., Tolum, M., & Hassanpour, R. (2012). Hybrid expert system: A survey of current approachesand applications. *Elsevier. Expert systems with applications* , 4609-4617.
- Tabares, H., Monsalve, D., & Diez, D. (2013). Modelo de sistema experto para la seleccion de personal docente universitario. *Tecnologicas* , 35-54.
- Wang, Y., & Shiun, J. (2009). Artificial neural network to predict skeletal metastasis in patients with prostate cancer. *Sprnger science, Med Syst* , 91-100.
- Xu, C., Brown, D., Breit, S., & Nakamura, T. (2006). Three new serum markers for prostate cancer detection within a percent free PSA-based artificial neural network. *Prostate* , 651-659.



## Prototipo de emulación de movimiento humano mediante una plataforma bípeda humanoide

### Prototype for human movement emulation by means of a bipedal humanoid platform

Milton Vicente Calderón Coy\*, César Augusto Coronel Segrera\*\*  
Esperanza Camargo Casallas\*\*\*

Citation / Para citar este artículo: Calderón Coy, M. V., Cesar Augusto, C. S., & Camargo Casallas, E. (2014). Prototipo de emulación de movimiento humano mediante una plataforma bípeda humanoide. Revista *Tecnura*, Edición especial, 217-229.

**Fecha de recepción:** 16 de julio de 2013 / **Fecha de aceptación:** 7 de marzo de 2014

#### Resumen

En esta investigación se desarrolló una plataforma bípeda humanoide, cuya función es emular la marcha humana partiendo del principio de mantener el mínimo consumo energético minimizando el movimiento vertical de la pelvis. La plataforma se realizó utilizando herramientas de diseño y simulación como AutoCAD para la estructura mecánica, Solid-edge para el modelamiento tridimensional y Phyton para simular el movimiento de la plataforma. Estas herramientas suministraron las características físicas exactas de la plataforma, permitiendo generar el modelo cinemático. El modelo cinemático de la marcha se desarrolló utilizando MATLAB, así: a partir de una versión modificada de los parámetros de Denavit-Hartenberg se establece la cinemática directa, y la cinemática inversa se determina a partir de una red neuronal de tipo feedforward-backpropagation. Se obtuvo una plataforma bípeda humanoide con diez grados de libertad, capaz de realizar flexión-extensión en la cadera y rodilla, abducción-aducción en la cadera, flexión plantar-dorsal y pronación-supinación en el

tobillo. La generación de trayectorias se obtiene en MATLAB mediante el ingreso del número de pasos, la longitud del paso, la altura del paso y una variable de tiempo que separará cada una de las secuencias o subpasos de la trayectoria. Como resultado se obtuvieron las trayectorias articulares en cadera, rodilla y tobillo en los tres planos, las cuales son acordes con la marcha humana y se evidenció con el robot bípedo humanoide.

Con esta investigación se espera establecer nuevos modelos para emular la marcha humana normal y patológica. Asimismo, esta es desarrollada por el grupo de investigación DIGITI de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

**Palabras clave:** marcha humana, cinemática directa, cinemática inversa, Denavit-Hartenberg, robot bípedo.

#### Abstract

This research develops a bipedal humanoid platform, whose function is to emulate the human gait based on the principle of maintaining the minimum power consumption by minimizing the vertical movement

\* Ingeniero en control electrónico. Investigador, grupo DIGITI de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: [mvc Calderonc@correo.udistrital.edu.co](mailto:mvc Calderonc@correo.udistrital.edu.co)

\*\* Ingeniero en control electrónico. Programador de hidrocarburos, Ecopetrol S.A.; investigador, grupo DIGITI de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: [cesar.coronels@icloud.com](mailto:cesar.coronels@icloud.com)

\*\*\* Ingeniera en control electrónico e instrumentación, especialista en instrumentación electrónica, estudiante de doctorado en ingeniería. Docente, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: [ecamargoc@udisrital.edu.co](mailto:ecamargoc@udisrital.edu.co)

of the pelvis. The platform was developed using design and simulation tools such as AutoCAD for mechanical structure, Solid-edge for tridimensional modeling, and Phyton to simulate the movement of the platform. These tools provided accurate physical characteristics of the platform, allowing to generate the kinematic model. The gait kinematic model was developed using MATLAB, then; from a modified version of the Denavit-Hartenberg parameters the forward kinematics was established; and inverse kinematics is determined based on a feed-forward backpropagation neuronal network. It was obtained a bipedal humanoid platform with ten degrees of freedom, capable of flexion-extension at the hip and knee, abduction-adduction at the hip,

plantar-dorsal flexion and pronation-supination at the ankle. The trajectory generation is obtained in MATLAB by entering the number of steps, step length, step height and a time variable that will separate each of the sequences or sub-steps of the path. As a result, joint trajectories in hip, knee and ankle in three planes were obtained, which are in accordance with human gait, evidenced by means of the humanoid bipedal robot.

This research hopes to establish new models to emulate the normal and pathological human gait. Likewise, it is developed by research group DIGITI at District University Francisco José de Caldas.

**Keywords:** Human gait, forward kinematic, inverse kinematic, Denavit-Hartenberg, bipedal robot.

## INTRODUCCIÓN

Aunque existen distintos métodos para el análisis de la marcha como el cinético y cinemático, el análisis cinemático de la marcha es una herramienta fundamental que facilita el diagnóstico, tratamiento, seguimiento e implementación de métodos de rehabilitación. Este análisis se basa en la descripción y cuantificación de la variación en los desplazamientos de los segmentos del cuerpo y los centros de giro de las articulaciones. La recopilación de esta información permite obtener diferentes relaciones que se analizan en forma de reporte clínico y/o como herramienta de visualización virtual. En general, el proceso completo registra, procesa y cuantifica el movimiento del paciente en un contexto clínico.

El análisis cinemático estima las posturas durante la marcha, calculando la ubicación espacial del centro de masa del cuerpo humano y los centros de giro en cada una de las articulaciones que intervienen en el movimiento; esta estimación es suficiente para la mayor parte de las aplicaciones clínicas (Connor, Vaughan, Davis, & Christopher, 1992), por lo que refiere un resultado cuantitativo y produce una representación virtual de la marcha, permitiendo al experto determinar alguna

patología no detectable con técnicas convencionales, como la videogrametría (Simon, 2004).

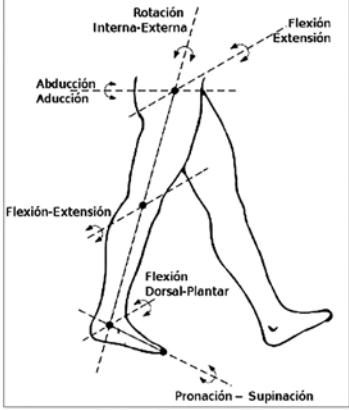
En medicina de rehabilitación es de gran importancia la estimación de la posición de los centros de giro de las articulaciones durante la marcha, ya que permite obtener la información clínica y un modelo observacional con un alto grado de veracidad (Aggarwal & Cai, 1999; Wang, 2003).

En esta investigación se obtienen las trayectorias articulares durante las fases de marcha humana mediante cinemática directa obteniendo una representación virtual y se evidencia a partir de la construcción de un robot bípedo humanoide, de donde se obtienen las características físicas del modelo.

## BIOMECÁNICA DE LA MARCHA BÍPEDA

Los métodos usados para estudiar robots, también pueden utilizarse para analizar la cinemática y dinámica humana. De esta forma, una de las suposiciones más comunes consiste en modelar el cuerpo humano como una cadena de eslabones rígidos, en donde cada segmento tiene diversas propiedades, como la longitud y la masa. Estos segmentos se unen mediante junturas que imitan las articulaciones humanas (cadera, rodilla y tobillo)

	Articulación	Función	Rango
Cadera		Extensión - Flexión	-30 ~ 120
		Aducción - Abducción	-20 ~ 45
		Rotación Interna - Externa	-15 ~ 60
Rodilla		Extensión - Flexión	0 ~ 120
		Flexión Plantar - Dorsal	-40 ~ 20
Tobillo		Supinación - Pronación	-35 ~ 15



**Figura 1.** Ubicación de los grados de libertad y el rango de movilidad en cada articulación.

**Fuente:** Tomado de (Nordin, 2004).

considerando los seis grados de libertad distribuidos en las tres articulaciones y los rangos de movimiento básicos para el proceso de locomoción bípeda humanoide, partiendo de la biomecánica humana, como se muestra en la figura 1 (Nordin, 2004), (Luo et al., 2011).

## Locomoción humana

La locomoción humana se constituye como un proceso cíclico; por tanto, repetitivo, por ello es dividida en fases (Kuo, 2007). La división de las fases de la locomoción depende del enfoque desde el cual se analiza el proceso de caminar, este puede ser:

### Análisis del cuerpo completo y como es soportado por cada pierna

Al analizar el proceso de esta manera, se tiene que el ciclo del caminado consta de 2 fases: fase de soporte doble (double support phase) y fase de soporte único (single support phase) (Kuo, 2007; Jacquelin; Perry, 1992; Zanchi, 2000). El soporte único es realizado tanto por la pierna derecha como por la izquierda, lo que se identifica como soporte único derecho y soporte único izquierdo.

### Fase de soporte único (Single Support Phase)

Durante esta fase, el pie al que se le hace referencia del soporte es el que se encuentra apoyado sobre el suelo y relativamente estacionario, como se observa en la figura 2; es el encargado de mantener el peso del cuerpo, y de ahí su nombre, "soporte". El comienzo de esta fase se puede distinguir cuando la otra pierna (la que no va a hacer el soporte) deja el suelo siendo los dedos del pie lo último en estar en contacto con el suelo, y termina cuando esa misma pierna vuelve a tocar el suelo por medio del talón (Kuo, 2007; Jacquelin; Perry, 1992; Zanchi, 2000).



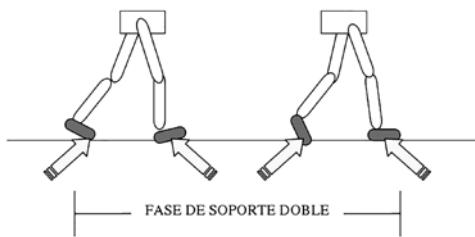
**Figura 2.** Fase de soporte único.

**Fuente:** Tomado de (Connor et al., 1992).

### Fase de soporte doble (Double Support Phase)

Se caracteriza porque los dos pies se encuentran en contacto con el suelo compartiendo el soporte

del cuerpo. El comienzo de esta fase se reconoce cuando el talón de una pierna toca por primera vez el suelo y termina cuando los dedos del pie de la otra pierna se despegan del suelo. La duración de esta fase es bastante corta, pero indispensable ya que durante ella se hace el traspaso del soporte del cuerpo de una pierna a otra, tal como se puede ver en la figura 3 (Kuo, 2007; Jacquelin; Perry, 1992; Zanchi, 2000).



**Figura 3.** Fase de soporte doble.

**Fuente:** Tomado de (Connor *et al.*, 1992).

Al analizar el movimiento que realiza cada pierna por separado se debe tener en cuenta que cada pierna es visto como un proceso independiente; por tanto, estaría dividido en fase de apoyo (stance phase) y fase de balanceo (swing phase). Cada una de estas fases se encuentra para las dos piernas, respectivamente (Kuo, 2007; Jacquelin; Perry, 1992; Zanchi, 2000).

#### *Fase de apoyo (Stance Phase)*

Esta fase representa el período de tiempo durante el cual la pierna analizada se encuentra en contacto con el suelo. Comienza cuando su talón toca el suelo y termina cuando los dedos del pie se despegan del suelo (Kuo, 2007; Jacquelin; Perry, 1992; Zanchi, 2000).

#### *Fase de balanceo (Swing Phase)*

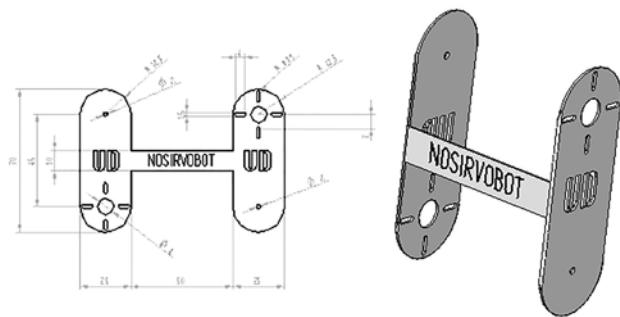
Esta fase se distingue porque es el período de tiempo durante el cual la pierna analizada se encuentra en el aire balanceándose hacia el frente (Jacquelin Perry, 1992).

Luego de haber analizado el caminado humano y haber hecho una descripción general, es necesario abordar ciertos conceptos básicos sobre robótica ya que para lograr los objetivos propuestos se deben describir las piernas como una cadena articulada que implica un tratamiento de los temas fundamentales de esta área (Jacquelin Perry, 1992).

## METODOLOGÍA

### Estructura mecánica de la plataforma

La plataforma del robot bípedo se diseñó utilizando herramientas de diseño asistido por computador, como AutoCAD® y Solid-Edge®. Cada una de las piezas de la plataforma fue diseñada partiendo de la relación antropométrica del cuerpo humano, después se procedió al modelamiento en 3D de cada pieza; a modo de ejemplo se muestra la elaboración de una pieza en la figura 4.



**Figura 4.** Modelamiento en 3D de una pieza de la plataforma.

**Fuente:** Elaboración propia.

Posteriormente se hizo el ensamblaje de todas las piezas del robot en Solid-Edge, tal como se observa en la figura 5. Una vez verificado el ensamblaje de las piezas en Solid-Edge, se elaboraron cada una de estas conservando las medidas exactas de la simulación; en la figura 5 puede observarse la plataforma ensamblada totalmente.



**Figura 5.** Modelo en 3D de la plataforma completa

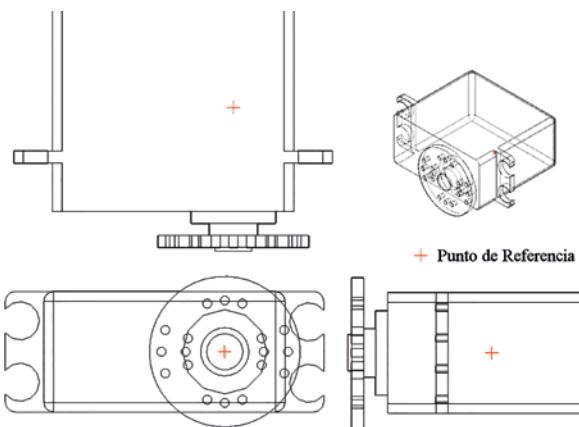
**Fuente:** Elaboración del autor.

## Modelamiento de la plataforma

### Extracción de las características físicas de la plataforma

Las características físicas de los eslabones se extrajeron en forma indirecta con ayuda de Solid-Edge, lo cual se hizo mediante la ubicación de puntos de referencia en los ejes de los servomotores, tal como se puede observar a manera de ejemplo en la figura 6, en la ingle y en la base de los pies.

Una vez definidos estos puntos de referencia se efectuaron mediciones entre ellos para así

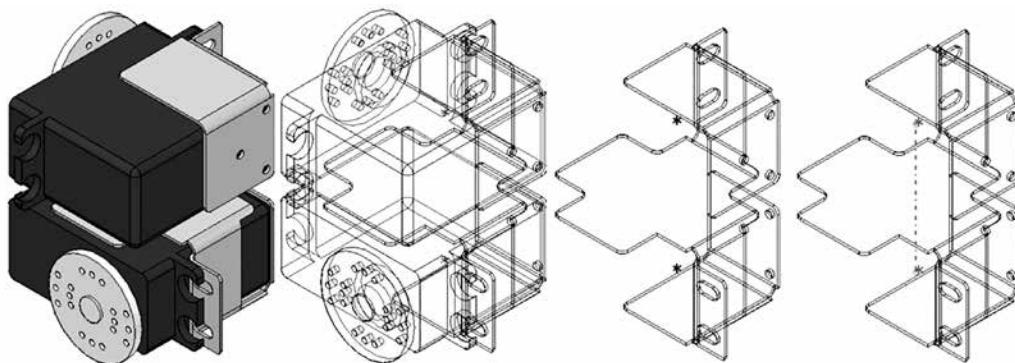


**Figura 6.** Ubicación del punto de referencia situado en el eje del servomotor.

**Fuente:** Elaboración del autor.

determinar las características de los eslabones; en la figura 7 se observa a manera de ejemplo el ensamble del tobillo y la cadera, en donde se toman los puntos de referencia antes mencionados y se traza una línea (Roja) que determinaría la geometría del eslabón en cada caso.

Así mismo, se hallaron los centros de volumen y masa de cada uno de los eslabones mediante la ayuda del mismo software, para lo cual fue necesario seleccionar el tipo de material utilizado en las piezas, en este caso se usó acero inoxidable y aluminio, los cuales presentan una densidad aproximada de  $7.850 \text{ kg/m}^3$  y  $2.700 \text{ kg/m}^3$ , respectivamente.



**Figura 7.** Ejemplo de caracterización de los eslabones.

**Fuente:** Elaboración del autor.

### Modelo cinemático de la plataforma

Una vez extraídas las características físicas de cada eslabón se procede a efectuar un modelo de cada uno de ellos y posteriormente su ensamblaje cinemático de la plataforma, a partir de los parámetros de Denavit-Hartenberg.

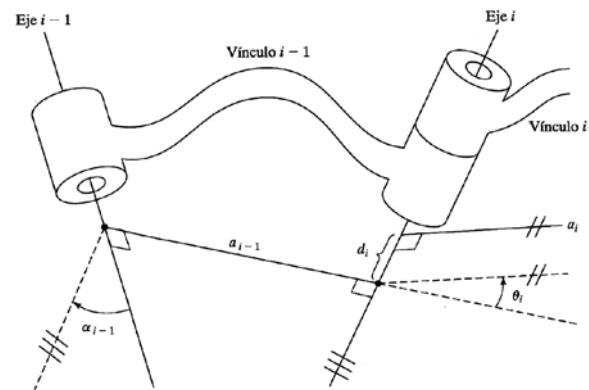
### Denavit-Hartenberg

El método de Denavit-Hartenberg consiste en un procedimiento sistemático mediante el cual se resuelve el problema de la cinemática directa de un manipulador constituido por un sistema de eslabones; el método se puede subdividir en tres fases, la primera consiste en la definición de los parámetros de D-H, luego se realiza la asignación de los sistemas de referencia y finalmente se obtienen las matrices de transformación homogénea (Gallego, Juan; Forner, 2008; V. Tikhanoff, P. Fitzpatrick, F. Nori, L. Natale, 2008).

Un eslabón siempre se encuentra relacionado o unido con otro eslabón a través de algún tipo de juntura. Por eso se puede considerar que la adecuada definición del eslabón y su juntura subsiguiente permiten la correcta descripción del sistema mecánico; en la figura 8 se observa un eslabón con la notación de Denavit-Hartenberg.

Para lograr esto, se han establecido 2 parámetros para describir el tamaño y la forma del eslabón, respectivamente, y 2 parámetros para describir la posición relativa de un eslabón con respecto a su predecesor. Estos cuatro parámetros se deben a Denavit y Hartenberg, por lo que se conocen como parámetros Denavit-Hartenberg.

Los parámetros que definen el tamaño y la forma del eslabón son: la longitud del eslabón  $a_{i-1}$  (link length) y la torción del eslabón  $a_{i-1}$  (link twist). Mientras que los parámetros que describen la posición relativa del eslabón con respecto a su predecesor son: separación de eslabón  $d_i$  (link offset) que expresa la distancia entre los dos eslabones, y el ángulo de juntura o articular  $\theta_i$  (jointangle) que expresa el ángulo formado por los dos eslabones.



**Figura 8.** Parámetros de Denavit-Hartenberg.

**Fuente:** Tomado de (Sandin, 2003)

Una vez extraídos los parámetros de D-H del manipulador se elabora una tabla con los valores que describen cada eslabón, de la siguiente forma:

**Tabla 1.** Parámetros de Denavit-Hartenberg

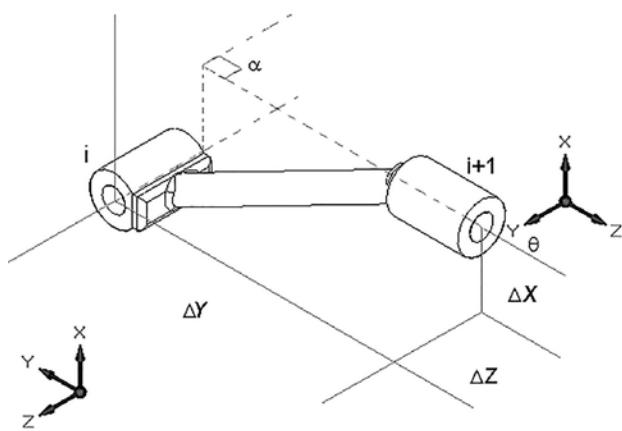
$i$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
1			
...			
$n$			

Y posteriormente se obtienen las matrices de transformación homogénea mediante la ecuación (1).

$${}^A = \text{rot}(X_i, \dot{\theta}_i) \text{trans}(X_i, a_{i-1}) \text{rot}(Z_i, \dot{\alpha}_{i-1}) \text{trans}(Z_i, d_i) \quad (1)$$

### Modificación de los parámetros de Denavit-Hartenberg

El modelo matemático de los eslabones se realizó mediante una versión modificada de los parámetros de Denavit-Hartenberg (figura 9). La modificación efectuada se implementó ya que no se pudieron expresar los eslabones con la notación normal de cuatro parámetros.



**Figura 9.** Modificación de los parámetros de Denavit-Hartenberg.

**Fuente:** Tomado de (Sandin, 2003)

Por lo que se tuvo en cuenta la rotación sobre el eje, tal como se muestra en la siguiente tabla 2.

**Tabla 2.** Conversión de parámetros según la rotación sobre el eje

$\alpha$	0	90	-90
$a$	$\Delta x$	$\Delta x$	$\Delta x$
$d$	$\Delta y$	$-\Delta z$	$\Delta z$
$p$	$\Delta z$	$\Delta y$	$-\Delta y$

Adicionando un parámetro mediante el cual se logró describir el eslabón.

$\alpha$  → rotación entre y en el eje  
 $a$  → longitud del eslabón entre y en el eje  
 $p$  → altitud del eslabón entre y en el eje  
 $\theta$  → rotación entre y en el eje  
 $d$  → profundidad del eslabón entre y en el eje

#### Obtención de los parámetros de Denavit-Hartenberg

A partir de las modificaciones de los parámetros de Denavit-Hartenberg, se establecieron los parámetros de Denavit-Hartenberg. (Ver las tablas 3 y 4).

**Tabla 3.** Parámetros de Denavit-Hartenberg modificada para la pierna izquierda.

n	$\alpha$	a	p	$\theta$	d
0	$(-\pi)/2$	-Cmed	0	$\theta_1 + \pi/2 + \text{corr}$	0
1	$\pi/2$	Tob	Tov	$\theta_2$	-Top
2	0	h	0	$\theta_3$	hv
3	0	Pn	-Pnp	$\theta_4$	-Pnv
4	$\pi/2$	Tob	Top	$-\theta_5 + \pi/2 + \text{corr}$	Tov
5	$(-\pi)/2$	0	0	0	-AltPie

**Tabla 4.** Parámetros de Denavit-Hartenberg modificada para la pierna derecha.

n	$\alpha$	a	p	$\theta$	d
0	$(-\pi)/2$	Cmed	0	$-\theta_1 + \pi/2 - \text{corr}$	0
1	$\pi/2$	Tob	Tov	$\theta_2$	Top
2	0	h	0	$-\theta_3$	-hv
3	0	Pn	-Pnp	$\theta_4$	Pnv
4	$\pi/2$	Tob	-Top	$\theta_5 + \pi/2 - \text{corr}$	Tov
5	$(-\pi)/2$	0	0	0	-AltPie

Las variables de construcción están relacionadas en la tabla 5.

**Tabla 5.** Variables de modelamiento.

Sección	Variable	Valor [mm]
Cadera	$Cmed2$	22.5
	$corr$	
Cadera	$Tob$	22.7
Tobillo	$Tov$	14.25
	$Top$	14.25
Muslo	$h$	45
	$hv$	3.5
	$Pn$	62.84
Pierna	$Pnp$	2.14
	$Pnv$	1
Pie	$AltPie$	22.83

Basándose en los parámetros obtenidos (tablas 3 y 4) se generaron las matrices de transformación homogénea que relacionan una articulación con la siguiente.

### Generación de las matrices de transformación homogénea

Las matrices de transformación homogénea se encuentran relacionadas a continuación y en cada una de ellas se encuentran las variables articulares que están agrupadas en las ecuaciones (2) y (3). La numeración de dichas variables se hizo de arriba a abajo usando MATLAB.

$$AI = \begin{bmatrix} ai1 \\ ai2 \\ ai3 \\ ai4 \\ ai5 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$AD = \begin{bmatrix} ad1 \\ ad2 \\ ad3 \\ ad4 \\ ad5 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Matriz de transformación del punto de referencia ubicado en el servomotor izquierdo uno referenciado al punto de referencia en la ingle (ecuación (4))

$${}^0MTI_1 = \begin{bmatrix} -s(ai1 + corr) & -c(ai1 + corr) & 0 & -Cmed2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -c(ai1 + corr) & s(ai1 + corr) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Matriz que relaciona el punto de referencia del servomotor dos con respecto al servomotor uno (ecuación (5)).

$${}^1MTI_2 = \begin{bmatrix} c(ai2) & -s(ai2) & 0 & T \\ 0 & 0 & -1 & Top \\ s(ai2) & c(ai2) & 0 & Tov \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Matriz de transformación que relaciona el servomotor tres al servomotor dos (ecuación (6)).

$${}^2MTI_3 = \begin{bmatrix} c(ai3) & s(ai3) & 0 & h \\ -s(ai3) & c(ai3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & hv \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Matriz que relaciona el servomotor cuatro al punto de referencia del servomotor tres de la pierna izquierda (ecuación (7)).

$${}^3MTI_4 = \begin{bmatrix} c(ai4) & -s(ai4) & 0 & Pn \\ s(ai4) & c(ai4) & 0 & -Pnp \\ 0 & 0 & 1 & -Pnv \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Matriz que relaciona el servomotor cinco con respecto al punto de referencia situado en el servomotor cuatro (ecuación (8)).

$${}^4MTI_5 = \begin{bmatrix} s(ai5 - corr) & -c(ai5 - corr) & 0 & T \\ 0 & 0 & -1 & -Tov \\ c(ai5 - corr) & s(ai5 - corr) & 0 & Top \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Matriz de transformación que relaciona la base del pie con respecto al punto de referencia situado en el servomotor cinco (ecuación (9)).

$${}^5MTI_{bp} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -AltPie \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

En las ecuación (10) a la (15), se muestran las matrices de transformación equivalentes para la pierna derecha.

$${}^0MTD_1 = \begin{bmatrix} s(ad1 + corr) & -c(ad1 + corr) & 0 & Cmed2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -c(ad1 + corr) & -s(ad1 + corr) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$${}^1MTD_2 = \begin{bmatrix} c(ad2) & -s(ad2) & 0 & T \\ 0 & 0 & -1 & -Top \\ s(ad2) & c(ad2) & 0 & Tov \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

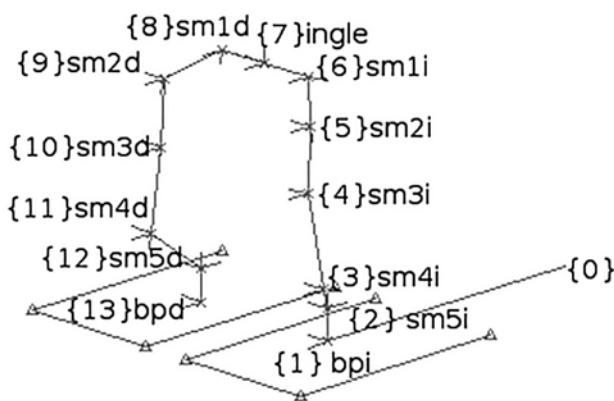
$${}^2MTD_3 = \begin{bmatrix} c(ad3) & s(ad3) & 0 & h \\ -s(ad3) & c(ad3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -hv \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$${}^3MTD_4 = \begin{bmatrix} c(ad4) & -s(ad4) & 0 & Pn \\ s(ad4) & c(ad4) & 0 & -Pnp \\ 0 & 0 & 1 & Pnv \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$${}^4MTD_5 = \begin{bmatrix} -s(ad5 - corr) & -c(ad5 - corr) & 0 & T \\ 0 & 0 & -1 & -Tov \\ c(ad5 - corr) & -s(ad5 - corr) & 0 & -Top \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$${}^5MTD_{bp} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -AltPie \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

En la figura 10 se encuentra el orden en que se sitúan los marcos de referencia en la plataforma modelados en MATLAB.



**Figura 10.** Ubicación de los puntos de referencia de la plataforma con respecto a un marco de referencia fijo.

**Fuente:** Elaboración propia.

*Elaboración de la cinemática inversa mediante RN*  
Para simplificar el modelo de la plataforma se redujeron los grados de libertad, ya que se insertaron

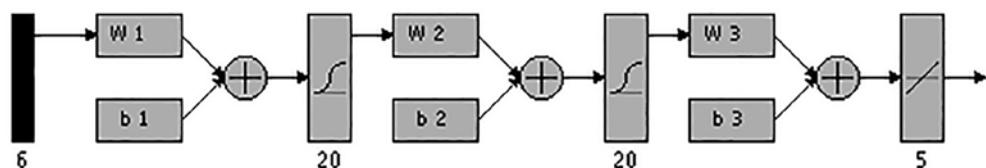
tres restricciones al modelo con lo cual el marco de referencia del pie de apoyo presenta el mismo marco de referencia que el origen.

La cinemática inversa se trabajó a través de redes neuronales, para ello se escogió la red neuronal de tipo feedforward-backpropagation, la cual tiene entre sus propiedades y aplicaciones ser utilizada en aproximación de funciones (Cravajal, 2003). La red neuronal utilizada tiene la topología que se aprecia en la figura 11.

La función de la red neuronal es devolver los valores de las variables articulares al ingresarles las posiciones deseadas para los pies y la ingle. Para lograr este objetivo se creó un juego de datos basado en la cinemática directa, en el cual se hallan dos subconjuntos de datos uno de los cuales contiene las posiciones y orientaciones de la ingle y las posiciones de los pies, y el otro contiene los valores de las variables articulares (Pina, 2007).

Para crear estos conjuntos se evaluaron las funciones características de una sola pierna, haciendo una variación de 10 grados por vez en cada servomotor; luego de barrido el rango del servo se continuaba con el siguiente hasta completar el barrido de los cinco servos. Con esto se generó un conjunto de 22750 datos de prueba con sus respectivos objetivos.

La red neuronal fue diseñada y probada con los datos cinemáticos de la pierna izquierda; sin embargo, debido a la simetría existente, la red puede utilizarse con la pierna derecha efectuando dos cambios de signo.



**Figura 11.** Topología de la red neuronal utilizada.

**Fuente:** Tomado de (Cravajal, 2003).

## Construcción del robot virtual

### Simulación en Python

A partir de las características físicas de la plataforma y los subconjuntos de datos requeridos para mover cada uno de los servomotores se desarrolló un entorno de simulación en Phyton con el fin de cubrir expectativas de movimiento en cuanto a simulación en ambiente real; para esto el paso inicial fue diseñar WordSpace 3D usando la librería vPython de Python para entornos 3D (Pina, 2007).

Luego de tener desarrollado el entorno se procedió a elaborar y caracterizar una librería enfocada a las propiedades del servomotor. Estas propiedades correspondían al servomotor en su ambiente real, como peso, torque y velocidad.

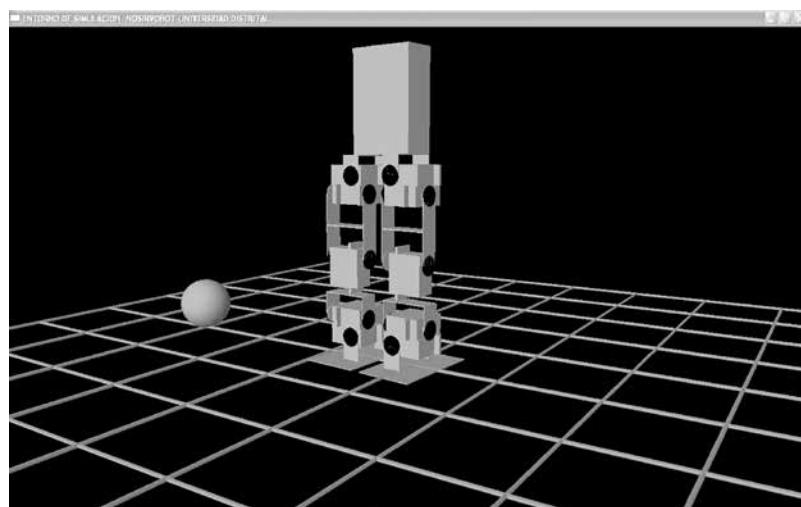
**Servomotor:** Para el diseño del servomotor se hizo una caja dándole las propiedades físicas como peso y densidad, esto se logra a través de las librerías PyODE. El servomotor está creado con base en una simple caja en 3D con las respectivas dimensiones del servo usado; a este se le agregó una circunferencia en uno de los costados simulando el eje rotativo y dándole las cualidades de rotación al mismo.

Creadas las librerías de los servomotores y de las uniones se procedió a ensamblar el robot virtual posicionando cada uno de los elementos en sus respectivas coordenadas y haciendo las uniones en los puntos específicos, con la finalidad de generar todo como un conjunto. Con cada una de las piezas y el servomotor se inicia la construcción del robot.

Otra pieza fundamental es el tronco en donde va situada la PDA, es decir, el controlador electrónico del robot, la cual está compuesta de un objeto caja con 2 articulaciones en su parte inferior. Debido a esto es crucial la medición de peso del conjunto como tal para que la simulación sea lo más real posible.

El ensamblaje de la plataforma se hizo de abajo hacia arriba para no tener inconvenientes con las propiedades de la librería PyODE. La construcción completa se puede observar en la figura 12.

En el entorno de simulación se diseñó un aplicativo llamado Servomanager, este se utilizó para la programación de los movimientos virtuales del robot. El Servomanager consiste en una interfaz que sea capaz de traducir el lenguaje escrito previamente establecido en movimientos representados en el modelo virtual.



**Figura 12.** Modelo de la plataforma completa en el entorno de simulación.

**Fuente:** Elaboración del autor.

## RESULTADOS

### Sistema electrónico del robot

El sistema electrónico está compuesto por una tarjeta controladora de servos, los servomotores, un acelerómetro y un computador o un asistente personal (PDA, por sus siglas en inglés); los servomotores son la fuente motriz de la plataforma ya que son los encargados de hacer las variaciones sobre las variables articulares con las cuales se logrará el desplazamiento de la plataforma; el acelerómetro es el encargado de medir la inclinación de la plataforma; la tarjeta controladora de servos es la encargada de emitir las señales de control a cada uno de los servomotores presentes en la plataforma, además es la encargada de hacer la lectura del acelerómetro y establecer comunicación con el computador o con la PDA y de este modo recibir las instrucciones que debe emitir a los servomotores con el fin de reproducir el movimiento deseado, y en algunos casos la función de enviar al computador la lectura del acelerómetro; el diagrama de bloques implementado se muestra en la figura 13.

La comunicación entre la tarjeta controladora de los servomotores y la PDA se hizo mediante una

adaptación de voltajes entre las etapas de comunicación ya que la PDA funciona con 3.3 voltios como uno lógico, y la tarjeta controladora maneja voltajes TTL de 5 voltios.

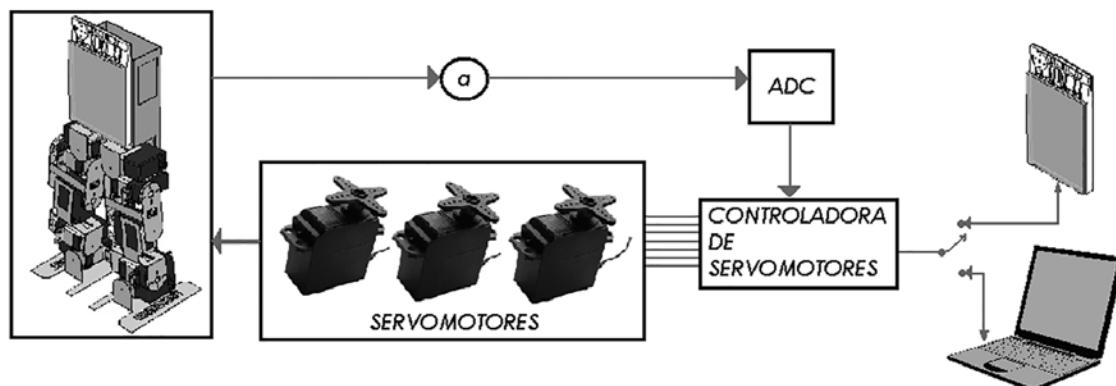
Para efectos de la comunicación con la tarjeta controladora el puerto serial debió configurarse con la opción RST y CTS interconectados.

Fue necesario que los voltajes de lógica y los voltajes de alimentación de los servomotores provinieran de fuentes diferentes, ya que el ruido proveniente de los servomotores afecta la comunicación entre la tarjeta controladora de servos y la PDA.

### Control de estabilidad

El modelo de control de la plataforma está compuesto por un sensor de estabilidad (el acelerómetro) y los actuadores (los servomotores), (Eiji, 2007; Sandin, 2003; Zivanovic, 2006).

El acelerómetro es uno de los transductores más versátiles, siendo el más común el piezoelectrónico por compresión. Este se basa en que cuando se comprime un retículo cristalino piezoelectrónico, se produce una carga eléctrica proporcional a la fuerza aplicada. En este caso se utilizó el acelerómetro LIS3L02AL, el cual posee medición en los 3 ejes, el sensor envía 3 señales correspondientes a cada



**Figura 13.** Modelo de control de la plataforma.

**Fuente:** Elaboración propia.

uno de los ejes; estas señales varían según la orientación del robot. En cuanto a las señales de los acelerómetros configurados en posición de gravedad, se debe aclarar que cada vez que alguno de los ejes apunte en contra de la gravedad este tomará un valor positivo, y cuando apunte a favor de la gravedad este tomará un valor negativo y cuando se encuentre en el plano perpendicular a la gravedad, tendrá un valor neutro.

### Generación de trayectorias

La generación de trayectorias se obtiene en MatLab mediante el ingreso de los cuatro parámetros antes mencionados: número de pasos, longitud, altura del paso y una variable de tiempo que separara cada una de las secuencias o subpasos de la trayectoria. Las trayectorias resultantes se muestran en la figura 14.

En la figura 14 se pueden observar las trayectorias que seguirán los puntos de referencia ubicados en la ingle (morado), pie izquierdo (azul) y pie derecho (rojo), (a) esta la trayectoria tridimensional, en las figuras (b), (c) y (d) aparecen las trayectorias desde una vista superior, lateral y frontal, respectivamente.

Las trayectorias obtenidas se encuentran acordes con las trayectorias de la marcha humana.

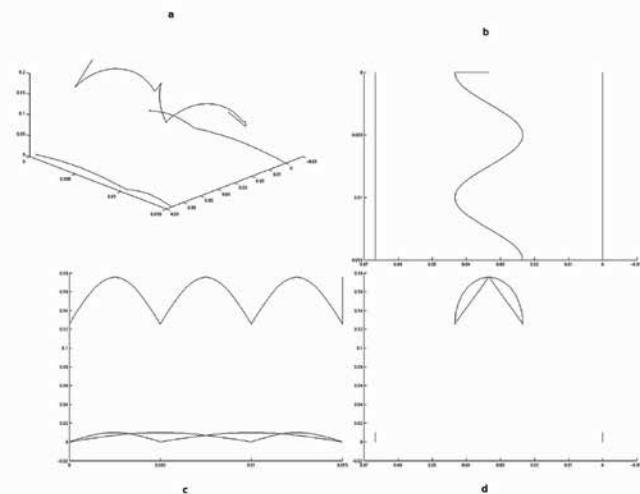
## CONCLUSIONES

Mediante la utilización de herramientas computarizadas se diseñó e implementó una plataforma bípeda humanoide, a la cual se le aplicó un análisis cinemático y con base en este se generaron componentes de software en Matlab, Python y Visual Basic Embedded, mediante los cuales se emuló el movimiento bípedo humanoide en la plataforma.

Se diseñó e implementó una plataforma de emulación del movimiento humano, con herramientas de diseño asistido por computador como lo es Solid-edge para el modelamiento tridimensional de la plataforma y para su construcción se utilizó AutoCAD en el proceso de diseño y corte de cada una de las piezas necesarias para ensamblar la plataforma.

El modelo cinemático de la plataforma se determinó mediante las características obtenidas con el uso de las herramientas mencionadas, con las cuales se obtienen los modelos de cada uno de los elementos que componen la plataforma como eslabones, motores, baterías, etc., y posteriormente se genera el modelo cinemático de la plataforma.

Los algoritmos para los movimientos básicos de las articulaciones se generaron mediante la



**Figura 14.** Trayectorias generadas para la plataforma.

**Fuente:** Elaboración del autor.

comparación entre la señal de control y el ángulo en cada una de las articulaciones.

La generación de algoritmos complejos está a cargo de una función que genera las trayectorias cartesianas a cada uno de los puntos de referencia situados a lo largo de la plataforma, los cuales se ingresan a una red neuronal que genera las trayectorias articulares de cada una de las articulaciones de la plataforma; acto seguido se hace la conversión de las variables articulares a señales de control que serán enviadas a cada uno de los motores de la plataforma para así reproducir el movimiento programado.

Se integró a la plataforma un acelerómetro que sensa mediante sus propiedades intrínsecas de medición en los tres ejes, estas se envían a un lazo de control en el cual se toman las decisiones para la estabilidad del sistema.

En el momento del ensamblaje final de la plataforma debe tenerse en cuenta que los servomotores se encuentren en su posición media con los respectivos offsets calibrados, para la obtención de una perfecta simetría en los movimientos respecto a la pierna izquierda y la derecha.

Todos los movimientos deben ser previamente calculados en el lenguaje phyton para evitar choques mecánicos entre las piezas y del mismo modo desgastes de los servomotores innecesariamente.

## FINANCIAMIENTO

Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

## REFERENCIAS

- Aggarwal, J. K., & Cai, Q. (1999). Human motion analysis: a review. *Computer Vision and Image Understanding*, 73(3), 428-440.
- Connor, J. C. O.; Vaughan, C. L.; Davis, B. L., & Christopher, L. (1992). *DYNAMICS OF HUMAN GAIT* (C. Vaughan, ed.) Africa (2nd ed., p. 153). Cape Town, South Africa: Kiboho Publisher. Retrieved from <http://www.kiboho.co.za/GaitCD>
- Carvajal, J. (2003). *Robótica. Aproximación al diseño* (p. 37). Pamplona: Universidad de Pamplona.
- Eiji, A. T. A. (ed.) (2007). *Mechatronics for Safety, Security, Security and Dependability in a New Era* (First, p. 461). Great Britain: Elsevier.
- Gallego, Juan; Forner, A. (2008). Síntesis de la marcha robótica mediante la aproximación del ciclo límite: el robot bípedo esbirro. *Science CSIC*, 54-109.
- Kuo, A. D. (2007). The six determinants of gait and the inverted pendulum analogy: A dynamic walking perspective. *Human movement science*, 26(4), 617-56.
- Luo, G.; Houston, V.; Sasson, N.; Garbarini, M.; Beattie, A., & Thongpop, C. (2011). Gait Characteristic Indices to Quantitatively Characterize Human Gait. *Time*, 23(3).
- Nordin, M. (2004). *Biomecánica Básica del Sistema Muscoesquelético-Nordin.pdf* (Tercera Edición, p. 345). Madrid, España: McGraw Hill.
- Perry, Jacqueline (1992). *Gait Analysis: Normal and Pathological Function. Journal of Pediatric Orthopaedics* (Vol. 12, p. 576). Slack Incorporated.
- Perry, Jacqueline (1992). Normal Gait. *Clin Orthop.*
- Pina, C. (2007). *Humanoid Robots*. (A. R. S. International, Ed.) (Primera Edición). Croatia: I-Tech.
- Sandin, P. E. (2003). *Robot Mechanics and Mechanical devices* (Primera Edición, p. 299). New York: McGraw Hill.
- Simon, S. R. (2004). Quantification of human motion: gait analysis-benefits and limitations to its application to clinical problems. *Journal of biomechanics*, 37(12), 1869-80.
- V. Tikhanoff, P.; Fitzpatrick, F.; Nori, L.; Natale, G. M. and A. C. (2008). The iCub Humanoid Robot Simulator. *Advanced Robotics*, 1(1), 22-26.
- Wang, L. (2003). Recent developments in human motion analysis. *Pattern Recognition*, 36(3), 585-601.
- Zanchi, V. (2000). Quantitative human gait analysis. *Simulation Practice and Theory*, 8(1-2), 127-139.
- Zivanovic (2006). *Multi-Arm Cooperating Robots Microprocessor-Based And Intelligent Systems Engineering* (p. 297). Netherlands: Advisor Board.





## **Sistema de alta disponibilidad basado en plataforma de virtualización para pequeñas y medianas empresas**

**High availability system based on virtualization platform for small & medium businesses**

Luis Felipe Wanumen Silva\*, Darin Jairo Mosquera Palacios\*\*

Citation / Para citar este artículo: Wanumen Silva, L. F., & Mosquera Palacios, D. J. (2014). Sistema de alta disponibilidad basado en plataforma de virtualización para pequeñas y medianas empresas. Revista *Tecnura*, Edición especial, 231-239.

**Fecha de recepción:** 4 de febrero de 2014 / **Fecha de aceptación:** 16 de mayo de 2014

### **Resumen**

La tolerancia a fallos se basa hoy día fundamentalmente en un concepto: redundancia (Guangping, y otros, 2009). La investigación busca proponer una solución para pequeñas y medianas empresas basada en una arquitectura de alta disponibilidad y tolerancia a fallos, soportada en servicios, mediante la duplicación de sus elementos críticos y la disposición redundante de elementos software y hardware que cooperen (Weiping & Ke, 2006), bien sea en forma activa-activa o activa-pasiva, siempre en forma transparente al usuario final.

**Palabras clave:** confiabilidad, disponibilidad de sistemas, redundancia, tolerancia a fallos, virtualización.

### **Abstract**

Fault tolerance today is essentially based on a concept: redundancy (Guangping, y otros, 2009). The research aims to propose a solution to small and medium enterprises based on an architecture for high availability and fault tolerance. Services supported based on duplicating its critical elements and placement of software and hardware redundant which cooperate actively-active or active-passive (Weiping & Ke, 2006), in a way transparent to the end user.

**Keywords:** High availability, fault tolerance, virtualization, SAN / NAS, Pymes, VMware.

\* Ingeniero de sistemas. Especialista en ingeniería de software, magíster en Ingeniería de Sistemas y Computación. Docente, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto:

lwanumen@udistrital.edu.co

\*\* Ingeniero de sistemas, especialista en teleinformática, magíster en teleinformática; docente, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: dmosquerap@udistrital.edu.co

## INTRODUCCIÓN

Es claro que durante los últimos años el gobierno, la academia y el sector privado, particularmente el financiero, han dirigido sus estrategias de apoyo y promoción de sus servicios hacia la Pyme, al darse cuenta de que es en este sector empresarial donde se puede tener el apoyo para alcanzar un acelerado crecimiento de la economía y aunque siempre se habían considerado importantes, hoy han llegado a ser imprescindibles al proyectarse como una de las mejores opciones para lograr la plena reactivación económica, aun con todas sus falencias como es la falta de gestión organizacional, financiera, comercial, administrativa y tecnológica.

Y es en esa última de sus falencias donde, por medio de este proyecto, queremos brindar una solución que mejore las condiciones tecnológicas de una pyme, mediante nuevas plataformas, de modelos (Ge, 2009) y herramientas unas de pago y libres, pero que ajustándolas a las necesidades de las empresas generarán una solución muy eficiente y a bajos costos.

La investigación incentiva el uso de nuevas tecnologías en las pymes mediante la creación de un sistema de alta disponibilidad (Kishor, Ranjith, David, Swami, & Rick, 2006) basado en plataforma de virtualización, que ofrece a dichas empresas la consolidación de sus recursos tecnológicos (Philippe, 2010) y a su vez garantiza la alta disponibilidad en los servicios (Sung, y otros, 2007) tecnológicos que presta a sus clientes y empleados.

Los servicios y productos implementados en esta plataforma fueron implementaciones CRM, ERP, Gestor Documental y Servidor WEB con licencias libres. La planeación y ejecución del Sistema de Alta disponibilidad se encuentra enmarcada en la metodología de diseño de soluciones empresariales de redes (Terrasson, Briand, Basrour, & Dupe, 2009) (Koo & Kwong, 2005).

## CARACTERIZACIÓN DE LAS EMPRESAS A LAS QUE VA DIRIGIDO EL SISTEMA

El sistema de alta disponibilidad va dirigido a empresas colombianas pequeñas y medianas (conocidas por el acrónimo Pyme, lexicalizado como pyme), son empresas con características distintivas, y tiene dimensiones con ciertos límites ocupacionales y financieros prefijados por los Estados o regiones. Las pymes son agentes con lógicas, culturas, intereses y un espíritu emprendedor específicos. Usualmente se ha visto también el término MiPyME (acrónimo de "micro, pequeña y mediana empresa"), que es una expansión del término original, en donde se incluye la microempresa.

La pequeñas y medianas empresas son entidades independientes, con una alta predominancia en el mercado de comercio, quedando prácticamente excluidas del mercado industrial por las grandes inversiones necesarias y por las limitaciones que impone la legislación en cuanto al volumen de negocio y de personal, los cuales si son superados convierten, por ley, a una microempresa en una pequeña empresa, o una mediana empresa se convierte automáticamente en una gran empresa. Por todo ello una pyme nunca podrá superar ciertas ventas anuales o una determinada cantidad de personal.

### Importancia de las Pymes

Las pequeñas y medianas empresas cumplen un importante papel en la economía de todos los países. Los países de la OCDE suelen tener entre 70% y 90% de los empleados en este grupo de empresas.<sup>2</sup> Las principales razones de su existencia son:

Pueden realizar productos individualizados en contraposición con las grandes empresas que se enfocan más a productos más estandarizados.

Sirven de tejido auxiliar a las grandes empresas. La mayor parte de las grandes empresas se valen de empresas subcontratadas menores para realizar servicios u operaciones que de estar incluidas en

el tejido de la gran corporación redundaría en un aumento de coste.

## Importancia de las Pymes

La mayor ventaja de una pyme es su capacidad de cambiar rápidamente su estructura productiva en el caso de variar las necesidades de mercado, lo cual es mucho más difícil en una gran empresa, con un importante número de empleados y grandes sumas de capital invertido. Sin embargo, el acceso a mercados tan específicos o a una cartera reducida de clientes aumenta el riesgo de quiebra de estas empresas, por lo que es importante que estas empresas amplíen su mercado o sus clientes.

- **Financiación.** Las empresas pequeñas tienen mayor dificultad en encontrar financiación a un costo y plazo adecuados debido a su mayor riesgo. Para solucionar esto se recurre a las SGR y capital riesgo.
- **Empleo.** Son empresas con mucha rigidez laboral y que tienen dificultades para encontrar mano de obra especializada. La formación previa del empleado es fundamental para estas.
- **Tecnología.** Debido al pequeño volumen de beneficios que presentan estas empresas no pueden dedicar fondos a la investigación, por lo que tienen que asociarse con universidades o con otras empresas.
- **Acceso a mercados internacionales.** El menor tamaño complica su entrada en otros mercados.

Desde las instituciones públicas se hacen esfuerzos para formar a las empresas en las culturas de otros países.

En Colombia, de acuerdo con la definición de la ley 590 de 2000 y la ley 905 de 2004, la microempresa es toda unidad de explotación económica realizada por persona natural o jurídica, en actividades empresariales, agropecuarias, industriales, comerciales o de servicio, rural o urbana con planta de personal hasta 10 trabajadores y activos de menos de 501 salarios mínimos legales mensuales vigentes. Según la ley 905 de 2004 la pequeña empresa es aquella que cuenta con una planta de personal entre 11 y 50 trabajadores o activos entre 501 y 5000 salarios mínimos legales mensuales vigentes; por último, la mediana empresa es aquella que cuenta con una planta de personal entre 51 y 200 trabajadores o activos totales entre 5001 y 30.000 salarios mínimos legales mensuales vigentes.<sup>6 7 5 8</sup>

## CARACTERIZACIÓN DE REQUERIMIENTOS QUE DEBE CUMPLIR EL SISTEMA

El sistema de alta disponibilidad propuesto debe cumplir unos requerimientos mínimos que garanticen su factible implementación en las Pymes. Estos requerimientos se han extractado después de un análisis profundo de necesidades reales de algunas Pymes y se pueden resumir en requerimientos de 1) redundancia, 2) protección y confiabilidad

**Tabla 1.** Categorización de las empresas.

Tipo de empresa	Empleados	Activos totales (en salario mínimo legal mensual vigente)
Microempresa	1-10	Menos de 501
Pequeña empresa	11-50	501-5000
Mediana empresa	51-200	5001-30.000
Gran empresa	Más de 200	Mayor que 30.000

**Fuente:** (República de Colombia, 2000).

## Requerimiento de redundancia

El sistema debe implementar mecanismos de redundancia (Guangping, y otros, 2009) que garanticen la repetición de datos o hardware de carácter crítico que se quiere asegurar ante los posibles fallos que puedan surgir por el uso continuado.

Las técnicas de redundancia han sido usadas por la industria militar y aeroespacial durante muchos años para alcanzar una alta confiabilidad (Filho, Hashimoto, & Rosa, 2008). Una base de datos replicada es un ejemplo de sistema distribuido redundante.

Cuando se tienen sistemas críticos que deben estar disponibles y funcionando 24 horas al día, 365 días al año, hay que intentar minimizar los fallos que puedan afectar el funcionamiento normal del sistema. Fallos van a ocurrir, pero existen técnicas y configuraciones que ayudan a tener sistemas redundantes (Terrasson, Briand, Basrour, & Dupe, 2009), en los que ciertas partes pueden fallar sin que esto afecte el funcionamiento del mismo.

## Requerimiento de protección y confiabilidad

El sistema debe implementar mecanismos de protección y confiabilidad que le permitan realizar los procesos en más de una estación. Estos mecanismos garantizan que si por algún motivo alguno de los sistemas dejara de funcionar o algún servicio colapsara, inmediatamente otro tendría que ocupar su lugar y realizaría las tareas del anterior. (Meng & Shao-hua, 2005).

## Requerimiento de disponibilidad

El sistema debe implementar mecanismos de alta disponibilidad (Filho, Hashimoto, & Rosa, 2008), los cuales pueden ir desde bases de datos simplemente replicadas hasta sistemas distribuidos redundantes complejos.

## Requerimiento de implementación de cluster

Las Pymes deben contar con sistemas de tipo cluster (Song, Leangsuksun, Nassar, Gottumukkala, & Scott, 2006) que les permitan escalar a nivel de datos, de aplicación y de servicios. Aparte de ello, los sistemas de tipo cluster apoyan tecnológicamente la implementación de los mecanismos de redundancia, protección, disponibilidad y confiabilidad.

El cluster se aplica a los conjuntos o conglomerados de computadores construidos mediante la utilización de componentes de hardware comunes y que se comportan como si fuesen un único computador. Los cluster de alta disponibilidad son clusters cuyo objetivo de diseño es proveer disponibilidad y confiabilidad. Estos clusters tratan de brindar la máxima disponibilidad de los servicios que ofrecen (Song, Leangsuksun, Nassar, Gottumukkala, & Scott, 2006). La confiabilidad se provee mediante software que detecta fallos y permite recuperarse frente a los mismos, mientras que en hardware se evita tener un único punto de fallos.

Los clusters son usualmente empleados para mejorar el rendimiento y la disponibilidad por encima de la que es provista por un solo computador típicamente siendo más económico que computadores individuales de rapidez y disponibilidad comparables.

## Requerimientos de replicación

El sistema para el caso de las Pymes debe soportar mecanismos de seguridad que garanticen el funcionamiento del sistema. Cuantos más componentes existan, mayor probabilidad se tiene de que algo falle. Estos problemas pueden ocurrir en el propio servidor, fallos de discos, fuentes de alimentación, tarjetas de red, etc., y en la infraestructura necesaria para que el servidor se pueda utilizar, componentes de red, acceso a internet, sistema, etc. Surge entonces el concepto de replicación que se puede utilizar para replicar datos en un servidor en espera, lo que proporciona mayor disponibilidad en caso de inactividad prevista

o imprevista del sistema. Para el caso de las Pymes, los mecanismos de replicación se utilizan para proporcionar datos en espera semiactiva si los datos requeridos en el servidor en espera son un subconjunto de los datos necesarios en el servidor principal (Zhengping, Juyang, & Prokhorov, 2008).

## SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA TECNOLÓGICA

Atendiendo a los requerimientos anteriores, PNP Manager utiliza un cluster que responde a las siguientes necesidades:

1. Alto rendimiento
2. Alta disponibilidad (Filho, Hashimoto, & Rosa, 2008)
3. Balanceo de carga
4. Escalabilidad

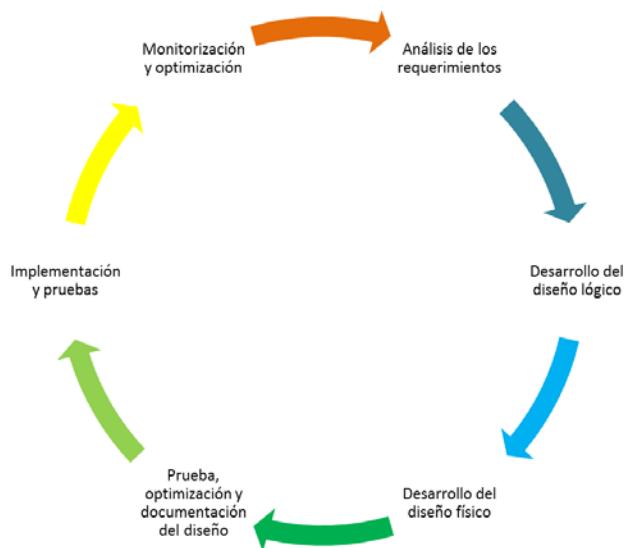
La disponibilidad de infraestructuras como las citadas anteriormente ofrecen diversos escenarios en donde pueden desplegarse aplicaciones distribuidas. Esto garantiza que implementando una solución basada en PNP Manager, se pueden implementar los requerimientos identificados en la sección anterior. Teniendo en cuenta que un requerimiento de

implementar un cluster afecta otros requerimientos como el de disponibilidad, se tiene una relación entre requerimientos. Se podría pensar entonces que al implementar PNP Manager con VMWare se logra satisfacer los requerimientos de la sección anterior. Una vez se ha seleccionado la tecnología a implementar en las Pymes se usa la metodología Top Down Network Desing (Koo & Kwong, 2005) para implementar esta solución en dichas empresas. No obstante, en la implantación de esta metodología, nuevamente se hacen revisiones de las necesidades tecnológicas de las Pymes. Esto no es un error, sino que da la posibilidad de crear un diseño más detallado de sistema de alta disponibilidad que cumpla con las expectativas de las Pymes.

## METODOLOGÍA

La implementación del sistema de alta disponibilidad basado en plataforma de virtualización para pequeñas y medianas empresas se realiza utilizando la metodología Top Down Network Desing (Koo & Kwong, 2005).

Top Down es una metodología que guía el diseño de soluciones empresariales de redes confiables, seguras y administrables; presenta la estructura que se muestra en la figura 1.



**Figura 1.** Etapas de la metodología Top Down (Koo & Kwong, 2005).

Las fases del enfoque Top-Down cubre (Koo & Kwong, 2005): 1) Análisis de los requerimientos: Qué debe hacer el sistema. Se refiere básicamente a una necesidad documentada sobre el contenido, forma o funcionalidad de un producto o servicio. 2) Desarrollo del diseño lógico: El diseño de un sistema responde a la forma en que el sistema cumplirá con los requerimientos identificados durante la fase de análisis. 3) Desarrollo del diseño físico: Hace referencia al desarrollo e instalación de software. ¿Cómo se va a hacer? Estudio de alternativas y diseño arquitectónico. 4) Prueba, optimización y documentación de diseño: Consiste en la elaboración de la “descripción formal” del sistema: manuales de usuario, manuales del sistema y manuales de procedimiento. 5) Implementación y pruebas: adquisición, creación e integración de los recursos necesarios para que el sistema funcione. 6) Monitorización y optimización: Consiste en la elaboración de cambios pertinentes para que el sistema se ejecute y funcione más rápidamente.

## DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN

Atendiendo a los objetivos de las pymes en la actualidad se requiere una infraestructura tecnológica que garantice una operación continua sobre los servicios que ofrece las pymes tanto a sus empleados como a los clientes obteniendo una mayor competitividad, eficiencia y escalabilidad que le permitan lograr un reconocimiento dentro del campo productivo como generador de soluciones innovadoras haciendo uso de las tecnologías de información (TI).

Para esto, se propone la implementación de una solución telemática en la que se desarrolle una infraestructura tecnológica que garantice el adecuado funcionamiento y dé respuesta a las solicitudes de los usuarios de la aplicación web “PNP Manager”.

PNP Manager es una aplicación web que permite obtener un modelo de usuario que define las preferencias de accesibilidad a recursos digitales basado en el estándar ISO/IEC 24751 que integra tres niveles: presentación, control y contenido.

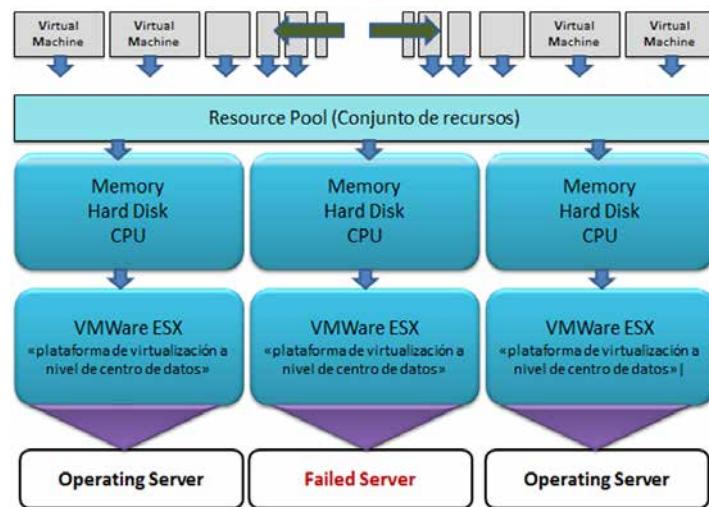
Para garantizar el alto rendimiento de PNP Manager se requiere implementar una solución telemática que asegure tolerancia a fallos, transparencia, escalabilidad y compartición de recursos, con el fin de lograr una mejor experiencia de usuario en el uso de la aplicación.

Para garantizar alta disponibilidad y rendimiento de PNP Manager se implementa un sistema distribuido compuesto por un servidor Web Apache, dos servidores de aplicación JBoss y dos servidores de bases de datos Postgresql.

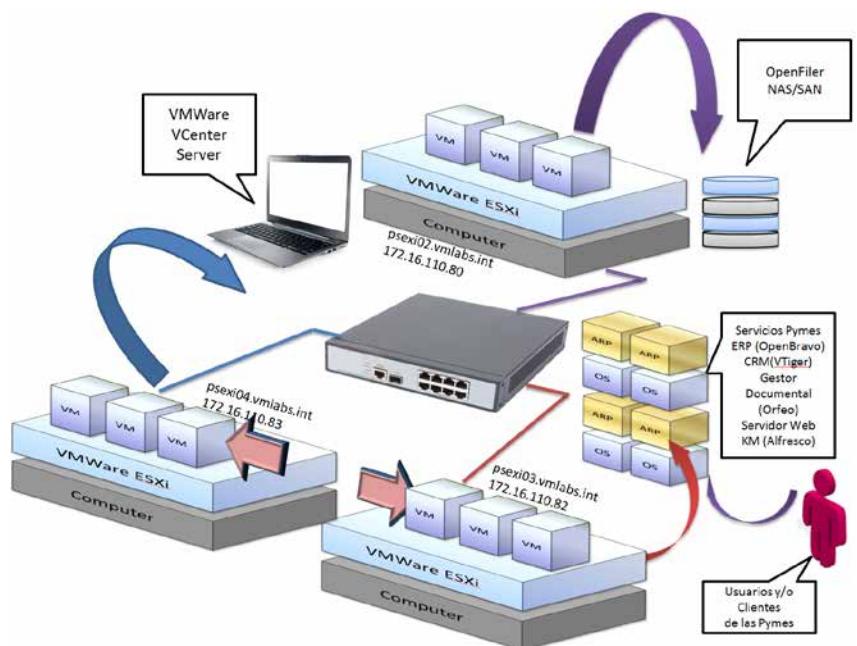
Sin embargo, para la implementación de la solución es necesario considerar las siguientes restricciones: 1) La solución se debe implementar utilizando software libre debido a que no se cuenta con recursos económicos para hacer uso de tecnologías propietarias. 2) La solución se debe implementar haciendo uso de los equipos disponibles en el grupo de investigación Metis.

Atendiendo a los requerimientos y a las restricciones establecidas, se implementa un cluster de balanceo de cargas que cumple los siguientes objetivos: mejorar el rendimiento de la aplicación, asegurar tolerancia a fallos, ser transparente, ser escalable y facilitar la compartición de recursos. Una alternativa de solución es la implementación de una solución de virtualización basada en VMWare (Philippe, 2010), la cual permite configurar sistemas operativos alternos a un sistema operativo principal que permita al sistema responder en caso de que el principal falle, tal como lo muestra la arquitectura de VMWare de la figura 2.

En un cluster de balanceo de cargas se debe identificar la forma en que las peticiones se distribuirán a través de varios servidores. Para ello, se recomienda una arquitectura de cluster de balanceo de cargas similar a la presentada en la figura 3, en donde se observa que las peticiones hechas por un browser son recibidas en primera instancia por un equipo “Balanceador de cargas” que tiene como función determinar basado en unas políticas, cuál de los nodos del cluster está disponible en ese instante para resolver las peticiones del cliente.



**Figura 2.** Arquitectura de Alta Disponibilidad VMware (Philippe, 2010).



**Figura 3.** Arquitectura para sistemas de alta disponibilidad basada en VMWare (Philippe, 2010).

Para implementar el sistema de alta disponibilidad propuesto se requiere inicialmente tres servidores y con el propósito de garantizar la escalabilidad, se concluye que el actual esquema de direccionamiento utilizado permite la asignación de los nombres y direcciones mostrados en la tabla 2.

**Tabla 2.** Asignación de nombres y direcciones a los equipos del sistema de Alta Disponibilidad.

Nombre	IP
psexi02.vmlabs.int	172.16.110.80
psexi03.vmlabs.int	172.16.110.82
psexi04.vmlabs.int	172.16.110.83

**Fuente:** Elaboración de los autores.

En la implementación de este prototipo no se utiliza servidor de dominio, por lo que se utilizará el archivo hosts de cada servidor para facilitar la resolución de nombres y direcciones IP.

Una parte importante de todo el sistema de alta disponibilidad es el almacenamiento compartido, para lo cual se utilizó un Appliance de SAN llamado Openfiler el cual presenta a través de iSCSI las unidades lógicas (LUNS) a cada uno de los HOSTS (ESXi); de esta manera las máquinas virtuales en que se encuentra cada uno de los servicios ofrecidos por las pymes están almacenadas en la SAN y no en los discos locales, lo cual permitirá que en el momento de una caída por parte de los HOSTS, el otro pueda tomar posesión de las máquinas y prenderlas de manera automática.

## RESULTADOS

La solución telemática propuesta asegura alta disponibilidad, consolidación, escalabilidad y comparición de recursos, garantizando que los servicios que ofrecen las pymes se mantengan disponibles de manera continua.

La plataforma de virtualización en la solución de alta disponibilidad brinda muchos beneficios, ya que la administración de los servicios es muy fácil y el ahorro en infraestructura se hace evidente.

Se demuestra que VMware en el mercado de virtualización es el gran líder y que sus productos ofrecen mejores beneficios que el resto de la competencia, y que aun siendo de pago tiene precios razonables para que una pyme tenga oportunidad de adquirirlos.

Se evidencia el gran potencial de herramientas OpenSource ya que en gran parte de toda la solución nos apoyamos en ellas y se observa la gran madurez de desarrollo en que se encuentran.

Un aspecto muy interesante a nivel de seguridad es que el sistema operativo ESXi es muy liviano y robusto, lo que le permite tener un alto desempeño y a su vez muy seguro; adicionalmente los demás sistemas operativos para esta solución

están basados en Linux, lo que garantiza la posibilidad de asegurarlos bajo las mejores prácticas.

## CONCLUSIONES

El estado del arte realizado para determinar las soluciones existentes sugiere que el proyecto es una idea innovadora y que su proyección social permitirá asistir a todos aquellas empresas pequeñas o medianas que deseen acceder a tecnología de gran escala a costos razonables.

La utilización de la metodología Top Down facilitó el desarrollo e implementación de este proyecto. Top Down guió la implementación del sistema de alta disponibilidad.

Con la implementación del sistema de alta disponibilidad se evidenciaron las grandes ventajas que tiene la plataforma de virtualización, y cómo esta puede apoyar soluciones de consolidación y alta disponibilidad en la infraestructura de las pymes.

El sistema de alta disponibilidad mostró el aprovechamiento de los recursos de infraestructura y generó un modelo de infraestructura que puede ser escalable en la medida de los recursos de las pymes.

Las pruebas fueron exitosas y evidenciaron paso a paso lo que sucedía con el sistema de alta disponibilidad y cómo realiza el failover, ofreciendo continuidad en los servicios en tiempos óptimos.

## FINANCIAMIENTO:

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

## REFERENCIAS

- Filho, E.; Hashimoto, G., & Rosa, P. (2008). A High Availability Firewall Model Based on SCTP Protocol. *ICNSC '08. 3rd International Conference on* (pp. 2002-2007). Systems and Networks Communications.
- Ge, G.-f. (2009). Research on the Implementation Method of Document Management in PDM System. *2009 International Conference on Signal Processing Systems* (pp. 707-710). Singapore: ICSPS.

- Guangping, X.; Yong, M.; Wenhui, M.; Gang, W.; Xiaoguang, L., & Jing, L. (2009, May). Model and Evaluation of Redundant Data Organization for High Availability in Structured Overlay Networks. *Software Engineering, Artificial Intelligences, Networking and Parallel/Distributed Computing*, 447-452.
- Kishor, T. S.; Ranjith, V.; David, T.; Swami, N., & Rick, C. (2006). Modeling High Availability. *PRDC '06. 12th Pacific Rim International Symposium on* (pp. 154-164). Dependable Computing.
- Koo, S., & Kwong, S. W. (2005). Teaching Computer Communication Networks: Top-down or Bottom-up? *FIE '05. Proceedings 35th Annual Conference* (pp. 19-22). Frontiers in Education.
- Meng, J., & Shao-hua, Y. (2005). Modeling and analysis of high-availability routing software. *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2005* (pp. 1045-1048). 2005 International Conference on.
- Philippe, G. (2010). Virtualización de sistemas de información con VMWare. *Arquitectura, proyecto, seguridad y feedbacks. Ediciones EDI. Informática Técnica*.
- República de Colombia (2000, mayo 15). Ley 590 de 2000. *Periódico de la Secretaría del Senado*, pp. 12-13.
- Song, H.; Leangsuksun, C.; Nassar, R.; Gottumukkala, N. R., & Scott, S. (2006). Availability modeling and analysis on high performance cluster computing systems. *The First International Conference* (pp. 20-22). Availability, Reliability and Security.
- Sung, H.; Choi, B.; Kim, H.; Song, J.; Han, S.; Ang, C.-W., . . . Wong, K.-S. (2007). Dynamic Clustering Model for High Service Availability. *ISADS '07. Eighth International Symposium on* (pp. 311-317). Autonomous Decentralized Systems.
- Terrasson, G.; Briand, R.; Basrour, S., & Dupe, V. (2009). A top-down approach for the design of low-power microsensor nodes for wireless sensor network. *FDL 2009. Forum on* (pp. 1-6). Specification & Design Languages, 2009.
- Weiping, Z., & Ke, D. (2006). A Top Down Approach to Estimate Network Loss Rate. *Communications and Networking in China, 2006. ChinaCom '06. First International Conference on*, (pp. 1-5). China.
- Zhengping, J.; Juyang, W., & Prokhorov, D. (2008). Where-what network 1: "Where" and "what" assist each other through top-down connections. *Development and Learning* (pp. 61-66). ICDL 2008. 7th IEEE International Conference on.





## Accesibilidad territorial: instrumento de planificación urbana y regional

## Territorial accessibility: instrument for urban and regional planning

Diego Alexander Escobar García\*, Carlos Felipe Urazán Bonells\*\*

Citation / Para citar este artículo: Escobar García, D. A., & Urazán Bonells, C. F. (2014). Accesibilidad territorial: instrumento de planificación urbana y regional. Revista *Tecnura*, Edición especial, 241-253.

**Fecha de recepción:** 29 de noviembre de 2013 / **Fecha de aceptación:** 11 de julio de 2014

### Resumen

En esta investigación se explora el estado del arte respecto a los análisis de accesibilidad territorial y el uso de los mismos como instrumentos de planificación a nivel mundial. Se muestra claramente la metodología general de aplicación y la amplia gama de posibilidades existentes como un potente instrumento de planificación territorial a nivel urbano y regional. A lo largo del artículo se abordan ejemplos que muestran cómo la aplicación de esta metodología puede potenciar la toma de decisiones respecto a un proyecto de intervención futura, o reflejar necesidades en los cambios operativos de un servicio de transporte. Este instrumento de planificación se soporta en el procesamiento y análisis geoestadístico de una gran cantidad de datos, en su gran mayoría datos de posicionamiento satelital, características operativas, topológicas y geográficas de las redes que se va a estudiar. Para ambos niveles de planificación territorial se obtienen resultados gráficos valiosos que permiten identificar el impacto de las intervenciones o de los cambios operativos sobre el territorio. Este artículo muestra las bondades de la metodología como instrumento de planificación y concluye sobre la aplicación de la misma.

### Abstract

This research explores the state of the art regarding territorial accessibility analysis and their use as planning tools worldwide. It clearly shows the general methodology of implementation, and the wide range of possibilities as a powerful tool for territorial planning in urban and regional level. Throughout the article we explore examples that show how the application of this methodology can enhance decision-making processes regarding a future intervention project, or reflecting needs for operational changes in a transport system. This planning tool is supported in processing and geostatistical analysis of a large amount of data, mostly, satellite positioning data, operational, geographical and topological characteristics of the networks studied. For both levels of territorial planning the graphic results show valuable maps in which the impact of interventions or operational changes over the territory can be identified. This article shows the advantages of this methodology as a planning tool and concludes about its implementation.

**Keywords:** accessibility, coverage analysis, GPS, impact evaluation, operability, planning tools.

\* Ingeniero civil, doctor en gestión del territorio e infraestructura del transporte. Docente investigador del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Colombia. Manizales, Colombia. Contacto: daescobarga@unal.edu.co

\*\* Ingeniero civil, doctor en gestión del territorio e infraestructura del transporte. Docente investigador del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de La Salle. Bogotá, Colombia. Contacto: caurazan@unisalle.edu.co

## INTRODUCCIÓN

Las investigaciones relacionadas con los análisis de accesibilidad toman los conceptos fundamentales de la teoría de redes fundamentándose en métodos cuantitativos y geoespaciales (geoestadística), los cuales permiten obtener resultados gráficos bastante relevantes sobre las variables en estudio.

La planificación territorial, tanto a nivel urbano como regional, durante los últimos cincuenta años ha dado considerable importancia al concepto de "accesibilidad"; no obstante, su origen se remonta a la década de 1920 cuando se aplicó en áreas tan puntuales como la teoría de la localización y el planeamiento económico regional (Batty, 2009), convirtiéndose en un elemento primario de planificación urbana, mediante el cual se establecían criterios cuantitativos para la determinación del futuro uso del suelo, con lo cual se buscaba lograr un mayor bienestar social mediante la adecuada planificación sectorial (Kibambe Lubamba, Radoux, & Defourny, 2013). Cuando se logra determinar que un territorio ofrece una deficiente accesibilidad a la comunidad, mediante la comparación de algunos estándares, es necesario el uso de herramientas investigativas que determinen los aspectos críticos de por qué dicha deficiencia, lo cual es fundamental en la adopción de políticas públicas, práctica que ha ido obteniendo cada día una mayor aceptación (Farrington & Farrington, 2005).

La accesibilidad desde el punto de vista de teoría de redes, se define como la facilidad de comunicación que existe entre asentamientos humanos o actividades, la cual puede variar según el modo de transporte que se use (Morris, Dumble, & Wiggin, 1978) (Zhu & Liu, 2004). Los modelos clásicos de accesibilidad establecen como principales variables la atracción entre los nodos que se interconectan en la red y la distancia existente entre los mismos (Curl, Nelson, & Anable, 2011); se ha encontrado que esta medida es tan representativa que se debe entender como una necesidad secundaria no percibida (Halden, 2011), la cual finalmente no se establece como un objetivo sino

como una condición indispensable de la red para permitir alcanzar eventos prioritarios para los habitantes, como, por ejemplo, educación, empleo, atención en salud, cultura, ocio, etc. Esta medida posee un valor no solo económico sino social ya que las personas y en ocasiones ciertas compañías aprecian tener adecuados niveles de accesibilidad, lo cual se traduce en una mejor calidad de vida y desarrollo económico (Gutierrez, 1998).

Desde el punto de vista urbano, se ha encontrado que una importante cantidad de países han enfocado sus esfuerzos en materia de transporte en eliminar las diferencias de clases sociales, mediante el ofrecimiento de un mayor acceso a los servicios y artículos de primera necesidad (Jones, 2011), para lo cual la reestructuración o evolución del modo de transporte público colectivo urbano, TPCU, influye en forma directa en la calidad de vida de los habitantes. Así mismo, a nivel urbano se han abordado investigaciones que involucran este concepto en campos como: acceso a parques públicos (Wang, Brown, & Mateo-Babiano, 2013), cohesión social (Schürmann, Spiekermann, & Wegener, 1997) (López, Gutiérrez, & Gómez, 2008), sostenibilidad (Cheng, Bertoliniand, & Clercq, 2007) (Vega, 2011), localización y prestación de servicios (Calcuttawala, 2006) (Park, 2012) (Higgs, Langford, & Fry, 2013), demografía (Kotavaara, Antikainenand, & Rusanen, 2011). A nivel regional, se han abordado investigaciones en campos como: análisis de cobertura (Straatemeier, 2008) y desarrollo económico (Rietveld & Nijkamp, 1993) (Vickerman, Spiekermann, & Wegener, 1999) (Mackinnon, Pirie, & Gather, 2008).

Actualmente es posible afirmar que una de las variables por las cuales la accesibilidad en un territorio es baja es una deficiencia en la oferta de infraestructura vial (Burkey, 2012); no obstante, se ha encontrado que la accesibilidad está hoy día menos relacionada con la distancia que haya entre dos sitios, relacionándose en mayor proporción con la distancia que existe a las infraestructuras o modos de transporte y de cómo estas infraestructuras acortan los tiempos de conexión (Gutiérrez & Gómez,

The impact of orbital motorways on intra-metropolitan accessibility: the case of Madrid's M-40, 1999).

En Colombia aún no se ha dado el verdadero valor que posee un análisis de accesibilidad territorial; no obstante, ya se tienen algunos ejemplos reales de aplicación de estas metodologías en nuestro país, tanto a nivel regional (Escobar, García, & Tolosa, Análisis de accesibilidad territorial a nivel regional, 2013) como urbano (Escobar & García, Territorial Accessibility Analysis as a Key Variable for Diagnosis of Urban Mobility: A case study Manizales (Colombia), 2012) (Escobar & García, Diagnóstico de la movilidad urbana de Manizales, 2012) (Escobar & García, Análisis de Priorización de proyectos viales, 2012) (Escobar & García, Análisis de accesibilidad a nodos de actividad en Manizales (Colombia), 2012). Es necesario resaltar que los análisis de accesibilidad se han abordado hasta en temas relacionados con el turismo (Kastenholz, Eusébio, Figueiredo, & Lima, 2012) y las redes sociales (Sailer, Marmot, & Penn, 2012). No obstante, esta metodología está tomando una posición importante en la evaluación de planes y proyectos de infraestructura (Gutiérrez, Condeco-Melhorado, & Martín, Using Accessibility indicators and GIS to assess spatial spillovers of transport infrastructure investments, 2012).

A continuación se repasan los aspectos metodológicos más importantes abordados en un análisis de accesibilidad y se muestran los pasos consecutivos que se llevan a cabo en el desarrollo de la metodología.

## METODOLOGÍA

La metodología del análisis de accesibilidad, en general consta de cinco etapas consecutivas, las cuales se abordan a continuación.

### Puesta a punto de la red de infraestructuras y definición de escala de análisis

En esta etapa inicial se busca actualizar completamente la red de infraestructuras que es objeto de estudio; mediante dicho procedimiento se

establece también la escala del análisis, regional o urbano. Las fotografías aéreas y los mismos datos que se obtienen mediante los equipos GPS apoyan fuertemente esta etapa de la investigación.

### Obtención de las características operativas de la red de infraestructuras

Para esta etapa se instalan equipos GPS en los diferentes modos de transporte relacionados con la red de infraestructuras, con el objeto de almacenar datos de posicionamiento satelital, que en conjunto aportan información básica sobre la operatividad de dicho modo.

### Procesamiento de datos obtenidos por los equipos GPS

El procesamiento de las bases de datos requirió la aplicación de diferentes algoritmos de cálculo, con el objeto de establecer la velocidad de operación de cada uno de los arcos que componen la red de infraestructuras. Se analizaron tres parámetros en forma consecutiva y que se relacionan entre sí:

- La velocidad del automotor cada intervalo de lectura de datos a lo largo de los i-ésimos arcos, también llamada velocidad instantánea, esta se utiliza para establecer las variaciones de la velocidad en un arco en particular entre dos puntos, esta velocidad se obtiene mediante la aplicación de la ecuación (1).

$$v_i = \frac{3.6}{t} \sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2} \quad (1)$$

Donde:  $v_i$  = velocidad en km/h;  $x_1, y_1$  = coordenadas del punto 1 en metros;  $x_2, y_2$  = coordenadas del punto 2 en metros;  $t$  = intervalo de tiempo en segundos entre dato y dato.

- La velocidad promedio de operación del i-ésimo arco, la cual se obtiene mediante la relación entre la longitud del arco y la diferencia de los

tiempos de paso entre el nodo inicial y el nodo final del mismo, aplicando la ecuación (2).

$$v_i^a = 3.6 \frac{l_a}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

Donde:  $v_i^a$  = velocidad  $i$  en el arco  $a$  (km/h);  $l_a$  = longitud del arco  $a$  en metros;  $t_1$  = hora de paso en el nodo inicial;  $t_2$  = hora de paso en el nodo final.

- La velocidad de operación para cada arco  $i$  de una determinada ruta y en un período de tiempo dado; esta se calcula mediante la aplicación de la ecuación (3) y se emplea para establecer las impedancias de la red.

$$\bar{v}_a = \frac{\sum_{i=1}^n v_i^a}{n} \quad (3)$$

Donde:  $\bar{v}_a$  = velocidad promedio de operación del arco  $a$ ;  $n$  = número de datos de velocidad registrados en el arco  $a$ , para un período de tiempo.

La velocidad media de operación del flujo que se use es una variable fundamental para el análisis de accesibilidad (Herce & Magrinya, 2002), independientemente de la escala de estudio, y de su consecución depende en gran parte la precisión y veracidad de los resultados que se obtengan.

## Cálculo de la accesibilidad media global o accesibilidad media integral

Las isócronas son aquel espacio virtual conformado por las posiciones alcanzadas por un objeto en un tiempo  $T_i$  partiendo desde un punto  $i$  en un arreglo radial, es decir, la red vial de la zona analizada. La accesibilidad media global se analiza a partir del valor de tiempo promedio de viaje ( $Tvi$ ), el cual mide el tiempo promedio de viaje desde el nodo  $i$  hasta los demás nodos de la red. Para su cálculo, se corre un algoritmo del SIG que permite calcular el menor tiempo de viaje entre un nodo específico y los demás nodos de la red, conformando una matriz unimodal

de tiempos de viaje, la cual permite calcular el vector de tiempos medios de viaje, calculado mediante la aplicación de la ecuación (4).

$$\bar{T}_{vi} = \frac{\sum_{j=1}^m t_{vi}}{(n-1)} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n ; \quad j = 1, 2, 3, \dots, m \quad (4)$$

Donde:  $Tvi$  = tiempo de viaje mínimo promedio entre el nodo  $i$  y los demás nodos de la red;  $tvi$  = tiempo de viaje mínimo entre el nodo  $i$  y los demás nodos de la red;  $n$  = número de nodos de la red.

El vector de tiempos medios de viaje obtenido se relaciona con las coordenadas geográficas (longitud y latitud), con el fin de aplicar el modelo geoestadístico de predicciones de tiempos medios de viaje en toda el área de estudio.

Ahora bien, para el cálculo de la accesibilidad media integral se debe definir con claridad el o los nodos desde los cuales se desea realizar el estudio, generándose el cálculo del vector de tiempo medio de viaje como se observó en la ecuación (4). La diferencia entre ambos tipos de accesibilidad es que la accesibilidad media global permite conocer la configuración de tiempos medios de viaje en un área en forma general, sin definir un punto o puntos geográficos con los cuales relacionar dichos tiempos medios de viaje, lo que sí ocurre en la accesibilidad media integral.

Un análisis de accesibilidad media global permite establecer impactos que producen las modificaciones a la red de infraestructuras en forma general, mientras que un análisis de accesibilidad media integral permite conocer el impacto que genera una modificación en la red de infraestructuras pero relacionada con un punto o unos puntos específicos de la red, como, por ejemplo, los nodos de actividad educativos.

## Comparación de accesibilidades y cálculo de coberturas

A partir de las curvas isócronas de accesibilidad media global o integral es posible generar cruces

de información entre las mismas e información de tipo sociodemográfico o socioeconómico, buscando conocer los valores de cobertura que se tendría por una curva de tiempo medio de viaje y su relación con variables como, por ejemplo, población, número de viviendas o simplemente área.

También es posible comparar las curvas isócronas obtenidas antes y después de una intervención infraestructural, con el fin de establecer las zonas que reportan un impacto, positivo o negativo, dada la inserción de la nueva infraestructura. El impacto es posible medirlo en términos de ahorro en tiempo medio de viaje o en términos de costos.

## EJEMPLOS A NIVEL REGIONAL

A continuación se muestran dos ejemplos de aplicación de análisis de accesibilidad a nivel regional, el primero relacionado con la ubicación del futuro Aeropuerto del Café y el segundo relacionado con un análisis geoespacial que busca definir el mejor sitio de ubicación de una estación de gas natural comprimido.

### Región Vial Centro Sur de Caldas

Dentro del proyecto “Estudios para el Desarrollo del Ordenamiento Territorial y estudios técnicos para el sistema vial de la Región Centro Sur del Departamento de Caldas” se hizo el análisis de accesibilidad media global, ofrecida por la red viaria tanto actual como futura. La región centro – sur de Caldas tiene una superficie de 1.583 km<sup>2</sup> (20,2% del territorio departamental) alberga 54.8% del total de población departamental y posee una densidad poblacional de 338 hab./km<sup>2</sup>, cubre los municipios de Manizales, Chinchiná, Villamaría, Neira y Palestina, siendo considerada la región más dinámica del departamento (Gobernación de Caldas, 2009). Para el análisis se definió un área de estudio de 3.848 km<sup>2</sup>, los cuales corresponden a una distribución radial ( $r = 35$  km) con centro en el casco urbano del municipio de

Palestina, donde está actualmente en construcción el Aeropuerto del Café.

La red vial de la Región Centro – Sur del Departamento de Caldas (575 arcos y 446 nodos) tiene una longitud total de 1.250 km, de los cuales más de 56% pertenecen a tipos de vía primaria y secundaria, de forma semejante, más de 57% de la longitud refiere velocidades de operación inferiores a 30 km/h; no obstante, la totalidad de la red primaria reporta velocidades de operación superiores a 30 km/h. Se estableció que la velocidad promedio de la red es aproximadamente 26 km/h.

Las isócronas representan los sectores que podrían ser alcanzados en un tiempo promedio de viaje determinado, desde cualquier nodo de la red. Este tiempo de desplazamiento depende de las características físicas y operativas de la vía (topografía, estado de la superficie de rodadura, categoría, velocidad de operación promedio, sitios geotécnicos problemáticos, etc.) La curva isócrona de menor tiempo obtenida fue de 80 min., y la de mayor tiempo medio de viaje fue de 180 minutos, para la situación sin intervención.

Haciendo un comparativo entre la cobertura de las curvas isócronas con y sin intervención infraestructural, se obtuvo que los porcentajes de población cubierta sufren una mínima modificación, teniendo que para el rango de curvas isócronas de tiempo menores o iguales a 95 min., el porcentaje de población cubierta es el mismo; para el rango de curvas isócronas de tiempo de entre 100 y 120 min., aumenta el porcentaje de cobertura de población 1% aproximadamente y para el rango de curvas isócronas superiores a 120 min. el porcentaje disminuye en 1%. Los anteriores resultados permiten concluir que las futuras intervenciones infraestructurales, desde el punto de vista de población cubierta por determinados tiempos de viaje, no impactarán significativamente el territorio.

No obstante, es posible obtener las curvas gradientes de accesibilidad media global, lo cual es simplemente la diferencia entre las curvas

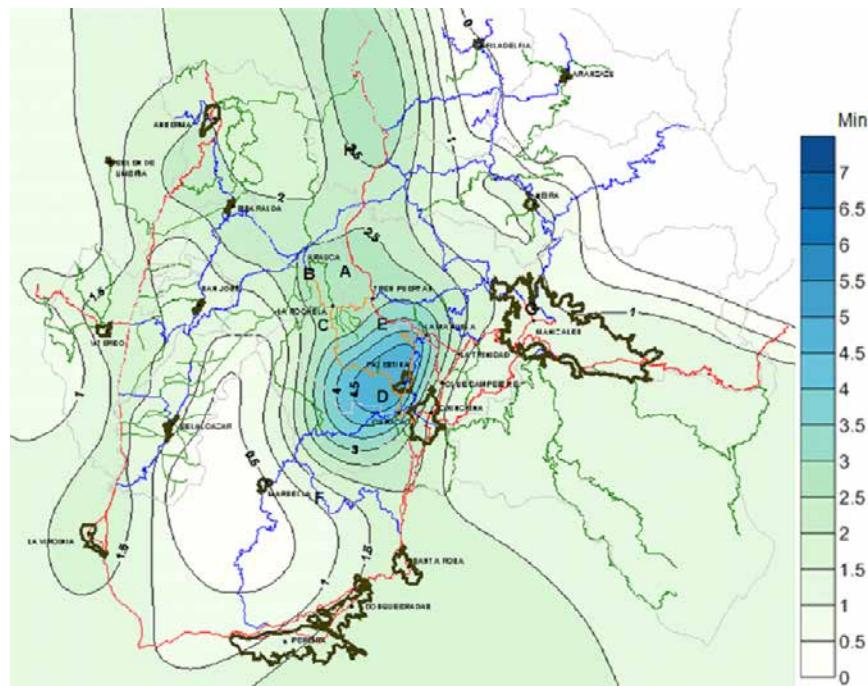
isócronas obtenidas con la red viaria actual y las obtenidas con las intervenciones infraestructurales. En la figura 1 se aprecian dichas curvas gradiante; en este caso, las isócronas representan las zonas que ganan un tiempo relativo de viaje, mostrando que estas causarán una disminución en el tiempo medio de viaje de entre 2.5 y 5 min.

Se tiene entonces que si el principal objetivo de las intervenciones viales que se realizarán es el de proveer mejoras relativas en los tiempos de desplazamiento en la región Centro Sur del Departamento de Caldas, es posible concluir que dicho objetivo se cumple, no obstante, la magnitud de dichas mejoras de tiempo no se pueden considerar sustanciales, así mismo es posible observar la necesidad latente de construir o mejorar la conexión entre la región Centro Sur y las poblaciones situadas hacia el norte del Departamento de Caldas, para garantizar una adecuada conexión de dichas áreas con el futuro Aeropuerto del Café.

## Distribución de gas natural comprimido, GNC

En este caso se analiza la accesibilidad media global que ofrece la red vial del occidente caldense y del norte de Risaralda; así mismo, se analizan las accesibilidades integrales desde las poblaciones de Manizales, Chinchiná y La Virginia, con el fin de definir cuál de las tres poblaciones es la más adecuada para establecer la estación de distribución de GNC.

El análisis se complementa con el cálculo de las matrices de costo de transporte, entre las posibles poblaciones de distribución (La Virginia, Chinchiná y Manizales) y las poblaciones a servir a lo largo de los corredores viales definidos, en las cuales se aplica el camino mínimo de conexión entre nodos, minimizando la variable costos, para cada caso y para cada tipo de vehículo estudiado. Las matrices de costos así obtenidas, a partir de datos del INVÍAS, del Plan Vial de Caldas (Gobernación de



**Figura 1.** Curvas isócronas de accesibilidad media global para el gradiente de tiempo medio de viaje entre el escenario actual y futuro.

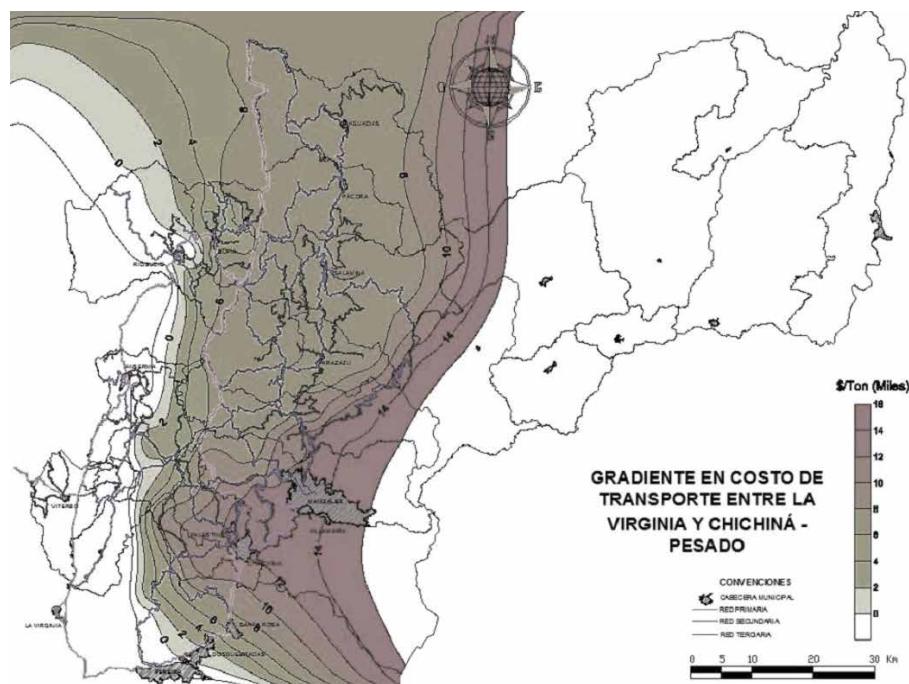
**Fuente:** Elaboración propia.

Caldas, 2009) y de la aplicación del SIG, se comparan con la matriz de costos generada por la Comisión de Regulación de Energía y Gas, CREG.

Respecto a la variable tiempo medio de viaje, desde cada uno de los posibles orígenes de distribución, se obtuvieron curvas isócronas de accesibilidad integral según la variable tiempo de viaje y según el tipo de vehículo, lo cual permitió hacer una comparación entre matrices de viaje y obtener las curvas gradiente de accesibilidad integral entre cada posible origen. Se encuentra entonces que, según la variable tiempo medio de viaje en vehículo articulado o pesado, es óptimo distribuir desde Chinchiná, ya que se cubre una mayor área del territorio a servir con menores gradientes de tiempo, al ser comparado con los otros dos orígenes. Para cada uno de los posibles orígenes de distribución, se obtuvieron curvas según la variable costo del transporte y tipo de vehículo, lo cual permitió hacer una comparación entre matrices de costo y

obtener las curvas gradiente en \$/ton entre cada par de orígenes. Fue posible establecer que desde el punto de vista de costos, el sitio más estratégico para la distribución corresponde al municipio de Chinchiná, tanto para vehículos articulados como para vehículos pesados. En la figura 2 se observa un ejemplo de las curvas obtenidas para el caso del análisis de costos.

No obstante lo anterior, conjugando las variables analizadas en términos de tiempo de viaje y costo (\$/ton) según el tipo de vehículos (pesado o articulado), se proponen dos alternativas, la primera consiste en definir dos puntos de distribución, uno situado en el municipio de Manizales que se encargue del abastecimiento de las poblaciones hacia el corredor norte mediante vehículos pesados y otro punto de distribución localizado en la ciudad de La Virginia encargado del abastecimiento de las poblaciones hacia el corredor occidente por medio de vehículos articulados; la segunda



**Figura 2.** Gradiente en costo de transporte entre La Virginia y Chinchiná. Vehículo pesado.

**Fuente:** Elaboración propia.

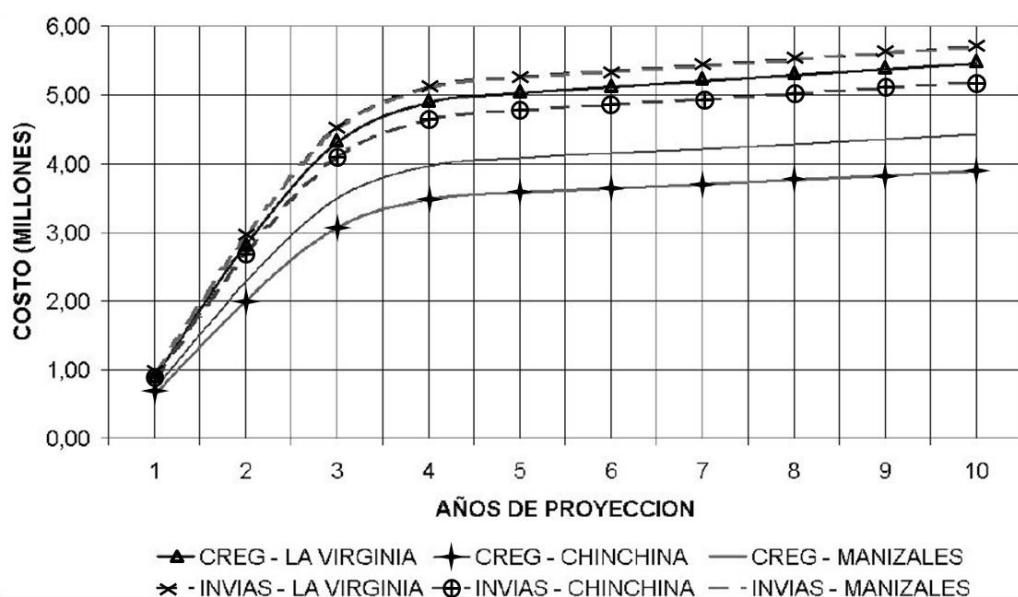
alternativa consiste en establecer una única estación de distribución en el municipio de Chinchiná, que se encargue del suministro del producto hacia los dos corredores analizados (corredor norte y corredor occidente), dadas sus condiciones de localización geográfica en la zona, así como sus características de infraestructura y conectividad.

En términos generales, las zonas más cercanas a los sitios de distribución pueden ser abastecidas mediante la programación de camiones pesados, en razón de que el gradiente de costos entre ambos tipos de vehículos es menor para distancias relativamente cortas. En la figura 3 se presentan los resultados encontrados al efectuar el análisis de costos de transporte por dos metodologías distintas, usando la matriz de costos de transporte del INVIA (Instituto Nacional de Vías–INVIA, 2009) y usando la matriz de costos del CREG (Comisión de Regulación de Energía y Gas–CREG, 2004) (Comisión de Regulación de Energía y Gas–CREG, 2005), las diferencias que presentan los resultados encontrados pueden deberse a diversos factores, como los siguientes:

- La infraestructura vial no es estática en el tiempo, siendo común que sea mayor el deterioro en el tiempo que la mejora de sus condiciones físicas, lo que guarda relación directa con los costos de operación vehicular.
- La matriz del CREG se actualiza con el IPC; sin embargo, este no es igual al incremento en la canasta del transporte, siendo generalmente esta última mayor que el IPC.
- En los últimos años han aparecido nuevas concesiones viales en el país que traen consigo la instalación de nuevos peajes, impactando también la estructura de costos.

## EJEMPLOS A NIVEL URBANO

A continuación se muestra un ejemplo de aplicación de análisis de accesibilidad a nivel urbano, acerca de la relación entre la posición geoespacial de nodos de actividad y las características operativas de la red vial, lo cual se traduce en porcentajes de cobertura de un servicio determinado.



**Figura 3.** Comparación de costos matriz CREG y matriz INVIA.

Fuente: Elaboración propia.

## Cobertura de nodos de actividad

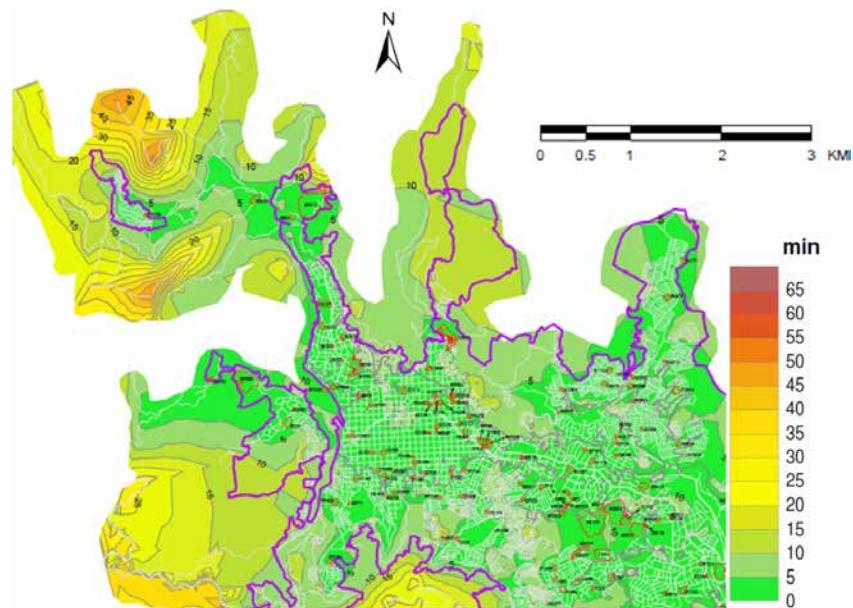
En este caso se aplica análisis de accesibilidad con el objetivo de encontrar la relación existente entre las características operativas ofrecidas por la red de transporte de la ciudad de Manizales y la ubicación geoespacial de los centros educativos. La investigación se soporta en la toma de información primaria por un período superior a un año, con equipos GPS (más de 18 millones de datos). Se calculan los tiempos de desplazamiento que deben invertirse para alcanzar dichos nodos de actividad, así como las coberturas espaciales en términos de población y área. Se logra establecer en qué sectores de la ciudad existe una deficiencia respecto a la cobertura de estos nodos de actividad o cuáles de los centros educativos refieren deficiencia en su relación con los sistemas de transporte que llegan hasta cada uno de ellos.

Manizales refiere un total de 165 nodos de actividad educativa, de los cuales tres son de Ámbito Nacional, uno de Ámbito Regional y el resto (161) de Ámbito Local; todos los nodos educativos

fueron debidamente georeferenciados en el SIG y a partir de dicha posición se hacen los cálculos de accesibilidad media integral. En la figura 4 se observan las curvas de tiempos medios óptimos e ideales de viaje que representan los tiempos que deben invertirse para alcanzar los nodos de actividad educativos. Se observa un amplio sector de la ciudad cubierto por la curva de 5 minutos, indicando que desde dichos sectores es posible alcanzar un nodo de actividad de tipo educativo si se invierte dicha cantidad de tiempo.

Los análisis de cobertura de las variables área, población y número de viviendas permiten establecer conclusiones respecto a los sectores en donde se concentra dicha actividad con relación a las características operativas de la red vial.

Se obtuvo que 55% del área, 72% de la población y 72% del número de viviendas de la ciudad podrían alcanzar un nodo de actividad educativo si se invierten hasta 5 minutos de tiempo medio de viaje. Se concluye que dadas las características de operación de la red vial actual, este tipo de



**Figura 4.** Tiempos medios óptimos e ideales de viaje hacia los nodos de actividad educativo.

**Fuente:** Elaboración propia.

actividad refiere 100% de cobertura de las tres variables analizadas si se invierten aproximadamente hasta 15 minutos de tiempo medio de viaje.

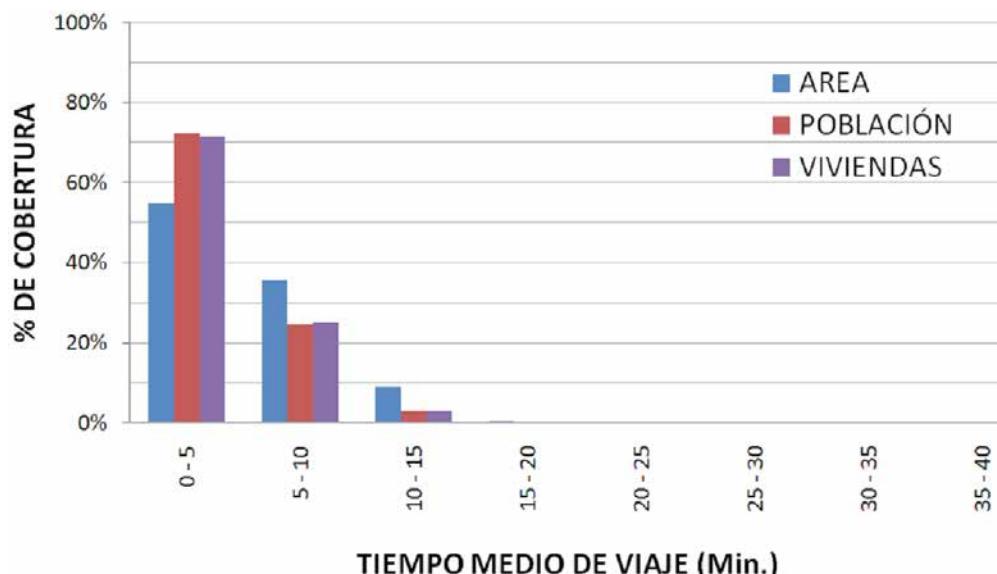
En la figura 5 se observa la distribución de los porcentajes de cobertura de las variables área, población y número de viviendas cubiertas, según el tiempo medio de viaje. Se observa que la mayor cobertura se logra para tiempos medios óptimos e ideales de viaje de entre 0 y 5 minutos, con valores de cobertura superiores a 50%.

Se hizo un análisis del porcentaje acumulado cubierto para la variable población según los diferentes nodos de actividad estudiados en el marco del Plan de Movilidad de Manizales, cuyos resultados se observan en la figura 6. De modo general, se tiene que si una curva se encuentra más hacia la derecha del origen y tiene una menor pendiente, indica que para alcanzar dicho nodo de actividad se debe invertir un mayor tiempo medio de viaje. Se obtuvo, por ejemplo, que los nodos de actividad funerarias y recreativas son los que refieren curvas acumuladas de menor pendiente y desplazadas más hacia la

derecha del origen, lo cual permite concluir que tienen una distribución geoespacial en la ciudad más desfavorable si se compara con los otros nodos de actividad; por su parte, para los nodos de actividad educativos y parques, las curvas acumuladas tienen una mayor pendiente y se ubican más cerca del origen, lo cual permite concluir que son dichos nodos de actividad los que presentan una mejor distribución geoespacial en la ciudad.

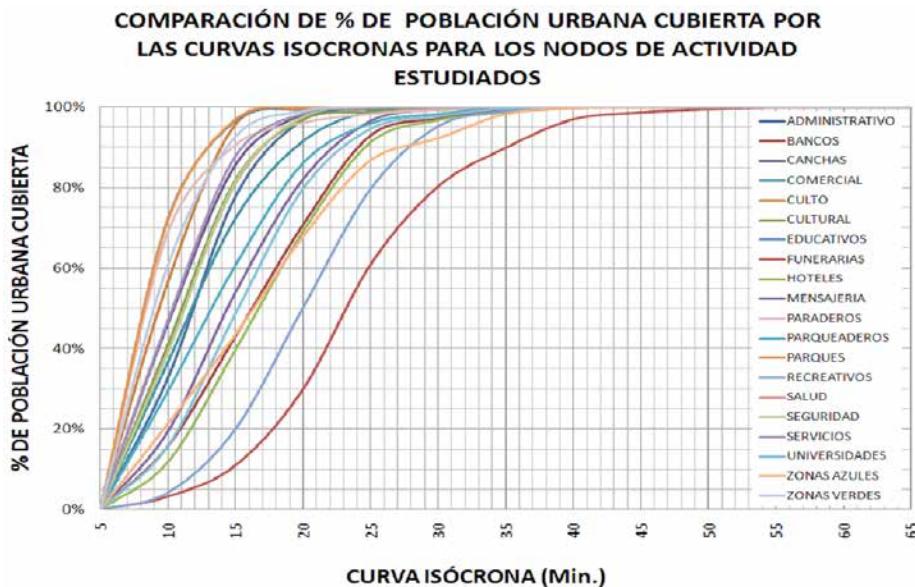
## CONCLUSIONES

La metodología que abarca un análisis de accesibilidad, sea a escala regional o a escala urbana, se configura como una potente herramienta de diagnóstico y planificación de redes de movilidad, ya que permite conocer la relación existente entre las características operativas de un conjunto de modos de transporte y la infraestructura de movilidad por la cual discurren dichos modos. Con la aplicación de esta metodología se pueden alcanzar múltiples objetivos, entre los cuales se encuentran los siguientes:



**Figura 5.** Distribuciones de los porcentajes de área, población y número de viviendas cubiertas por las curvas de tiempos medios óptimos e ideales de viaje para los nodos de actividad de tipo educativo.

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 6.** Comparación del porcentaje acumulado de población cubierta por las curvas isócronas para los diferentes nodos de actividad estudiados en la ciudad de Manizales.

**Fuente:** Elaboración propia.

- Actualización minuciosa de la red de infraestructuras del transporte del territorio objeto de análisis, lo cual demuestra las inmensas ventajas de combinar el uso de Sistemas de Información Geográfica con tecnologías de monitorización satelital (GPS).
- Diagnóstico de la localización geoespacial de los diferentes nodos de actividad que se encuentran en un territorio y análisis de su cobertura sociodemográfica.
- Estudio de la relación entre ubicación geoespacial de nodos de actividad y tiempos de respuesta de variables asociadas a dichos nodos; por ejemplo, nodos relacionados con seguridad o salud en una urbe, lo cual permitiría identificar las áreas del territorio que reportan ausencia de cierto nodo de actividad.
- Identificación de zonas del territorio que refieren un mayor desequilibrio en los tiempos medios de viaje o en el ofrecimiento de cierto servicio.
- Determinación del impacto generado por la construcción de cualquier tipo de infraestructura del transporte, o evaluación del impacto dados

los cambios propuestos en la gestión de un modo de transporte en particular.

En Colombia la metodología ha sido poco aplicada; no obstante, se demuestra con estas investigaciones que esta se convierte en un apoyo técnico que muestra un panorama general de las condiciones de accesibilidad de un territorio que en cualquier momento puede soportar la toma de decisiones respecto a modificaciones que se desee hacer a la red de infraestructuras del transporte o a los sistemas de transporte como tal. La metodología permite establecer con claridad en qué áreas de un territorio específico se deben aunar esfuerzos para ofrecer una mejor accesibilidad y aumentar la calidad de vida de los pobladores, todo esto relacionado con los diferentes usos del suelo y nodos de actividad presentes en un área determinada.

## FINANCIAMIENTO

Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales

## REFERENCIAS

- Batty, M. (2009). Accessibility: in search of a unified theory. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 36(2), 191-194.
- Burkey, M. (2012). Decomposing geographic accessibility into component parts: methods and an application to hospitals. *Annals of Regional science Forthcoming*, 48(3), 783-800.
- Calcuttawala, Z. (2006). Landscapes of Information and Consumption: A Location Analysis of Public Libraries in Calcutta (E. Garten, D. Williams, & J. Nyce, eds.) *Advances in Library Administration and Organization*, 24, 319-388.
- Cheng, J.; Bertoliniand, L., & Clercq, F. (2007). Measuring Sustainable Accessibility. *Transportation research Board: Journal of the Transportation Research Board*, 2017, 16-25.
- Comisión de Regulación de Energía y Gas, CREG (2004). *Compresión y transporte de gas natural comprimido–GNC. Propuesta regulatoria para consulta–048*. Bogotá.
- Comisión de Regulación de Energía y Gas, CREG (2005). Resolución 008 de 2005. Bogotá.
- Curl, A.; Nelson, J., & Anable, J. (2011). Does Accessibility Planning address what matters? *Transportation Business & Management*, 2, 3-11.
- Escobar, D., & García, F. (2012). *Análisis de accesibilidad a nodos de actividad en Manizales (Colombia)*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales. Facultad de Ingeniería y Arquitectura.
- Escobar, D., & García, F. (2012). *Análisis de Priorización de proyectos viales*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales. Facultad de Ingeniería y Arquitectura.
- Escobar, D., & García, F. (2012). *Diagnóstico de la movilidad urbana de Manizales*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales.
- Escobar, D., & García, F. (2012). Territorial Accessibility Analysis as a Key Variable for Diagnosis of Urban Mobility: A case study. Manizales (Colombia). *Procedia–Social and Behavioral Sciences*, *Transporte Research Arena*. 48, pp. 1385-1394. Athens: Elsevier.
- Escobar, D.; García, F., & Tolosa, R. (2013). *Análisis de accesibilidad territorial a nivel regional*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales. Facultad de Ingeniería y Arquitectura.
- Farrington, J., & Farrington, C. (2005). Rural accessibility, social inclusion and social justice: towards conceptualisation. *Journal of Transport Geography*, 13(1), 1-12.
- Gobernación de Caldas (2009). *Plan Vial de Caldas 2008–2017*. Manizales.
- Gutiérrez, J. (1998). Redes, espacio y tiempo. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense* (18), 65-86.
- Gutiérrez, J., & Gómez, G. (1999). The impact of orbital motorways on intra-metropolitan accessibility: the case of Madrid's M-40. *Journal of Transport Geography*, 7(1), 1-15.
- Gutiérrez, J., & Gómez, G. (1999). The impact of orbital motorways on intra-metropolitan accessibility: the case of Madrid's M-40. *Journal of Transport Geography*, 7(1), 1-15.
- Gutiérrez, J.; Condeco-Melhorado, A., & Martin, J. (2012). Using Accessibility indicators and GIS to assess spatial spillovers of transport infrastructure investment. *Journal of Transport Geography*, 18(1), 141-152.
- Gutiérrez, J.; Condeco-Melhorado, A., & Martin, J. (2012). Using Accessibility indicators and GIS to assess spatial spillovers of transport infrastructure investments. *Journal of Transport Geography*, 18(1), 141-152.
- Halden, D. (2011). The use and abuse of accessibility measures in UK passenger transport planning. *Transportation Business & Management*, 2, 12-19.
- Herce, M., & Magrinya, F. (2002). *La Ingeniería en la evolución de la Urbanística*. Barcelona: Ediciones UPC.
- Higgs, G.; Langford, M., & Fry, R. (2013). Investigating variations in the provision of digital services in public libraries using network-based GIS models. *Library & Information Science Research*, 35(1), 24-32.

- Instituto Nacional de Vías, INVIA (2009). *Volúmenes de Tránsito 2007*. Bogotá.
- Jones, P. (2011). Developing and applying interactive visual tools to enhance stakeholder engagement in accessibility planning for mobility disadvantaged groups. *Transportation Business & Management*, 2, 29-41.
- Kastenholz, E.; Eusébio, C.; Figueiredo, E., & Lima, J. (2012). *Accessibility as a competitive advantage of a tourist destination—the case of Lousã*. (K. Hyde, C. Ryan, & A. Woodside, eds.) Emerald Publishers.
- Kibambe, Lubamba, J.P.; Radoux, J., & Defourny, P. (2013). Multimodal accessibility modeling from coarse transportation networks in Africa. *International Journal of Geographical Information Science*, 27(5), 1005-1022.
- Kotavaara, O.; Antikainenand, H., & Rusanen, J. (2011). Population change and accessibility by road and rail networks: GIS and statistical approach to Finland 1970–2007. *Journal of Transport Geography*, 19(4), 926-935.
- López, E.; Gutiérrez, J., & Gómez, G. (2008). Measuring regional cohesion effects of large-scale transport infrastructure investments: an accessibility approach. *European Planning Studies*, 16(2), 277-301.
- Mackinnon, D.; Pirie, G., & Gather, M. (2008). Transport and economic development. (R. Knowles, J. Shaw, & I. Docherty, eds.) *Transport Geographies: Mobilities, Flows and Spaces*, 10-28.
- Morris, J.; Dumble, P., & Wigan, M. (1978). Accessibility indicators for transport planning. *Transportation Research*, A, 13(A), 91-109.
- Park, S. J. (2012). Measuring public library accessibility: A case study using GIS. *Library & Information Science Research*, 34(1), 13-21.
- Rietveld, P., & Nijkamp, P. (1993). Transport and regional development. En J. Polak, & A. Heertje (ed.), *European Conference of Ministers of Transport (ECMT)*. Oxford: Blackwell Publishers.
- Sailer, K.; Marmot, A., & Penn, A. (2012). Spatial Configuration, Organisational Change and Academic Networks. *Conference for 'Applied Social Network Analysis*. Zurich.
- Schürmann, C.; Spiekermann, K., & Wegener, M. (1997). Accessibility indicators. *Berichte aus dem Institut für Raumplanung*, 39.
- Straatemeier, T. (2008). How to plan for regional accessibility? *Transport Policy*, 15, 127-137.
- Vega, A. (2011). A multi-modal approach to sustainable accessibility in Galway. *Regional Insights*, 2(2), 15-17.
- Vickerman, R.; Spiekermann, K., & Wegener, M. (1999). Accessibility and economic development in Europe. *Regional Studies*, 33(1), 1-15.
- Wang, D.; Brown, G., & Mateo-Babiano, D. (2013). Beyond proximity: an integrated model of accessibility for public parks. *Asian Journal of Social Sciences & Humanities*, 2(3), 486-498.
- Zhu, X., & Liu, S. (2004). Analysis of the impact of the MRT system on accessibility in Singapore using an integrated GIS tool. *Journal of Transport Geography*, 12(2), 89-101.





## La formación lingüística en la educación superior

## Linguistic education in higher education

Nevis Balanta Castilla\*, David Navarro Mejía\*\*

Citation / Para citar este artículo: Navarro Mejía, D., & Balanta Castilla, N. (2014). La formación lingüística en la educación superior. Revista *Tecnura*, Edición especial, 255-262.

**Fecha de recepción:** 29 de noviembre de 2013 / **Fecha de aceptación:** 11 de julio de 2014

### Resumen

En este artículo se hace un recorrido por los enfoques y el estado de la educación lingüística en la educación superior en Colombia, pero al mismo tiempo su situación se articula a cómo se le ha dispuesto en la educación básica y media, en el entendido que muchas de las carencias de la educación lingüística en las universidades no tienen explicación razonable sin una aproximación de lo que sucede en esos otros niveles del sistema educativo. Por eso se acude también al registro de algunas cifras de las pruebas PISA que indican las carencias evidentes en el aprendizaje del lenguaje. Se presenta, además, un recuento breve de lo que de algún modo es el mapa de los micro-currículos que se ofrecen en este campo en las universidades, y se ponen en contexto las competencias que en el área de lenguaje se evalúan en las pruebas Saber Pro. Finalmente, se propone una ruta de lo que tendría que revisarse para mejorar la educación lingüística en la educación superior en Colombia.

**Palabras clave:** educación lingüística, competencias en lenguaje, enfoques de la educación lingüística, micro-curriculum, alfabetización académica, escritura a través del currículo.

### Abstract

This article presents an overview of the approaches and the state of linguistic education in higher education in Colombia, but at the same time, its situation is articulated to how it has been arranged in primary and secondary education, based on the idea that most of the scarcities in linguistic education at universities do not have a reasonable explanation without an approach to what is occurring in those other levels of the educational system. Thus, recurring to the register of some statistics from PISA tests indicate the evident scarcities in language learning. Moreover, a brief outlook of what is some way the map of the micro-curriculum offered in this field at universities is presented, and a contextualization of the competences that in the area of language are evaluated in Saber Pro tests. Finally, there is a proposal for a path of what should be reviewed to improve the linguistic education in higher education in Colombia.

**Keywords:** Linguistic education, language competences, linguistic education approaches, micro-curriculum, academic literacy, writing across the curriculum.

\* Licenciada en lingüística y literatura, magíster en investigación social interdisciplinaria. Docente, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: [nbalantac@udistrital.edu.co](mailto:nbalantac@udistrital.edu.co)

\*\* Licenciado en lingüística y literatura; magíster en investigación social interdisciplinaria; doctor en ciencias de la información. Docente, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: [sec-tecnologica@udistrital.edu.co](mailto:sec-tecnologica@udistrital.edu.co)

## PRESENTACIÓN

Cada vez es más reiterativa la preocupación por el bajo desempeño y rendimiento académicos de los estudiantes de educación superior respecto de sus competencias en el uso del lenguaje. Se entiende que si bien estas hacen parte de las llamadas competencias generales -en apariencia nada importantes para la vida profesional-, de todos modos al tener noticias por las pruebas PISA que evalúan la capacidad lingüística de los estudiantes y su incidencia en la lectura y la escritura, no sale bien librado nuestro sistema educativo, ni el país como el más aventajado en el uso de nuestra lengua. Este aspecto es tanto más sensible por cuanto las carencias en el uso del lenguaje tienen también implicaciones directas en el aprendizaje de las ciencias y otros campos que son clave para el desarrollo humano. De aquí, el sentido que cobra repensar cómo se está haciendo la educación lingüística en la educación superior.

## ENFOQUE DE ENSEÑANZA DEL LENGUAJE EN LA EDUCACIÓN BÁSICA Y MEDIA

En 1998 el MEN publicó lo que llamó los lineamientos para la enseñanza y construcción de los currículos del lenguaje. Ese enfoque del MEN hacía énfasis en la semántica comunicativa. Dicha visión se concretó en un documento que el MEN construyó en 1998 y con arreglo al cual, la enseñanza del lenguaje buscaba desarrollar no solo competencias lingüísticas sino también competencias comunicativas que se creía eran más apropiadas y abarcadoras y estaban más a tono con los nuevos estudios del lenguaje que señalaban la importancia de su dimensión social y cultural.

Se criticaba en aquel momento el énfasis demasiado normativo de la enseñanza de la lengua porque presumiblemente los "currículos en el campo de lenguaje estaban marcados por un grammaticalismo y memorización de las normativas lingüísticas" (1998, p. 46). Gran parte de la transformación que hubo entonces se hizo como impugnación a ese

enfoque y se asumió, bajo la concepción de dos autores y visiones: la una, propugnada por Dell Hymes, quien planteó la noción de competencia comunicativa como aquella que trasciende el uso del lenguaje en actos comunicativos particulares que se dan en el entorno socio-cultural (*ibid.*), y la otra, la del maestro colombiano Luis Ángel Baena, que sosténía que la función central del lenguaje era la significación, además de la comunicación. (p. 47).

Se entiende que esa perspectiva supuso una visión interdisciplinaria, que integraba la semiótica, la sociología y la historia como disciplinas cuyos saberes le reportaban explicaciones valiosas a los fenómenos del lenguaje y ampliaba su repertorio de códigos con el que se produce la comunicación.

Desde luego, aquella concepción del lenguaje sigue teniendo una vigencia notable en la actualidad, pero no contamos con un diagnóstico detallado de cuáles han sido sus resultados. Un indicador de eso concebimos que son las pruebas PISA que evalúan conocimientos y competencias en lectura. Sobre este particular, estudios recientes han señalado las carencias que siguen teniendo nuestros estudiantes en el área de lenguaje.

Según el texto *Separados y desiguales* datos del año 2012 indican que Colombia, entre 65 países que participaron de la prueba, ocupó el puesto 57 en lenguaje, lo cual se traduce en un bajo desempeño con respecto a los países de la OCDE. De acuerdo con esos resultados, Colombia en el área de lectura obtuvo en promedio 403 puntos, por detrás de países de la región como Chile (441), Costa Rica (441), México (424), Uruguay (411) y Brasil (410). Solo superó a Argentina (394) y Perú (384) (pp. 29-30).

Por otra parte, el documento del MEN *Estándares básicos de competencias* establece los siguientes factores por trabajar en la educación lingüística: producción textual, comprensión e interpretación textual, literatura, medios de comunicación y otros sistemas simbólicos y ética de la comunicación. Define a su vez unos propósitos (enunciado identificador) y unos subprocesos que se deben cumplir.

De lo que allí se plantea, lo relevante es que los micro-currículos y los manuales escolares en

educación básica y media disponen la producción textual de esquemas y resúmenes; la lectura de fábulas, cuentos y leyendas, la identificación de formatos de los medios, entre otros aspectos en el nivel de primaria; la producción textual de mapas mentales, reseñas y ensayo, la identificación de géneros periodísticos de los medios y entre programas de la televisión, y de los géneros literarios, así como obras literarias latinoamericanas, acercándose a ellas desde una posición crítica y argumentada. Se dispone también defender las posiciones contrarias y el respeto por la diversidad de nuestra cultura.

Este repertorio de temas y propósitos para la educación básica y media tiene como novedad el interés por acercarse a otros sistemas de lenguaje, pero siempre queda la duda de si la organización y cantidad de información que se prescribe es la adecuada para desarrollar las competencias de los estudiantes en lenguaje. En esa organización curricular se dispone, además, un enfoque que ahora añade lo discursivo como un eje central de los conocimientos y competencias que debe aprender el estudiante.

Es pertinente, por tanto, revisar qué tanto viene influyendo en las carencias que se señalan en las competencias lingüísticas de los estudiantes un sinnúmero de estándares que se suponen básicos, pero que quizá han trascendido ese límite y serían más propios de grados superiores a la educación media y básica. Pero de aquí también la justificación de por qué se ha abordado lo que en materia de lenguaje se ha dispuesto en los niveles que preceden a la educación superior.

## BREVE DIAGNÓSTICO DEL ESTADO GENERAL DE LAS DENOMINACIONES DE LOS MICRO-CURRÍCULOS Y LO QUE SE ENSEÑA EN LENGUAJE EN LA EDUCACIÓN SUPERIOR

Según una consulta que se realizó desde los portales y contactos directos con las universidades en el año 2011, estas conciben espacios académicos cuyas denominaciones son distintas, pero su contenido apunta a la enseñanza de saberes básicos

y avanzados de la lengua con el fin de desarrollar las competencias comunicativas de los estudiantes. Las denominaciones encontradas fueron: Taller de lenguaje, Producción y comprensión de textos, Habilidades comunicativas, Técnicas de la comunicación oral y escrita, Comunicación oral y escrita, Español, Competencias comunicativas, Lecto-escritura, Gramática, Comunicación y lenguaje, Taller de comprensión y producción de textos, Taller de lectura, Taller de escritura, Retórica y expresión, Propedéutica de textos, Escritura de ensayos de opinión, Análisis de textos, Artes narrativas, Argumentación, Análisis de argumentos, etc.

Aquella investigación se hizo teniendo como punto de partida la información que se consiguió a través de la red REDLES, constituida por universidades de Bogotá que trabajan en los procesos de lectura y escritura de sus estudiantes. Hasta 2011 dicha red la constituyan treinta universidades.

Se analizó en esa investigación la estructura de los micro-curriculós de las universidades seleccionadas y se estableció una ficha de evaluación que agrupó su contenido en dos campos: un componente pedagógico (que incluía el propósito general, el enfoque pedagógico y la justificación) y un componente didáctico (que incluía estrategias didácticas, objetivos generales y específicos, estructuración del programa y componentes, formas de evaluación y recursos).

Las conclusiones preliminares de ese estudio arrojó lo siguiente:

- Que los micro-curriculós más que *formalizarlo*, *debe* atender a que cada elemento de su constitución responda en verdad a los criterios formales que las universidades han definido para que sus contenidos, metodología, estrategias y recursos sean coherentes con esas condiciones institucionales.
- Los contenidos temáticos del micro-curriculó deben ser ordenados de acuerdo con los propósitos: leer y escribir mejor, aspectos formales de la lengua española, géneros discursivos de la academia, o la suma coherente de todas estas partes.

Esa decisión no parece clara en los actuales contenidos de los micro-currículos de las asignaturas relacionadas con la lengua española.

- Los textos escolares deben ser diseñados en un lenguaje claro, es decir, deben ser ejemplo de lo que pretenden que los estudiantes aprendan; visualmente atractivos; conceptual y teóricamente pertinentes y moderadamente realistas en sus propósitos.
- Si la lengua castellana no solo sirve para comunicarnos, sino también para acceder a los saberes y conocimientos que nos han legado la ciencia y la cultura, los géneros discursivos en los que se despliegan esos saberes deben tener prioridad en la producción de textos que elaboran los estudiantes, pero eso exige una renovada importancia de las materias relacionadas con el lenguaje en los currículos de las carreras universitarias, en virtud de que los espacios y la intensidad horaria con que se dispone hoy día en las universidades no está acorde con las exigencias que hoy impone la enseñanza de la lengua española o sus materias similares o afines en los programas universitarios.

## VISIÓN DE LA ENSEÑANZA EN LENGUAJE EN LA EDUCACIÓN SUPERIOR

Ahora bien, cuando se dispone la enseñanza de nuestra lengua, no siempre existe la claridad sobre su papel en el marco de otros lenguajes que también están presentes en el universo de la comunicación. Por lo regular, su enseñanza supone que en un lugar del proceso educativo se debe abordar el significado de las imágenes y del lenguaje literario, cifrado en el uso de metáforas, hipérboles y otros tropos. Las imágenes suponen además, en su descripción y explicación, signos como los símbolos, los iconos y otros no verbales.

La enseñanza se centra pues, en la pluralidad de lenguajes. La lengua castellana se centra aún en la oración y se amplía a las partes y la estructura de un texto. No obstante, se ha subestimado el entrenamiento en la función que cumplen las palabras bajo

el supuesto de su conocimiento previo, o de su carácter gramatical que no es muy apreciado. Por eso se ha orientado también la educación lingüística al estudio de géneros discursivos. Pero determinar sus estructuras textuales requiere conocer las unidades lingüísticas desde el punto de vista formal y eso se ve obstaculizado por cierta visión que desdeña la gramática de la lengua, o esconde detrás de su saber su evolución y transformación. Esa gramática, en cambio, se acepta sin críticas cuando se la enseña en lenguas extranjeras. Dicha visión supone además una connotación negativa de su significado.

Por eso es evidente que para determinar el currículo de la enseñanza en lenguaje, es clave lo que en otras culturas han definido en este campo. Y cómo la ubican dentro de las competencias que debe registrar un profesional. En este sentido, a la educación lingüística la han inscrito en lo que se llaman competencias generales, ámbito en cuyos límites se encontraría el lugar de ubicación del lenguaje en los programas que se ofertan en la educación superior, salvo la que educa para la enseñanza y profesión en dicho campo.

La American Association of Colleges and Schools, AACU 2007, por ejemplo, identifica para cualquier profesión lo que denomina competencias intelectuales y prácticas, para lo que incluye en ellas la comunicación oral y escrita (Toro, pp. 236-240). La importancia y creciente interés en estas competencias, según Toro, es que los desafíos laborales y humanos de los profesionales de hoy no están necesariamente en las capacidades profesionales, sino que “una buena parte se asocia a lo que llamamos competencias generales”, más cuando estudios efectuados en muchas empresas de Estados Unidos reportan que los empleadores adjudican mucha importancia a muchas de las competencias generales que hasta hace poco se desdeñaban. (p. 243). Explica también este fenómeno el hecho de que en años recientes una persona pueda tener durante su vida profesional muchos empleos y lo más probable es que en su recorrido haya una “mutación profesional” que hace que las competencias generales, en determinados

momentos, sean las que dan una ventaja para mantenerse activo en su campo, o para migrar a otro campo profesional.

Por otra parte, un elemento adicional para el diseño de la educación lingüística es que Colombia no puede pretender un diseño curricular que ignore la procedencia social de los estudiantes, pues la evidente desigualdad en la educación constituye uno de los factores que obstaculizan la oferta de una educación lingüística de calidad. Quizá sea necesario, por tanto, una educación diferencial en lenguaje que promueva mayor igualdad en el aprendizaje de los estudiantes de educación superior.

## ¿QUÉ EDUCACIÓN LINGÜÍSTICA PARA LA EDUCACIÓN SUPERIOR?

En este contexto el interrogante resulta apenas oportuno. Entre las respuestas probables, habría que decir que en los últimos años se ha despertado una preferencia en la enseñanza de la lengua por la construcción discursiva de la misma otorgando un papel especial a su nivel pragmático. En este sentido, vale señalar que se ha determinado la enseñanza de algunos géneros que se creen válidos en este ciclo, como el resumen, el informe y, sobre todo, el ensayo. Desafortunadamente la experiencia muestra que su aprendizaje está atravesado por una serie de factores de carácter cognitivo y social que no siempre tienen la atención debida en los currículos que se deciden para enseñar.

Por otra parte, las Pruebas Saber Pro tienen una orientación que no siempre es coherente con lo que se enseña en la educación superior, dado el sentido de algunos de los micro-currículos. El caso es que en las mencionadas pruebas las competencias comunicativas que se evalúan, apuntan a:

- Identificar elementos locales del texto.
- Identificar las partes que constituyen el todo de un texto.
- Identificar las estrategias discursivas de un texto.

Todo ello, según el propósito de las pruebas, debe arrojar la realización de una lectura crítica de los textos.

En el caso de la producción textual, en las pruebas “En los escritos se evalúa la manera como se estructuran, organizan y comunican las ideas; en particular, se tienen en cuenta la organización en la exposición de las ideas, la conexión entre los distintos tópicos, la selección del lenguaje más apropiado, el dominio de las reglas de la expresión escrita y la claridad con que se perfila la relación con el lector. Se analiza panorámicamente si las estrategias del autor fueron adecuadas para su propósito, independientemente de si el texto tiene un formato determinado”.

Vale decir entonces que las pruebas centran la evaluación en la estructura y organización del texto, sin atender lo que llamamos los géneros discursivos, aspecto que quizás sea una limitación, si se tiene en cuenta que el repertorio de temas que se abordan en los micro-currículos de las universidades están inclinados a la enseñanza desde una perspectiva discursiva como recordábamos atrás, requisito que se considera indispensable para el desempeño profesional.

En cualquier caso, un repertorio de esos micro-currículos registra estudios en lo siguiente: gramática, argumentación, géneros como el resumen, informe, la reseña y el ensayo; retórica, narrativa, habilidades comunicativas y análisis de textos, entre otros. Es decir, hay en general los contenidos que se suponen adecuados para la educación lingüística en educación superior. Pero es también evidente que su diseño y organización curricular están atravesados por una mezcla de los enfoques estructuralista y comunicativo de enseñanza de la lengua. Si bien de modo formal se prescriben enfoques que parecen privilegiar el uso concreto, real y experiencial de la lengua escrita y oral, también lo es que el diseño de muchos micro-currículos no revela con claridad esa apuesta, sino que más bien representa una mezcla de los enfoques mencionados, más el énfasis que se ha puesto en los discursos del lenguaje, en virtud del

aporte de los últimos años en campos como la lingüística textual, el análisis del discurso, la semiótica y otros afines.

Pero más allá de esas prescripciones de la enseñanza del lenguaje, las dificultades que se reportan de los estudiantes para aprender y ser más competitivos en este campo parecen estribar en otros ámbitos que de pronto no han ocupado la atención de las universidades. Al respecto, son pertinentes los estudios que se han realizado para determinar problemas de enseñanza con los estudiantes universitarios. Algunos de esos estudios, por ejemplo, señalan que en el trabajo de corrección y evaluación de los textos “en todos los casos, el profesor no hace consciente que el texto que finalmente evalúa no es el del alumno, sino el que resulta de su lectura (y en gran parte reescritura) del texto del alumno” (Desinano, 2009, p. 50).

Para esta autora, según su planteamiento, lo que usualmente en la enseñanza se asume como error o fallo de los alumnos no es más que el desconocimiento de cómo se inscriben ellos como sujeto del lenguaje, lo cual marca una diferencia en la manera de concebir y entender el uso del lenguaje. Y remarca, como se ve en muchos en la actualidad, que se hace demasiado énfasis en el estudio del sistema de la lengua, o del lenguaje, cuando es fundamental la interacción de donde se deriva su uso y realización.

En esta misma dirección apuntan los estudios que intentan destacar el ámbito de uso del lenguaje desde la experiencia escritural de los propios docentes, como muestra Finocchio en la experiencia argentina de los profesores (2009) quien, al reflexionar sobre la escritura escolar, impugna la crítica sobre las carencias que se atribuyen a los estudiantes, a partir de poner en escena la escritura de los propios docentes en su condición no ya de enseñantes, sino de escritores, y establece que es importante esa escritura para develar las propias dificultades de los estudiantes.

En la perspectiva de crear un mapa más adecuado para la enseñanza del lenguaje en la educación superior, vale registrar también los usos de

los libros de texto, pues se presenta una especie de interés renovado con la edición de libros focalizados para este segmento de la educación, lo cual revela que se ha entendido que su enseñanza también exige textos de referencia para este nivel. A modo de muestra, cabe mencionar algunos que han circulado en los últimos años por los ámbitos universitarios, como *Escribir, leer y aprender en la Universidad*, de Paula Carlino, *Cómo se escribe*, de María Teresa Serafini y *La Cocina de la escritura* y *Afilar el lapicero*, de Daniel Cassany, textos que se cree han sido referencia para la enseñanza en la educación superior y cuya selección ya marca un indicio del enfoque cómo se está concibiendo la enseñanza del lenguaje.

Estos textos, independientemente de su pertinencia, hay que notar que proponen una enseñanza del lenguaje que se sustenta en el concepto de alfabetización académica, que se entiende como el campo de saberes y prácticas que se agrupan en las actividades encaminadas al aprendizaje en la universidad, a partir de aprender la producción y análisis de textos y las nociones y estrategias que se requieren para acceder a la cultura discursiva de las disciplinas y profesiones en las que se educan los estudiantes universitarios. Y proceso mediante el cual se adquiere carta de ciudadanía intelectual en una comunidad científica y profesional (Flórez y Gutiérrez, 2011, p. 17).

A nuestro modo de ver, sin embargo, la alfabetización académica se promueve más del *deber ser* que de lo que es la escritura en acción y en concreto, con todos sus fallos, de los estudiantes. Es decir, prefigura más un modo de ver la práctica de la escritura, que lo que es realmente el universo de la escritura para el estudiante cuando se le requiere el uso del lenguaje para esta actividad. Por eso es pertinente señalar que la defensa y promoción del concepto de *alfabetización* o de *escritura académica*, como una suerte de diferenciar la enseñanza del lenguaje en la educación superior, debe someterse a evaluación y examen previos, como una opción de enfoque en la educación superior.

Es claro que Carlino y Cassany se han apoyado en este enfoque de escritura en la universidad, o escritura en las disciplinas y profesiones en las que se forman los estudiantes de educación superior, en experiencias, programas y enfoques que se iniciaron desde la década de 1980 en Estados Unidos, Europa y Australia, casos particulares de la Universidad de Pensylvania, la Universidad de Princeton, la Universidad de Columbia, la Universidad de Brown y la Universidad Pompeu de Fabra. Habría que agregar que dicho enfoque se complementa y apoya en el concepto de *Escritura a través de currículo* (por sus iniciales en inglés: Writing Across the Curriculum, WAC), cuyo surgimiento e impulso se hizo desde las Universidades de California y de Berkeley, concepto que a su vez tiene su antecedente en otro acuñado a finales de la década de 1960 en Gran Bretaña: el lenguaje a través del currículum (LAC). Es una visión desde la cual la enseñanza del lenguaje no se asume como enseñar contenidos, sino como una práctica que se ejerce y enseña desde todas las disciplinas y saberes, incluidos por supuesto, los de la propia lengua en que se escribe.

Por otra parte, en Colombia la Universidad Nacional de Colombia en 2001 creó e impulsó el programa UNESCRIBE que pretendía situar la escritura como centro de sus preocupaciones académicas en el interés de habilitar a los estudiantes como practicantes competentes de las comunidades discursivas de las disciplinas en las que se educan. Y en 2006 se creó la red REDLEES que agrupa varias instituciones de educación superior que promueven la lectura y escritura con un énfasis renovado, amén de que universidades como la Javeriana, la Sergio Arboleda y la Institución Universitaria Iberoamericana han promovido desde instancias distintas programas y proyectos que buscan situar la enseñanza del lenguaje en el centro de sus preocupaciones académicas. Es decir, hay un nuevo contexto que es preciso evaluar para reorientar la educación lingüística en la educación superior colombiana.

Cabe, de igual modo, la pertinencia del debate sobre el uso de las llamadas nuevas tecnologías

asociadas con la información y las comunicaciones, que han supuesto la construcción de una lengua y un lenguaje que acude a códigos propios que según la visión que se tenga, dificultan a veces la enseñanza del español, pero también la pueden favorecer. Y no es desdeñable, tampoco, el interés por aprender una lengua extranjera que ha supuesto quizá, paradójicamente, un desinterés y desmotivación por el dominio y conocimiento competente de la lengua materna.

Y también sería válida una revisión de las estrategias didácticas y pedagógicas, más cuando el uso de internet y las nuevas tecnologías vienen revaluando el rol de los docentes en la educación superior y en todo el sistema. Por eso, no es irrelevante revisar, con detalle, qué tanto conocimiento se debe ofrecer en los micro-currículos, pues siempre se ha tenido la tentación de incorporar el mayor cúmulo de saberes, cuando es evidente que el fortalecimiento de competencias en el uso del lenguaje no debe terminar en esos espacios académicos.

Dicho lo anterior, se considera que la educación lingüística en educación superior debe revisar sus currículos para poner el acento en los siguientes tópicos:

- Énfasis en el enfoque discursivo de la lengua.
- Evaluar y adecuar de manera diferencial, la pertinencia de incorporar el enfoque que se deriva del concepto *Escritura a través del Currículo*.
- Revalidación de las estrategias didácticas en una construcción permanente.
- Revisión de los currículos actuales de los programas de lengua castellana y humanidades.
- Disponer una estrategia para minimizar las dificultades de aprendizaje del lenguaje con una organización más lógica y pertinente de los micro-currículos.
- Regresar a los programas de filología española y lingüística como campos de saber profesional específico que atraviesan la educación lingüística en la educación superior.

Desde luego, no pretendemos que el estado y las perspectivas que ofrecemos en la educación lingüística que analizamos constituyan el cuadro completo de su examen y situación actual. Pero aspiramos que avive nuevamente el interés por la enseñanza en este campo para contribuir a mejorar la calidad de la educación superior.

## FINANCIAMIENTO

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

## REFERENCIAS

- AA.VV. Lengua castellana. Lineamientos curriculares–áreas obligatorias y fundamentales. Bogotá, MEN.
- Desinano, Norma B. (2009). *Los alumnos universitarios y la escritura académica. Análisis de un problema*. Rosario: Homo Sapiens.
- Finocchio, Ana María (2009). *Conquistar la escritura. Saberes y prácticas escolares*. Buenos Aires: Paidós.

Flórez, Rita y Gutiérrez, Maureen (2011). *Alfabetización académica: una propuesta para la formación de docentes universitarios*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

García, Mauricio et al. (2013). *Separados y desiguales. Educación y Clases Sociales en Colombia*. Bogotá: DeJusticia.

Jurado, Fabio (1999). Investigación, escritura y educación. El lenguaje y la literatura en la transformación de la escuela. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia / Plaza & Janés.

Toro, José Rafael (2014). En: *Educación Superior en Colombia*. Roa Varelo, Alberto y Pacheco, Iván (eds.) Barranquilla, Universidad del Norte/ Center for International Higher Education. <http://www.tecnar.edu.co/sites/default/files/pdfs/M%C3%B3dulo-COMUNICACION%20ESCRITA.pdf>. Recuperado 25 de julio de 2014. ([http://www.mineducacion.gov.co/1621/articles-116042\\_archivo\\_pdf1.pdf](http://www.mineducacion.gov.co/1621/articles-116042_archivo_pdf1.pdf): recuperado julio 25 de 2014. pp. 29-45).



## La responsabilidad por culpa patronal en el accidente o enfermedad laboral

### Employer's liability on work accidents or disease

Guillermo Eduardo Alfonso Gutiérrez

Citation / Para citar este artículo: Alfonso Gutierrez, G. E. (2014). La responsabilidad por culpa patronal en el accidente o enfermedad laboral. Revista *Tecnura*, Edición especial, 263-266

**Fecha de recepción:** 29 de noviembre de 2013 / **Fecha de aceptación:** 11 de julio de 2014

#### RESUMEN

El propósito principal de este artículo es abordar los diferentes aspectos de la responsabilidad que conlleva la actividad laboral para el empleador, específicamente aquellos derivados de la generación del accidente de trabajo o la enfermedad laboral, como son los concernientes a la responsabilidad laboral, la cual normalmente es transferida a terceros mediante el pago de aportes (ARL), la administrativa, penal y civil derivada de estos hechos, centrándose en lo concerniente a la responsabilidad civil derivada de la culpa patronal, esto es, de la culpa subjetiva derivada de la acción u omisión patronal que conlleva la generación del accidente de trabajo o la enfermedad laboral, verificando los aspectos generadores de la responsabilidad, así como las consecuencias legales y económicas que se puedan derivar de esta.

**Palabras clave:** accidente de trabajo, enfermedad laboral, actividad riesgosa, responsabilidad objetiva y subjetiva, dolo, culpa patronal, daño, perjuicios, indemnización.

#### ABSTRACT

The main purpose of this article is to address the different aspects on the liability that the employer's activity entails, specifically those related to the work accident or disease generation. Some of these responsibilities are usually transferred to a third party by means of contributions payment, destined to organizations of administrative, penal and civil nature. The analysis will be focused on civil responsibility derivative of employers fault, this is, subjective fault derivative of employer action or omission that brings the work accident or disease generation, verifying the aspects generating the liability, as well as the legal and economic consequences that can arise from this.

**Keywords:** work accident, work disease, risky activity, objective and subjective liability, misconduct, employer's fault, harm, damage, compensation.

\* Abogado Administrativo - laboral e Higiene y Salud Ocupacional, magíster Investigación Social, miembro Comité Nacional de Salud Ocupacional. Contacto: [galfonsog@udistrital.edu.co](mailto:galfonsog@udistrital.edu.co)

## INTRODUCCIÓN

La realización de una actividad productiva es esencial para el desarrollo físico y la salud mental de una persona, no obstante son muchas los factores que condicionan la realización de la tarea, tanto físicos (estructurales) como psicosociales, y aunque es innegable su aporte para el desarrollo del ser humano, es también el principal agente causal de múltiples molestias y enfermedades (Daza, 2010).

Es responsabilidad del empleador “proporcionar y mantener ambientes y condiciones de trabajo saludables y proteger la salud de los trabajadores de cualquier daño que se produzca por causa o con ocasión del trabajo” (Tafur, 2008), pero es también responsabilidad de los trabajadores seguir los procesos según lo estipulado por la organización y desarrollar sus tareas con base en la capacitación otorgada por la empresa contratante.

No obstante, cuando por alguna razón ocurre un accidente de trabajo o se le diagnostica a un trabajador una patología considerada como de origen laboral, a pesar de encontrarse este afiliado a una entidad Administradora de Riesgos Laborales, debe determinarse si el empleador no brindó al trabajador las garantías mínimas requeridas para llevar a cabo su actividad laboral de manera segura, y por tanto puede señalarse como “culpable” del fenómeno adverso evidenciado en el trabajador, con lo cual deberá “responder” frente al daño causado al trabajador.

En el desarrollo del escrito se presentarán la evolución del concepto, impacto en el manejo que se da a las eventualidades en salud que se presentan en los trabajadores consideradas como resultado de la mala gestión de sus empleadores y aplicación de la norma a la cotidianidad de los trabajadores, con el objetivo de brindar un panorama general acerca de la responsabilidad por culpa patronal en accidentes de trabajo y enfermedad laboral (ATEL) en la población trabajadora.

## DEFINICIÓN DEL CONCEPTO

Es indispensable comenzar por el desglose del concepto tratado, para llegar a comprender de manera concreta lo concerniente a responsabilidad por culpa patronal en el accidente de trabajo y la enfermedad laboral.

En primera instancia se debe entender que existe como tal la figura de contratante y contratista cuando se establece un contrato de trabajo que se define como el “acuerdo entre dos partes, empresario y trabajador, por el que este último queda obligado a prestar un servicio por cuenta y bajo la dirección y organización del empresario, a cambio de una retribución” (Aguilar, 2010). Pero aunque en la definición solo se especifica el contexto laboral, aquí también es fuente de responsabilidad la relación contratante y contratista, en el entendido que esta puede conllevar en el trato subordinante la figura de un contrato realidad, al tenor de lo expresado en el artículo 53 de la Constitución Política de Colombia, respecto de la primacía de la realidad sobre las formas en el contrato laboral, con lo que queda fijado el compromiso generado para el trabajador, pero debe entenderse que el empleador también asume un compromiso con este, ello sin contar que en la definición de accidente laboral esta obligación también se extiende al contratante en una relación de contrato civil de prestación de servicios, el cual consiste en desarrollar un Sistema de Gestión de Salud y Seguridad en el Trabajo, anteriormente denominado programa de salud ocupacional cuyo objeto es “anticipar, reconocer, evaluar y controlar los riesgos que puedan afectar la seguridad y la salud en el trabajo.” (Ministerio De Trabajo De Colombia, 2014), como se encuentra claramente especificado en el artículo cuarto del Decreto 1443 de 2014.

En la formulación de esta resolución se pone en evidencia la responsabilidad que tiene el contratante de poner a disposición de las personas que se encuentran bajo su subordinación laboral, los mecanismos, herramientas y procesos necesarios para que la tarea realizada no represente daño a

nivel físico, mental o moral y que por el contrario, fomente los factores protectores de la salud en la vida del sujeto. Sin embargo, no puede obviarse la realidad de mundo laboral, puesto que existen múltiples factores de riesgo con potencialidad de generar daño a las personas, incluso en algunas ocasiones la tarea en sí misma es una actividad que puede clasificarse como peligrosa.

Cuando uno de estos factores de riesgo ocasiona eventualidades negativas en la salud del trabajador y surge un accidente de trabajo que se considera como “todo suceso repentino que sobrevenga por causa o con ocasión del trabajo, y que produzca en el trabajador una lesión orgánica, una perturbación funcional o psiquiátrica, una invalidez o la muerte. Es también accidente de trabajo aquel que se produce durante la ejecución de órdenes del empleador, o contratante durante la ejecución de una labor bajo su autoridad, aún fuera del lugar y horas de trabajo. Igualmente se considera accidente de trabajo el que se produzca durante el traslado de los trabajadores o contratistas desde su residencia a los lugares de trabajo o viceversa, cuando el transporte lo suministre el empleador. También se considerará como accidente de trabajo el ocurrido durante el ejercicio de la función sindical aunque el trabajador se encuentre en permiso sindical siempre que el accidente se produzca en cumplimiento de dicha función. De igual forma se considera accidente de trabajo el que se produzca por la ejecución de actividades recreativas, deportivas o culturales, cuando se actúe por cuenta o en representación del empleador o de la empresa usuaria cuando se trate de trabajadores de empresas de servicios temporales que se encuentren en misión.” (Congreso De La República De Colombia, 2012) o se diagnostica una enfermedad laboral la cual “Es la contraída como resultado de la exposición a factores de riesgo inherentes a la actividad laboral o del medio en el que el trabajador se ha visto obligado a trabajar. El Gobierno Nacional determinará, en forma periódica, las enfermedades que se consideran como laborales y en los casos en que una enfermedad no figure en la tabla de enfermedades

laborales, pero se demuestre la relación de causalidad con los factores de riesgo ocupacional será reconocida como enfermedad laboral, conforme lo establecido en las normas legales vigentes.” (Congreso De La República De Colombia, 2012), en principio en el ámbito laboral, teniendo en cuenta que en nuestra legislación en materia de responsabilidad laboral estos criterios obedecen al concepto de responsabilidad objetiva o responsabilidad profesional, tarifada y delegada por el empleador en un tercero “Administradoras de Riesgos Laborales (ARL)”, son estos los inicialmente llamados a responder por el daño laboral resultado de una de estas contingencias; sin embargo, se debe identificar no para la determinación en sí del accidente de trabajo o para la enfermedad laboral, si hay un nexo que involucre al patrón como responsable de la generación de estos, sea por exceso o defecto en las acciones suscitadas que hayan ocasionado deterioro en la salud del trabajador, con lo cual se determinara la responsabilidad por culpa patronal por la que deba responder frente al daño causado en la persona del trabajador.

Pero, ¿qué puede denominarse responsabilidad? Si se analiza el término simplemente, sin correlacionarlo con la situación específica, se refiere al hecho de asumir las consecuencias de los actos llevados a cabo, reconocer que las actividades efectuadas generan implicaciones en la vida de otras personas y en el ambiente en que se desenvuelven. Abordando el tema de las organizaciones se entiende que la empresa debe tomar en cuenta que sus actividades afectan, positiva o negativamente, la calidad de vida de sus empleados y de las comunidades en las que realiza sus operaciones. Recientemente se ha convertido en una nueva forma de gestión y de hacer negocios, en la cual la empresa se ocupa de que sus operaciones sean sustentables en lo económico, lo social y lo ambiental, reconociendo los intereses de los distintos grupos con los que se relaciona y buscando la preservación del medio ambiente y la sustentabilidad de las generaciones futuras. Es una visión de negocios que integra el respeto por las personas, los

valores éticos, la comunidad y el medio ambiente con la gestión misma de la empresa, independientemente de los productos o servicios que esta ofrece, del sector al que pertenece, de su tamaño o nacionalidad (Cajiga, 2008).

Llegando de esta manera deductiva al tema de discusión que ataña el actual escrito, la responsabilidad por culpa patronal en el accidente de trabajo y enfermedad laboral en el trabajador, se define esta como la comprobación del nexo de culpa del empleador en la ocurrencia de ATEL (Congreso De La República De Colombia, 2011).

Retomando la totalidad de los conceptos desde el inicio de este acápite, se resumiría que el empleador, debido a la relación contractual que establece con una persona y la obligatoriedad que posterior a la creación de este nexo le demanda ofrecer al trabajador un ambiente propicio para el desarrollo de las actividades laborales en forma segura, conlleva que la aparición de consecuencias adversas en la salud del trabajador con causa u ocasión del trabajo, deben ser investigadas y establecerse si existe culpabilidad o no por parte del patrono en dicho fenómeno. De ser demostrado el nexo de culpa por parte de este último, implica el deber de responder tanto a nivel personal como organizacional por la impertinencia de sus acciones sea por defecto o exceso, generándole el compromiso de resarcir al empleado los perjuicios causados según establece la ley.

## **NORMATIVIDAD EN LA DETERMINACIÓN DE RESPONSABILIDAD POR CULPA PATRONAL EN ATEL**

El empleador adquiere unos compromisos legales concretos con el trabajador, posteriormente al establecimiento del contrato laboral. En lo relacionado con la seguridad y salud en el trabajo pueden mencionarse los respectivos a la afiliación obligatoria al sistema general de riesgos laborales (SGRL) (Ministerio Del Trabajo y Seguridad Social, 1994), desarrollo obligatorio de un sistema de gestión de

seguridad y salud en el trabajo (SGSST) formulado en el Decreto 1443 de 2014, que remplazó el antiguo Programa de Salud Ocupacional determinado en la resolución 1016 de 1989, la prevención del accidente de trabajo y la enfermedad laboral expresados en los artículos 3 y 4 de la ley 1562 de 2012 (Congreso De La República De Colombia, 2012) y lo promulgado en el artículo 11 de la Decisión 584 Instrumento Andino de Seguridad y Salud en el Trabajo, "En todo lugar de trabajo se deberán tomar medidas tendientes a disminuir los riesgos laborales. Estas medidas deberán basarse, para el logro de este objetivo, en directrices sobre sistemas de gestión de la seguridad y salud en el trabajo y su entorno como responsabilidad social y empresarial" (Consejo Andino De Naciones, 2004).

De esta normatividad surge la responsabilidad del empleador con el trabajador a diferentes niveles: responsabilidad laboral, responsabilidad civil, responsabilidad penal y responsabilidad administrativa (Tafur, 2008), responsabilidades estas que tienen sus propias características, así:

### **Responsabilidad laboral**

Surge del contrato de trabajo.

- Responsabilidad delegada del empleador a una ARL, mediante el pago de la cotización mensual.
- El monto de la indemnización es tarificado.
- El beneficio del trabajador y/o su familia como consecuencia del ATEL se ve representado mediante prestaciones económicas y asistenciales, subsidio, indemnización, pensión y pensión de sobrevivientes.
- El origen de la invalidez por ATEL y su apelación lo determina en su orden: la EPS, Fondos de Pensiones, las ARL, la Junta Regional de Calificación de Invalidez o la Junta Nacional de Calificación de invalidez.
- La prescripción de las prestaciones es de tres años.
- No existe el caso fortuito o fuerza mayor que exonere la responsabilidad de la ARL en el accidente ni la culpa grave de la víctima, por ser esta de responsabilidad objetiva.
- No importa que el vínculo laboral termine.

- El pago de las cotizaciones cubre también a contratistas de actividades consideradas peligrosas a cargo del contratante.
- Los trabajadores independientes pueden asegurarse pagando el monto de la cotización exigida para el tipo de riesgo al que estén expuestos.

## Responsabilidad civil

Surge de la relación contractual, al tenor de lo determinado en el art. 216 del Código Sustantivo de Trabajo, "Cuando exista culpa suficiente comprobada del {empleador} en la ocurrencia del accidente de trabajo o de la enfermedad profesional, está obligado a la indemnización total y ordinaria por perjuicios pero del monto de ella debe descontarse el valor de las prestaciones en dinero pagadas en razón de las normas consagradas en este Capítulo". (Congreso De La República De Colombia, 2011) Corresponde a la responsabilidad Aquiliana o responsabilidad civil puramente dicha. En el caso de que el empleador sea el Estado surge de lo determinado en el artículo 90 de la Constitución Política: "El Estado responderá patrimonialmente por los daños antijurídicos que le sean imputables, causados por la acción o la omisión de las autoridades públicas. En el evento de ser condenado el Estado a la reparación patrimonial de uno de tales daños, que haya sido consecuencia de la conducta dolosa o gravemente culposa de un agente suyo, aquél deberá repetir contra éste". (Asamblea Nacional Constituyente, 1991). Y en el artículo 140 del Código Contencioso Administrativo.

- Responsabilidad asumida directamente por el empleador, con posibilidad de repetición cuando es entidad estatal, de acuerdo a lo determinado en el artículo 142 del Código Contencioso Administrativo.
- El monto de los daños no se encuentra tarifado, este depende de los perjuicios causados al trabajador o a sus beneficiarios.
- Los perjuicios o daños causados al trabajador corresponden a materiales, morales, fisiológicos y los correspondientes al daño de relación.

- El daño o perjuicio causado se "pretende" remediar mediante el pago pecuniario (salarios mínimos legales mensuales vigentes : moral).
- El proceso de demanda y apelación en su orden se realiza ante la justicia laboral ordinaria.
- El empleador puede eximirse de su responsabilidad demostrando culpa exclusiva de la víctima, caso fortuito o fuerza mayor ajena al empleador y su actividad.
- Prescribe a los tres años la acción.
- No puede descontar lo que le da la ARL.

## Responsabilidad penal

Surge del titular del delito causado al afectado (personalizado).

- Responsabilidad asumida por el causante del hecho punible (empleador, especialista en salud ocupacional, miembros de la Junta de calificación de invalidez, funcionario de la ARL o trabajador).
- La responsabilidad aquí se genera por culpa, por dolo o preterintención en el ATEL, con lo cual se debe determinar los postulados de tipicidad, daño al bien jurídico tutelado y culpabilidad que corresponden a un delito.
- El proceso penal se cumple ante el juez penal correspondiente, mediante el sistema oral acusatorio que se maneja en la jurisdicción penal colombiana, como ente acusador actúa la Fiscalía General de la Nación.
- La clase de delitos que pueden surgir de la responsabilidad penal en el ATEL: delitos contra la vida, delitos contra la fe pública, delitos contra la administración pública.

## Responsabilidad administrativa

Surge de la función legal de vigilancia y control en Salud Ocupacional, que corresponde en materia laboral al Ministerio de Trabajo y en materia de imposición de multas a la Superintendencia Bancaria.

- Se impone multa que es asumida por el empleador por no afiliación a riesgos y no cumplir normas en Salud Ocupacional, de 500 salarios mínimos mensuales, por reporte extemporáneo del ATEL de 200 salarios mínimos mensuales, por ocultar información que altere el índice de lesiones incapacitantes ILI hasta 1.000 salarios mínimos, por ocultar o falsificar información sobre accidente mortal hasta 1.000 salarios mínimos legales.
- La sanción o multa a favor del fondo de Riesgos Profesionales.
- Existen multas para el empleador y las ARL.
- Se imponen además de las multas, cierres temporales o permanentes de la empresa por hechos graves que puedan poner en peligro a los trabajadores.
- La competencia para vigilar y controlar la administración del sistema de prevención de las ARL es del Ministerio de la Protección Social. La de la prestación de servicios de salud es de Supersalud.
- Por dilatar el pago de prestaciones económicas corresponde a la Superfinanciera el cobro de las multas.

La responsabilidad por culpa patronal en los accidentes de trabajo o en las enfermedades de origen laboral corresponde al concepto de responsabilidad contractual y/o extracontractual determinada en el Código Civil colombiano, en los artículos 2341 y siguientes, que corresponde al concepto romano de culpa aquiliana, en donde se determina “El que ha cometido un delito o culpa, que ha inferido daño a otro, es obligado a la indemnización, sin perjuicio de la pena principal que la ley imponga por la culpa o el delito cometido” (Tafur, G., 2012), y de aquí se deriva que esta responsabilidad corresponde a la imputación subjetiva, ya que de allí se deriva un factor de atribución, porque se refiere al análisis de la conducta del sujeto reclamado, determinando si cabe alguno de los factores de atribución a la conducta del sujeto frente al hecho, esto es, la relación de la acción u omisión

como hecho generador con el sujeto, con el fin de configurar los elementos de la responsabilidad civil como son: los sujetos, el hecho generador, la posibilidad de imputar (factor de atribución), el nexo causal y el daño; así las cosas, la responsabilidad puede ser de tipo “Dolosa - La conducta es dolosa cuando el agente conoce el hecho punible y quiere su realización, lo mismo cuando la acepta previéndola al menos como posible”, por “Culpa - La conducta es culposa cuando el agente realiza el hecho punible por falta de previsión del resultado previsible o cuando habiéndolo previsto, confió en poder evitarlo” o por “Preterintención–La conducta es preterintencional cuando su resultado, siendo previsible, excede la intención del agente.” (Congreso De La República De Colombia, 1999).

En el caso del empleador generalmente incurre en culpa patronal, por lo que para la determinación de esta se debe tener en cuenta los factores generadores de la culpa, los cuales se generan por:

- **Negligencia**, Es el descuido u omisión, la falta de cuidado o interés al desempeñar una obligación (Real Academia De La Lengua Española, 2013), es cuando no cumple con las normas o leyes en Salud Ocupacional, no se toman las medidas preventivas (mantenimientos preventivos y correctivos en equipos, no se proporcionan elementos de protección adecuados y la no capacitación del trabajador).
- **Imprudencia**, corresponde a aquella falta de juicio, sensatez y cuidado que una persona demuestra en sus acciones (Real Academia De La Lengua Española, 2013) porque se obra mal, sin cautela y sin prever los resultados o consecuencias de una acción.
- **Impericia**, es la ineptitud o incapacidad técnica para ejercer una profesión o un oficio, por ignorancia (Real Academia De La Lengua Española, 2013), error e inhabilidad, entendiéndose esta como falta de destreza para hacer las cosas.
- **Violación de los reglamentos y/o normas**, cuando se ignoran o violan los reglamentos o normas de salud ocupacional.

La responsabilidad por culpa patronal en el ATEL debe ser probada por el empleado afectado, aunque en la enfermedad laboral hay unos lineamientos determinados. El solo incumplimiento del antes llamado programa de salud ocupacional, o como se denomina actualmente en la ley 1562 de 2012, Sistema de Gestión en Salud y Seguridad en el Trabajo, hacen culpable al empleador de los eventos que causen alteraciones en la salud del trabajador dentro del cumplimiento de sus tareas laborales.

## **Pago de indemnización total y ordinaria por perjuicios en ATEL**

El pago de indemnizaciones está normado en el Código Sustantivo del Trabajo, Art. 216, en el cual se afirma que "Cuando exista culpa suficiente comprobada del patrono en la ocurrencia del accidente de trabajo o en la enfermedad laboral, está obligado a la indemnización total y ordinaria por perjuicios, (...) (Congreso De La República, 2011)."

A continuación se expone lo que significa la indemnización total y ordinaria de perjuicios:

"Esta responsabilidad contractual nace de la existencia del contrato de trabajo por el incumplimiento del deber de protección y seguridad que tiene el empleador con su trabajador, los cuales, a su vez, le demandan tomar las medidas adecuadas, atendiendo las condiciones generales y especiales del trabajo, tendientes a evitar que aquél sufra menoscabo de su salud o integridad a causa de los riesgos del trabajo" (Sentencia Ref. 22656, 2005). Es de aclarar aquí que la Corte Suprema de Justicia ha determinado que cuando el empleador desarrolla actividades consideradas como peligrosas, esta responsabilidad es subjetiva, toda vez que el ejecutor se hace responsable y debe resarcir el daño causado, sin que se requiera prueba de la culpa, no en virtud propia de una presunción, sino porque esta no es necesaria para probar la existencia de la realidad; con esto la Corte determinó que a pesar de haber actividades ejecutadas sin intención de causar daño, ni ocultas o torcidas, e incluso sin culpa, el solo carácter de

riesgo que conlleva la actividad lo obliga a resarcir los daños causados; es así como señala que nace de la "presunción rotunda" de que el agente obró con la imprevisión propia de la culpa, que se enmarca en el artículo 2356 del Código Civil, y así las cosas, en este caso la víctima no está obligada a demostrar la culpa, sino que debe establecer el daño y el nexo causal y en este caso, el responsable solo podrá exonerarse mostrando que existió caso fortuito, fuerza mayor, culpa exclusiva de la víctima o la intervención de un tercero. (Sentencia 47001310300320050061101, 2010).

La indemnización se debe llevar a cabo según dicta la norma, artículos 1613 y 1614 del Código Civil:

## **Indemnización total y ordinaria de perjuicios.**

Esta reparación ha de comprender tanto los perjuicios patrimoniales como los extra patrimoniales:

### *Perjuicios patrimoniales o materiales*

Dentro de los perjuicios patrimoniales o materiales se tiene:

Daño emergente, que corresponde al perjuicio o la pérdida que proviene de no haberse cumplido la obligación o de haberse cumplido imperfectamente, o de haberse retardado su cumplimiento (Tafur, G., 2012):

a) Daño emergente pasado. Es el derecho que tiene toda víctima a que se le reembolse todos los gastos razonables en que haya incurrido con ocasión a la ocurrencia del hecho y hasta el momento en que el deudor los cancele o cuando el Juez dicte sentencia.

b) Daño emergente futuro. Son los gastos que a futuro va a tener que sufragar la víctima en razón de la lesión.

Lucro cesante, que corresponde a la ganancia o provecho que deja de reportarse a consecuencia de no haberse cumplido la obligación, o cumplido imperfectamente, o retardado su cumplimiento (Tafur, G., 2012).

(Cuando un bien económico que debía ingresar en el curso normal de los acontecimientos no ingresó ni ingresará en el patrimonio de la víctima).

a) Lucro cesante consolidado. Es aquel nacido de la limitación para dedicarse a labores útiles que significaban para él un provecho liquidado hasta la fecha de la sentencia. La primera tarea del fallador consiste en determinar el ingreso laboral mensual promedio que tenía la víctima en el momento de ocurrir la lesión. El paso siguiente es actualizar monetariamente el valor de dicho ingreso para finalmente obtener el valor del lucro cesante pasado.

b) Lucro cesante futuro. Se determina desde la fecha de la sentencia hacia el futuro y corresponde al valor de la limitación a aquellas actividades que desarrollaba la víctima y que le representaba provecho. Se toma como base el salario mínimo mensual que en el momento de efectuar la liquidación estaría devengando la víctima si no hubiera sufrido la lesión. Con ello se busca dejar a la víctima en las mismas condiciones en que se encontraba al ocurrir el hecho lesivo. "Indemnización por reposición o reemplazo".

#### *Perjuicios extra patrimoniales o morales*

Este tipo de perjuicio tiene un límite marcado por la Corte Constitucional en Mil Salarios Mínimos Legales Mensuales Vigentes, esto es, \$589.600.000, pero ha sido limitado por reiteradas Sentencias de la Corte Suprema de Justicia en máximo 200 SMLMV, que equivalen para el año 2013 a \$117.920.000 para cada beneficiario del mismo.

La indemnización por perjuicios morales subjetivos busca remediar en parte no solo las angustias y depresiones producidas por el hecho lesivo, sino también el dolor físico que en un momento determinado pueda sufrir la víctima de un accidente o enfermedad laboral.

#### *Perjuicios fisiológicos o perjuicios a la vida de relación*

Este tipo de perjuicio es una supresión de las actividades vitales, placenteras y de relación con los semejantes y/o con las cosas del exterior, con lo

que la reparación de este daño lo que repara es la pérdida de la posibilidad de realizar otras actividades vitales, que, aunque no producen rendimiento patrimonial hacen agradable la existencia. (Sentencia Rad. 7428, 1993).

Referente a la indemnización que corresponda por este tipo de daño, teniendo en cuenta que no existe un criterio definido para el mismo, corresponde a quien reclame este tipo de daño probarlo en su existencia y en el monto del mismo, pero siempre será el juez quien en forma autónoma y soberana determine si efectivamente se ha generado el mencionado daño, así como el monto de los perjuicios causados, decisión que se tomará con apoyo del dictamen médico – legal que se profiera para cada caso en particular.

## **REFLEXIONES FINALES**

En la actualidad debido a la globalización y la competencia entre industrias, donde en ocasiones la oferta es superior a la demanda, se olvida a los seres humanos que están detrás del producto y que trabajan incansablemente para satisfacer el consumo. Afortunadamente con el transcurrir de las décadas han surgido normas para proteger a los trabajadores, haciendo que se vislumbre la luz al final del túnel; no hay excusas para evitar la adherencia a la normatividad, puesto que ni siquiera el desconocimiento de la ley justifica el incumplimiento de la misma, como es descrito en el Código Civil colombiano en su Artículo 9, el cual cita que "La ignorancia de las leyes no sirve de excusa", artículo que fue declarado EXEQUIBLE por la Corte Constitucional, mediante Sentencia C-651-97 del 3 de diciembre de 1997, "es necesario exigir de cada uno de los miembros de la comunidad que se comporte como si conociera las leyes que tienen que ver con su conducta. La obediencia al derecho no puede dejarse a merced de la voluntad de cada uno, pues si así ocurriera, al mínimo de orden que es presupuesto de la convivencia comunitaria, se sustituiría la anarquía que la imposibilita."

A pesar de ello, en pleno siglo XXI se evidencian condiciones infrahumanas para desarrollar las actividades laborales, y el incumplimiento de la normatividad en su máxima expresión al evitar afiliar al Sistema de Seguridad Social y al Sistema de Riesgos Laborales a los trabajadores, lo cual ha traído como consecuencia que en la práctica se presenten enfermedades de origen laboral y accidentes de trabajo que se consideran como prevenibles y que dejan como conclusión que todavía se obvian las responsabilidades para garantizar los derechos a la vida y la integridad personal en el trabajo.

Es obligación de todo empleador afiliar a todo su personal a un Sistema de Seguridad Social y de Riesgos Laborales, el cual garantice una atención integral a los trabajadores en caso de presentarse un accidente de trabajo o enfermedad de origen laboral; este precepto está basado en la teoría de la responsabilidad objetiva, con lo cual se garantiza al trabajador la adecuada atención y el pago de las prestaciones sociales laborales, pero esta obligación del empleador no solo se limita a afiliar a los trabajadores al sistema, sino también la de garantizar la prevención y controlar los factores de riesgo laboral que genere su actividad. Todo empleador está en la obligación de cumplir todas las leyes, decretos y normativas del sistema de Seguridad Social en Riesgos Laborales, por ende el empleador debe tomar las medidas de seguridad necesarias y requeridas para proteger la salud e integridad de sus trabajadores; dicha afirmación crea entonces una responsabilidad frente al trabajador, la cual nace de la existencia del contrato de trabajo, que pasa del plano objetivo al de la responsabilidad subjetiva del empleador, donde podrá asignársele las culpas respectivas frente al daño generado a un trabajador, la Corte Suprema de Justicia ratifica que a pesar de que el empleador se encuentre afiliado y al día en cotizaciones con la Administradora de Riesgos Profesionales, tendrá que asumir el pago de prestaciones adicionales a las contenidas en las normas de Seguridad Social cuando no haga gestión de prevención

de accidentes y enfermedades profesionales, o cuando el desarrollo de los programas de Salud Ocupacional, Higiene y Seguridad Industrial es adelantado por personas no competentes; en este caso la acción punitiva es extensiva al profesional que realiza una inadecuada asesoría, por vía de la figura del llamamiento en garantía estipulada en el Código Civil Colombiano, y de igual forma habrá lugar a responsabilidad solidaria cuando exista entre contratante y contratistas identidad de negocio, tal como lo determina el artículo 34 del Código Sustantivo del Trabajo.

Aunque en la normatividad se encuentre estipulada claramente la responsabilidad que el empleador tiene con su trabajador, en la realidad se evidencia lo contrario. La reacción de las organizaciones ante la ocurrencia de un accidente de trabajo es asignar al error humano por parte del trabajador, como única causa del hecho adverso sin tener en cuenta los factores de riesgo que el empleador ha propiciado en los lugares de trabajo. Las ARL, por su lado, también buscan la forma de evadir la responsabilidad y es de esta forma como se encuentra al trabajador afectado en un máximo estado de vulnerabilidad, sin ayuda de las entidades que por convicción y no por temor a la ley deberían protegerlo.

Aunque aún se dista mucho del cumplimiento de las garantías para el desarrollo de las actividades laborales por parte de las personas en los diferentes sectores productivos, es importante reconocer que la normatividad ha dado pasos importantes para la consecución de unos mínimos exigibles y dignificación de las condiciones de trabajo. En la medida en que la sociedad madure, podrá comprender que la protección al trabajador es la protección misma de la sociedad, pues todos cumplimos con este rol independientemente de la ubicación piramidal dentro de la organización. "El que da, recibe" y generar a los trabajadores condiciones adecuadas para el desarrollo de sus tareas, es más impactante al nivel productivo que cualquier otra estrategia de mercadeo. Ojalá pronto se entienda en este modelo de sociedad capitalista.

## FINANCIAMIENTO

Recurso propio

## REFERENCIAS

- Aguilar, J. E. (2010). *El contrato de Trabajo*. Recuperado el 26 de abril de 2013, de: Network de Psicología Organizacional: [www.conductitlan.net/psicologia\\_organizacional/contratos\\_de\\_trabajo.pdf](http://www.conductitlan.net/psicologia_organizacional/contratos_de_trabajo.pdf)
- Asamblea Nacional Constituyente (1991). *Constitución Política de Colombia. Art. 90*. Recuperado el 26 de abril de 2013, de: Presidencia de la República de Colombia: <http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Documents/Constitucion-Politica-Colombia.pdf>
- Cajiga, J. F. (2008). *El concepto de Responsabilidad social empresarial, pp. 2-3*. Recuperado el 26 de abril de 2013, de: cemefi: [http://www.cemefi.org/esr/images/stories/pdf/esr/concepto\\_esr.pdf](http://www.cemefi.org/esr/images/stories/pdf/esr/concepto_esr.pdf)
- Congreso De La República De Colombia (2011). *Artículo 216, Código Sustantivo del Trabajo*. Recuperado el 23 de abril de 2013, de: OIT: <http://www.ilo.org/dyn/travail/docs/1539/Codigo%20Sustantivo%20del%20Trabajo%20Colombia.pdf>
- Congreso De La República De Colombia (1999). *Ley 599 de 1999, Código Penal Colombiano, Arts. 22, 23, 24*. Recuperado el 23 de abril de 2013, de: vlex: [http://legislacion.vlex.com.co/vid/codigo-penal-42846002?\\_ga=1.177605856.456073723.1415224591](http://legislacion.vlex.com.co/vid/codigo-penal-42846002?_ga=1.177605856.456073723.1415224591)
- Congreso De La República De Colombia (2012). *Ley 1562 de 2012, Arts. 3 y 4*. Recuperado el 26 de abril de 2013, de: Presidencia de la República: <http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Leyes/Documents/ley156211072012.pdf>
- Consejo Andino De Naciones (2004). *Desición 584, Instrumento Andino de Seguridad y Salud en el Trabajo*. Recuperado el 26 de abril de 2013, de: Consejo Andino del Ministerio de Relaciones Exteriores: [http://www.mintra.gob.pe/contenidos/archivos/sst/decision\\_584.pdf](http://www.mintra.gob.pe/contenidos/archivos/sst/decision_584.pdf)
- Daza, F. M. (2010). *NTP 443 Factores psicosociales: Método de evaluación*. Recuperado el 26 de abril de 2013, de: INSHT Instituto Nacional de Higiene y Seguridad en el Trabajo: [www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/401a500/ntp\\_443.pdf](http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/401a500/ntp_443.pdf)
- Ministerio De Trabajo De Colombia (31 de julio de 2014). *Decreto 1443 de 2014*. Recuperado el 03 de noviembre de 2014, de: Ministerio del trabajo: [www.mintrabajo.gov.co/component/docman/doc\\_download/2095-decreto1443sgsss.html](http://www.mintrabajo.gov.co/component/docman/doc_download/2095-decreto1443sgsss.html)
- Ministerio Del Trabajo Y Seguridad Social (1994). *Decreto 1295 de 1994 Por el cual se determina la organización y administración del Sistema General de Riesgos Profesionales*. Recuperado el 26 de abril de 2013, de: Ministerio de Gobierno de la República de Colombia: <http://copaso.upbbga.edu.co/legislacion/Decreto%20ley%201295%20de%2094%20Sistema%20General%20de%20Riesgos%20Profesionales.pdf>
- Real Academia De La Lengua Española (2013). *Diccionario Español*. Recuperado el 26 de abril de 2013, de: RAE: <http://www.rae.es/>
- Sentencia 47001310300320050061101, 47001310300320050061101 (Sala Laboral, 26 de agosto de 2010). Obtenido de: <https://relatorestematicos.uniandes.edu.co/images/stories/relatorias/pdfs/responsabilidadcivil/actividadespeligrosaspre-suncionculpa26agosto2010.pdf>
- Sentencia Rad. 7428 , Rad. 7428 (Consejo De Estado, 6 de mayo de 1993).
- Sentencia Ref. 22656, Sentencia Ref. 22656 (Sala Laboral, 30 de junio de 2005). Obtenido de: [http://www.artsura.com/images/stories/sentencia\\_22656\\_30\\_junio\\_2005.pdf](http://www.artsura.com/images/stories/sentencia_22656_30_junio_2005.pdf)
- Tafur, G. A. (2012). *Código Civil Colombiano, Artículos 1614 y 2341*. Bogotá, D. C.: Leyer Ltda.
- Tafur, J. F. (2008). *Obligaciones y Responsabilidades en el Sistema General de Riesgos Profesionales* . Recuperado el 27 de abril de 2013, de: Consejo Superior de la Judicatura: [www.ramajudicial.gov.co](http://www.ramajudicial.gov.co)



## **Comunidad científica y tecnológica, ha llegado la oficina que te acompañará en la transferencia de tu conocimiento**

**Scientific and technological community, The office that will accompany you in knowledge transfer has come**

Tatiana Monsalve Duarte\*

Citation / Para citar este artículo: OTRI-Bogotá. (2014). Comunidad científica y tecnológica, ha llegado la oficina que te acompañará en la transferencia de tu conocimiento. Revista *Tecnura*, Edición especial, 273-276.

**Fecha de recepción:** 4 de febrero de 2014 / **Fecha de aceptación:** 11 de julio de 2014

La educación científica y la investigación aplicada se han venido constituyendo como ejes de prioridad en la generación actual, tanto en el mundo empresarial como en el social. Cada día crece la necesidad de fortalecer las bases de la creatividad para la producción de tecnología (tangible e intangible), apoyar al sistema con la integración de conocimiento aplicado y de esta manera hacer posible su materialización, por medio de redes de colaboración compuestas por especialistas conectados por un mismo fin: transferencia de conocimiento y tecnologías.

El trabajo que trae consigo un proceso de transferencia de conocimiento y tecnologías involucra la interacción de áreas especializadas como mercadeo para comercialización, ingeniería para vigilancia tecnológica, economía para valoración tecnológica y jurídica para propiedad intelectual, donde investigadores e inventores reciben la asesoría necesaria para preparar sus resultados de investigación e innovaciones como productos terminados para la sociedad.

Un gran objetivo es construir confianza en las ciencias que se encuentran detrás de cada concepto desarrollado bajo el resultado de una investigación. Los ciclos del aprendizaje contribuyen a la apropiación de conocimientos nuevos y con autonomía de desplazamiento, influyendo positivamente en el comportamiento individual y con la suma de ello, el de una sociedad; generando la cadena consecuente entre el pensar y el actuar. Lo que hace que la cultura en donde se genera este nuevo conocimiento, demande la expansión de la tecnología para lograr el aumento de su capacidad productiva y social.

Por ejemplo, los cambios de paradigmas de la generación actual con respecto a las anteriores han hecho que las fronteras entre países sean cada vez menos difusas, y con ello el deseo de conocer una segunda lengua, gracias a la necesidad de adaptación a culturas diferentes. La tecnología en la actualidad soporta la creación de dispositivos, programas y diversas aplicaciones con las que una persona sin necesidad de pagar por su uso pueda aprender diferentes lenguas de

\* Especialista de marketing y relaciones de la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación de Bogotá, OTRI-Bogotá. Máster en Gestión y Dirección de Empresas Internacionales.

manera autodidacta; atravesar fronteras y comunicarse de manera visual o escrita, por medio de envío de información y datos al utilizar diversos mecanismos, que en tiempos pasados no se hubiesen imaginado.

Las personas tienen la capacidad de inventar, crear y construir a través de la necesidad o simplemente del deseo por algo, lo que hace que el cerebro trabaje constantemente, y de esa manera trazar el objetivo en que esas percepciones diarias y conocimiento se traduzcan en beneficios para una comunidad o el cubrimiento de una necesidad empresarial.

El gobierno de Estados Unidos como uno de los principales emprendedores de transferencia formal de tecnología, reconoció en su momento la necesidad de crear una oficina que se especializara y se dedicara solamente a identificar, desarrollar, promover y negociar sobre el conocimiento generado por los investigadores e inventores, con el fin de entregarlo a la comunidad para obtener resultados aplicados a la producción y comercialización de los productos creados e innovados.

Bajo este modelo propuesto es como trasciende las fronteras el concepto de Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI), la cual se especializa en generar procesos eficientes para que la tecnología (tangible o intangible) y/o innovaciones se encuentren en las condiciones pertinentes, y así los usuarios finales disfruten de los beneficios generados a través de esa transferencia.

En Colombia ya se conocía la existencia de oficinas de transferencia en algunas universidades, interesadas precisamente en impulsar los resultados de las investigaciones gestadas en su interior; sin embargo, no era un concepto que se manejara de manera frecuente ni muy conocido por las personas que se encontraban involucradas en investigación o en comercialización de conocimiento. Es así como Colciencias promueve a través de su convocatoria 621 de 2013, la creación y fortalecimiento de Oficinas de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) en diferentes regiones del

país, las cuales debían ser formuladas mediante alianzas entre universidades, centros de investigación, centros de desarrollo económico y empresas de diferentes sectores; donde se encontrarían involucrados especialistas con experiencia en la gestión de protección intelectual, vigilancia tecnológica, valoración de intangibles y tecnologías y, por último, la comercialización, promoción y conexión con el mundo inversionista y empresarial, con el objetivo de dar vida a cada resultado de investigación, cada tecnología y/o invento, generando impacto positivo en la población objetivo.

La iniciativa de crear la OTRI-Bogotá nace de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (desde su Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico), en co-ejecución con la Secretaría Distrital de Desarrollo Económico (desde su Subdirección de Ciencia, Tecnología e Innovación), como esfuerzo conjunto para así no dejar pasar la oportunidad que Colciencias exponía a través de su convocatoria y de esta manera aprovechar las condiciones favorables de investigación y cobertura con las que la Universidad Distrital y la Secretaría cuentan para la creación e implementación de la Oficina. La OTRI-Bogotá tiene como objetivos fundamentales facilitar la transferencia de resultados de investigación, innovación y tecnologías, gestadas por investigadores e inventores de Bogotá – Región, hacia el sector productivo, permitiendo así visibilizar, promover y desarrollar la materialización de un producto vendible y rentable, social y económico.

El acompañamiento y asesoría son posibles mediante la prestación de los siguientes servicios:

## **Marketing y Transferencia Tecnológica**

Comprensión y conocimiento de manera precisa sobre las ventajas competitivas de la tecnología.

- Validación técnico-comercial de la tecnología.
- Análisis de la competencia en sus diferentes frentes.

- Comunicación y divulgación de los beneficios de la tecnología.
- Creación de las conexiones necesarias para realizar la transferencia.

## Vigilancia y Diagnóstico de la Madurez de la Tecnología

Investigación organizada, selectiva y permanente de información sobre ciencia y tecnología, para convertirla en la base de toma de decisiones.

- Informes de vigilancia tecnológica e inteligencia competitiva (basados en la Norma UNE 1666006:2006).
- Informes de competencia, estado del arte y estado de la técnica.
- Búsqueda de antecedentes nacionales e internacionales y sus patentes equivalentes.
- Evaluación del estado de desarrollo de las tecnologías.
- Informes de prospectiva y tendencias.
- Alertas de invenciones e innovación.

## Valoración Tecnológica

Conocimiento de la tecnología y su valoración (tangible e intangible), no a partir de lo que cuesta sino de lo que es posible producir a través de ella.

- Evaluación de la relación entre la propiedad intelectual, la fuerza de su comercialización y la tecnología.
- Conocimiento contable (entendimiento y cálculo de costos de producción).
- Valor Presente Neto (gestión y evaluación de proyectos).
- Comprensión del mercado (comparaciones con tecnologías existentes y similares).
- Conocimiento de las opciones reales (basado en las opciones financieras).
- Modelación de negocios (acorde con el tipo de protección).

## Propiedad Intelectual y Protección

Asesoría especializada para el aseguramiento de la tecnología, de acuerdo con su innovación y con respecto a la competencia.

- Diagnóstico del tipo de protección necesaria y pertinente.
- Creación del modelo de negociación y así dar solidez a la tecnología.
- Protección de las invenciones, creaciones y marcas para prevenir las utilizaciones no autorizadas en el comercio de los productos.

El proceso para la creación e implementación de la OTRI-Bogotá ha sido acompañado por Colciencias y su agenda de entrenamiento, dirigida al fortalecimiento de los especialistas que componen cada una de las OTRI a nivel nacional (Atlántico, Santander, Antioquia y Cundinamarca), soportada por la consultoría de los señores Glenn E. Robinson y Norman Kaderlan, del IC2 de la Universidad de Texas en Austin.

Gracias a una preparación previa mediante el programa virtual “Innovation Readiness de IC2 – Colciencias”, donde los especialistas recibieron la formación necesaria para profundizar sus conocimientos en cada una de las áreas, basado en la metodología Quicklook y creación de Oficinas de Transferencia de Resultados de Transferencia, aplicando un enfoque neto sobre transferencia de tecnología; con el objetivo de crear redes de trabajo e intercambio de saberes entre OTRIs a nivel nacional, la primera semana de julio de 2014 se realizó el primer encuentro de OTRIs a nivel nacional, para consolidar los conocimientos adquiridos del programa de manera presencial y práctica, logrando el objetivo de enlace y comunicación entre OTRIs.

Adicionalmente la OTRI-Bogotá, se encuentra desarrollando asesoría y acompañamiento a diferentes tecnologías, que ya se han acercado con sus prototipos y productos terminados, para lograr facilitar la transferencia y entrega al mundo de los negocios. Entre los productos que se encuentran

actualmente en el portafolio, se trabaja en el proceso de transferencia de dispositivos y aparatos eléctricos para el mejoramiento de la calidad de vida de personas que presentan algún tipo de discapacidad, innovaciones en artefactos que mejoran los procesos de producción de las empresas y con ello, el beneficio de generación de economía, entre otros que impactan a segmentos especializados y masivos de la comunidad.

Actualmente se encuentra realizando gestión para la firma de acuerdos de cooperación con empresas, universidades y Oficinas de Transferencia

de Conocimiento en países como México, España, Bolivia y Argentina. El pasado 26 de Noviembre de 2014, se firmó la carta de intención de Querétaro en México, donde se expresa la voluntad de cooperación entre la transferencia de conocimiento entre los países de Costa Rica, Guatemala, Brasil, México, Argentina y en representación de Colombia, OTRI Bogotá.

Gracias al trabajo realizado en equipo y al gran apoyo del Coordinador de la OTRI-Bogotá el Ingeniero José Nelson Pérez Castillo, la operación de la Oficina se desarrolla y crece a buen ritmo.



Lanzamiento de la OTRI-Bogotá, 11 de Diciembre de 2011, con las ponencias de expertos en transferencia tecnológica y empresarios de innovación.

Izquierda a Derecha:

Pedro Fabián Pérez (Vigilancia Tecnológica), Ivanna García (Infotec, México), Luiz Otavio

Pimentel (Universidad Santa Catarina, Brasil), Juan Carlos Serna (Propiedad Intelectual), Olivier Bui-gues (Obinova, España), Tatiana Monsalve (Marketing y Relaciones), Jairo Rodríguez (Valoración Tecnológica), Andrea Rojas (Directora de Proyectos OTRIs, Colciencias) y José Nelson Pérez Castillo (Coordinador OTRI-Bogotá)



*Oficina de Transferencia  
de Resultados de  
Investigación de Bogotá*

## Un vistazo al proyecto emprendetronika

### Check out project emprendetronika

Doris Marlene Olea\*, Pablo Emilio Garzón\*\*, Henry Montaña\*\*

Citation / Para citar este artículo: Olea, D. M., Garzón, P. E. & Montaña H. (2014). Un vistazo al proyecto EMPRENDETRONIKA. Revista Tecnura, Edición especial, 277-280



**Fecha de recepción:** 4 de febrero de 2014 / **Fecha de aceptación:** 11 de julio de 2014

Dentro del desarrollo del proyecto en convenio con la Secretaría de Desarrollo Económico de Bogotá, D. C. y la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, se logró identificar un conjunto de propuestas de Planes de Negocio en el área de la electrónica con el fin de desarrollar los prototipos pertinentes y adecuar sus propuestas hasta el punto de proponerlas como patentables. Todo esto se trabajó en cuatro fases claramente definidas, así:

**Fase I – Convocatoria:** Se inscribieron 270 propuestas entre estudiantes, docentes y demás actores de instituciones de educación básica y superior que tenían identificados una idea, prototipo o proyecto en áreas de la electrónica en general y en especial las de mecatrónica, sistemas incorporados, control y automatización, electrónica de consumo, electromedicina, entre otras.

**Fase II – Primer filtro:** De estas propuestas inscritas se seleccionaron 120 que tenían un nivel de

avance tanto en el desarrollo técnico como en el plan de negocio evaluado.

**Fase III – Segundo filtro:** De la fase anterior (120 propuestas) se seleccionaron 100 pre-proyectos en los cuales se evidenció un mayor logro tanto en los prototipos como en tener el plan de negocio.

**Fase IV – Selección de prototipos patentables:** Una vez se tenían los prototipos con el suficiente grado de terminación, se desarrollaron tres pre-muestras que contribuyeron con el instructivo por definir de las 100 propuestas, 35 que fueron seleccionadas para estructurar aún más su Plan de Empresa y empezar el proceso de acompañamiento de la industria.

Para cumplir con estas fases fue necesario diseñar un proceso metodológico de selección gradual pero coherente y consistente desde la fase de idea preliminar hasta la de los planes de negocio debidamente desarrollados. Se planteó entonces una

\* dmoleas@udistrital.edu.co, \*\* pegarzonc@udistrital.edu.co, \*\*\* hmontanaq@udistrital.edu.co

metodología en cascada basada en los procesos analíticos jerarquizados (AHP), que parte de la selección de expertos que definen los criterios que van a ser considerados así como la medición de los análisis que se deben hacer de la consistencia. Al final se obtuvo una herramienta que permitió calificar en las distintas fases que conformaron el proyecto, las propuestas con los diferentes grados de avance de manera consistente. Esta propuesta metodológica se observa en la figura 1.

En general, se puede afirmar que en el diseño y representación de los sistemas de ingeniería se requiere la intervención de especialistas expertos y también que a medida que crece la complejidad, se requieren múltiples conocimientos e interacciones a fin de aprender unos de otros. Con ello se logra conciliar diferentes puntos de vista a un mismo desarrollo ya que esta idea convertida en prototipo se vuelve un límite objeto, el conocimiento de lo que debe ser una buena construcción por los expertos en cuestión, mientras que la integración de estos en un equipo de apoyo en conjunto con las instituciones que soportan estos proyectos se convierten en múltiples partes interesadas en los procesos de toma de decisiones.

Este panel de expertos seleccionados fue capaz de integrar los conocimientos dispares y puntos de vista de sus miembros con el fin de tomar una decisión que resolviera la situación problema por enfrentar que en este caso fue seleccionar ideas prometedoras y convertirlas en prototipos que en un futuro entren al mercado y compitan con cierta posibilidad por captar una parte de este. El éxito de este panel fue que logró minimizar los conflictos propios

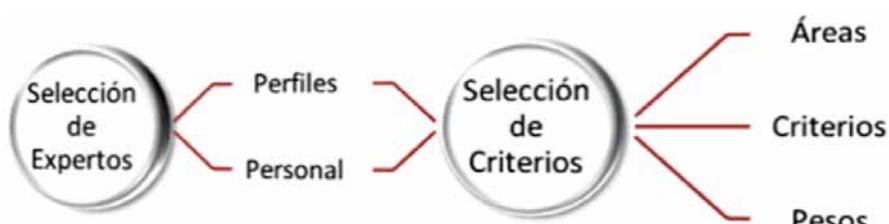
entre personas y saberes, que no dejó lagunas o brechas de conocimientos específicos de importancia para el devenir del proyecto y que tiende los puentes de comunicación entre saberes múltiples y diferentes que antes de jerarquizarlos consiguió integrarlos para un eficiente desarrollo del trabajo.

Por tanto, este proyecto contó como entrada con un personal altamente capacitado y experimentado y, sobre todo, de naturaleza multidisciplinaria, además que quedó resuelto en la medida en que se establecieron unas claras líneas de actuación, que pueden observarse en la figura 2. En estas se han definido áreas de saber que a su vez permitieron establecer las relaciones entre estos perfiles requeridos frente a sus competencias dentro del grupo de trabajo, dividiéndolas en dos áreas fundamentales.

Para la selección de criterios se pretendió tener en cuenta el momento de desarrollo de las propuestas de los participantes en cada etapa de desarrollo del mismo, como se visualiza en la figura 3. Bajo ese entendido la cantidad de requerimientos va en aumento no solo en número sino en la calidad de los resultados por evaluar.

En la figura 4 se presenta la estructura general de los criterios seleccionados en correspondencia con las áreas técnica y de emprendimiento.

Algunas estadísticas de Emprendetronika interesantes de conocer radican, por ejemplo, en que participaron dieciocho (18) entidades universitarias (U. Distrital, U. San Buenaventura, U. Militar Nueva Granada, U. Agraria, U. Santo Tomás, U. Manuela Beltrán, U. Los Libertadores, U. Autónoma, U. Nacional, U. Cooperativa, U. Escuela



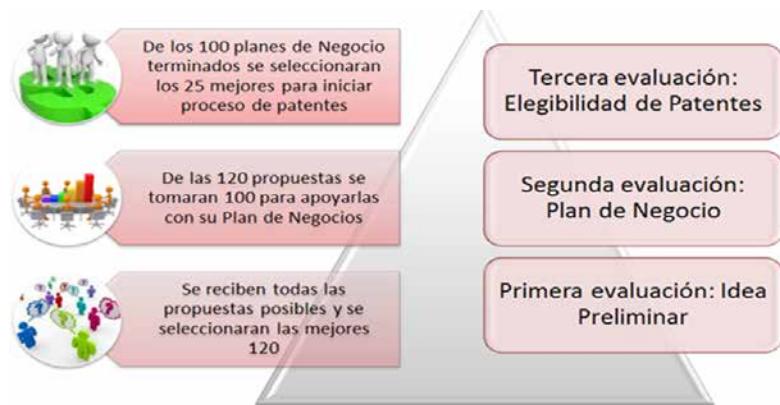
**Figura 1.** Metodología propuesta de evaluación de alternativas.

**Fuente:** elaboración propia



**Figura 2.** Áreas de apoyo de los expertos.

Fuente: elaboración propia



**Figura 3.** Etapas de evaluación del proyecto Emprendetronika.

Fuente: elaboración propia



**Figura 4.** Criterios por seleccionar.

Fuente: elaboración propia

Colombiana de Ingeniería, U. Antonio Nariño, U. Central, U. Libre, UNIMINUTO, SENA, CUN, CIDCA, ECCI) y un porcentaje representativo distribuido en profesionales independientes, por ejemplo, un abogado. En cuanto al número de ideas que más participaron, correspondió a la Universidad Distrital (33%) y en segundo lugar a ideas de personas independientes (26%) y en su orden, 41% distribuido en las demás entidades universitarias.

Las ideas inscritas se clasificaron de acuerdo con las soluciones planteadas, encontrándose una distribución así: Aplicaciones industriales, 19%; Control y seguridad, 15%; Aplicaciones del hogar, 14%; Generación 13%, Salud y medicina, 11%; Transporte y movilidad, 7%; Agroindustria, 6%; Ambiental, 4%; Recreación, 4%; Educación, 3%; y otros, 3%.

En cuanto a localidades, participaron 19, registrándose el mayor número de ideas en la localidad de Suba con 18%, siguiendo Kennedy con 16% y Puente Aranda con 10%; el restante 44% quedó distribuido en las demás localidades de Bogotá; así mismo se presentaron las ideas por carreras, evidenciándose 52% para Electrónica, 13% para Mecatrónica y una distribución de 9% para cada ingeniería y tecnología como sistemas, control, sonido y mecánica.

Los resultados por profesión demostraron que 45% perteneció a estudiantes universitarios, 27% a ingenieros, 15% a tecnólogos y 13% se distribuyó entre docentes y otros; por género se registró 88% masculino y 12% femenino.

Quienes participaron en este proyecto bajo las condiciones antes descritas recibieron de

Emprendetronika un acompañamiento promedio de 400 horas distribuidas en actividades de asesoría en método CANVAS, Formulación de Planes de Negocio y desarrollo de prototipos en los 16 laboratorios de la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital; así mismo asistieron a 13 actividades de tipo conferencia-taller, que buscaban fortalecer y acentuar los acompañamientos efectuados por sus diferentes coach.

Es necesario resaltar que el componente diferenciador de este proyecto frente a otros proyectos similares financiados por la Secretaría de Desarrollo Económico y otros programas de carácter nacional consistió en el acompañamiento de protección de propiedad intelectual. Para determinar este campo de protección fue necesario señalar que la propiedad intelectual consiste en el reconocimiento de los creadores sobre su trabajo intelectual, otorgando protección a los avances tecnológicos, científicos, comerciales y culturales.

Finalmente, se presentan los resultados obtenidos de aquellos prototipos con planes de negocio que fueron seleccionados para acompañamiento a protección de propiedad intelectual, logrando obtener las siguientes protecciones: 3 diseños industriales, 4 modelos de utilidad, 3 patentes de invención, 5 marcas y 10 solicitudes de derechos de autor.

## FINANCIAMIENTO

Universidad Distrital Francisco José de Caldas



Entidades que apoyan

**Fuente:** elaboración propia



## 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) y CABI (Reino Unido)

*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://tecnura.udistrital.edu.co>

## 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 millones y millones se deben señalar con un espacio fino.
- Evitar las notas de pie de página.
- Se debe utilizar nomenclatura árabe 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潜在 y escrito en mayúscula sostenida. Este debe aparecer centrado entre los 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/thesp>.

#### *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/mtsqliwb/site/default.asp>

### *Introducción*

Debe describir el planteamiento general del trabajo, así como contexto, antecedentes, estado de arte de la temática abordada, objetivos 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

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.

El llamado de una referencia bibliográfica se inserta en el texto, en el punto pertinente, mediante el primer apellido del primer autor y el año entre paréntesis, como se muestra a continuación: (Hernández, 2012).

El estilo de citación de referencias adoptado por la revista **Tecnura** es APA sexta edición. A continuación se describen dos ejemplos de las referencias más utilizadas, según el estilo de referencias adoptado por la revista *Tecnura*:

**Referencia de un artículo:** debe incluir la siguiente información en el orden descrito:

- Apellido del autor, iniciales del nombre del autor.
- Título del artículo entre comillas.
- Nombre de la revista en cursiva.
- Volumen y número, o año y número de la revista.
- Fecha de la publicación, mes y año.
- Páginas de referencia del artículo.

Ejemplo:

Weiming H., Tieniu T., Liang W., Maybank, S., "A survey on visual surveillance of object motion and behaviors", *IEEE Trans. Systems, Man, Cybern.*, Vol. 34, No. 3, Aug. 2004, pp. 334-352.

**Referencia de un libro:** debe incluir la siguiente información en el orden descrito:

- Apellido del autor, iniciales del nombre del autor.
- Título de la obra en cursiva.
- Número de edición, si es diferente a la primera.
- Lugar de publicación, ciudad y país.
- Nombre de la editorial.
- Año de publicación.
- Número de páginas, en caso de que aplique.

Ejemplo:

Hamilton, J., *Time series analysis*. New Jersey, United Estates of America: Princeton University Press, 1994.

En caso de una referencia tomada de Internet se debe escribir el nombre de la URL del sitio y la fecha de consulta.

## 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://tecnura.udistrital.edu.co>, en la sección "Guía de Autores". 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 guía de 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:

- i. Envío del artículo acompañado de la carta de presentación y el formato de información por parte de los autores.
- ii. Notificación al autor de correspondencia de la recepción del artículo.
- iii. Verificación del tema del artículo con respecto a las áreas de interés de la revista.
- iv. Verificación de las normas de presentación por parte del monitor de la revista.
- v. Notificación al autor de correspondencia de la evaluación de las normas de presentación.
- vi. Envío de las correcciones realizadas por los autores con respecto a la evaluación de las normas de presentación.
- vii. Envío del artículo a los árbitros seleccionados.
- viii. Notificación del inicio del proceso de arbitraje del artículo.
- ix. Notificación a los autores de la decisión tomada por el Comité Editorial y de las evaluaciones hechas por los árbitros.
- x. Envío de las correcciones realizadas por los autores con respecto a las evaluaciones de los árbitros.

- xi. Estudio de la versión final del artículo y de las evaluaciones de los árbitros por parte del Comité Editorial.
- xii. Envío por parte de los autores de la carta de cesión de derechos al editor de la revista.
- xiii. Envío de la versión con corrección de estilo y diagramada a los autores.
- xiv. Verificación de errores y aprobación final de la versión con corrección de estilo y diagramada por parte de los autores.
- xv. Publicación del artículo en el número correspondiente de la revista *Tecnura*.
- xvi. Notificación a los autores de la publicación del número de interés.
- xvii. 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 deban 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.co](mailto:tecnura@gmail.co), 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://tecnura.udistrital.edu.co>



## 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**
- **Arbitration of article process**
- **Contact**

### SCOPE AND EDITORIAL POLICY OF THE JOURNAL

Tecnura journal is an institutional journal of the Faculty of Technology of Francisco José de Caldas University. It is a scientific-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 the date has maintained regularity.

The areas of interest of Tecnura journal are focused on all engineering fields, as electronics, telecommunications, electricity, systems, industrial, mechanic, civil, environmental, etc. as well as it has room for education and health issues, if they are related with engineering. The journal will only publish research, reflection and revision articles of scientific and technologic research. In consequence, during the initial editorial evaluation, short articles and case reports will be rejected.

Tecnura Journal is published for professors, researchers, students and professionals interested in permanent update of their knowledge and monitoring their 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 belonging to public or private national or foreign institutions.

Articles submitted to Tecnura journal must be unpublished works written in spanish or english; nevertheless, but 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 ÍndiceBibliográficoNacional Publindex (IBN) de Colciencias (Colombia) in the category A2, in the Regional Index Scielo Colombia (Colombia) and Redalyc (México); besides 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), Pe-riódica of the Universidad Nacional Autónoma de México (México), Oceanet (Spain) and Dialnet of the Universidad de la Rioja (Spain); also part of the following directories: regional information system for scholarly journals online 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.

Francisco José de Caldas Distrital University, its directors, the editor, the editorial and scientific committee is 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://tecnura.udistrital.edu.co

## TYPE OF ARTICLES ACCEPTED

Tecnura journal, according to the classification of the Scientific and Technological Publications National Index (Publindex-Colciencias) receives nominations of unpublished articles on the following topics:

- **Scientific and technologic research articles:** document that presents, in a detailed manner, the original results of research projects. The structure generally used contains four main parts: introduction, methodology, results and conclusions.
- **Reflection articles:** document that presents research results from an analytic, interpretative or critical perspective from the author, over a specific topic and adopting original sources.
- **Review article:** document that results from a research where are analyzed and integrated the results of published or unpublished research's, on a science or technology field, to state the advances and tendencies in development. It is characterized by presenting a careful bibliographical check of at least 50 references.

## ARTICLE FORMAT

### Of the appropriate language and style for writing articles

- It is necessary that the articles be written for an international audience, avoiding excessive centralization in strictly local or particular experiences.
- Must use simple sentence structures, avoiding the ones that are too long or complex.
- The vocabulary used must be basic and common, technical terms 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 that their work is conducted in a professional and ethic manner.

### Of 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, 25 pages not including references.

### Presentation format

Submitted articles must be unpublished works written in Spanish or English and made in Microsoft Word (2003 and beyond), complying with the following indications:

- *Times New Roman* letter, 12 point (except otherwise said for some sections).
- One column double-spaced.
- All the margins 3 cm.
- Paragraphs should be justified without spaces between consecutive 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 point (,) and not with comma (,), and thousands and millions with comma (,).
- Avoid footnotes.
- Arabic nomenclature must be used only until the third level.

### Of the structure of the article

The papers must have the following structure and comply with the following requirements:

#### *Composition of an article*

All the articles submitted for their evaluation and possible publication by the Tecnura Journal must have at least the following components:

- Title in Spanish and English.
- Information about the authors.
- Summary 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 has to 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 must be written the complete name(s) of the author(s), with their basic biographical data: undergraduate degree, graduate degree, occupation or position, institutional affiliation (institution where works), 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:***

Three out of ten key words 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 is suggested the 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 found 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/mtsqt/wb/site/default.asp>

### *Summary in Spanish*

Translation to the Spanish language of the text that appears in the abstract, must be corrected and précised.

### *Keywords in Spanish*

Translation to the English language of the keywords in Spanish must be corrected and précised.

Key words must be written in the order of the key words in English and must be as standard as possible, for which is suggested the 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/thesp>

### *Introduction*

The general idea of the work must be described, its context, precedents, state of the art of the topic, objectives and possible scope of the work.

### *Methodology*

The writing of this part must allow that any specialized professional in the topic replicates 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 with the proposed objective.

### Financing

Mention the associated research from where was derived the article and the entity that endorsed and financed the research.

### Acknowledgments

Preferably will be brief and should 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 near 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, is recommended that these are not inserted as images, considering that in that format they cannot be modified. The title of each table includes 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 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 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. Must be used units, dimensions and symbols of the international system.

When used acronyms or abbreviations, it should be written first the complete equivalence, followed by the corresponding acronym or abbreviation in parenthesis and from there it is only written the respective acronym or abbreviation.

### Bibliographic references

Citations, bibliographic references and infography are included at the end of the article. The bibliographic references must be arranged alphabetically according to the surname of the first author, without numbers.

The references that were made in the main text of the work only should appear in tables or in figures. This means that in the list should not appear other references even though they may have been consulted by the authors for the development of the paper.

The call of a bibliographic reference in the text is inserted at the relevant point by the first authors' surname and the year in parentheses, as shown: (Hernández, 2012).

El estilo de citación de referencias adoptado por la revista **Tecnura** es APA sexta edición. Below are described two examples of the references used in the style of references adopted by Tecnura journal:

**Reference of an article:** must include the following information in the order described:

- Surname(s) of the author, initials of the name(s) of the author.
- Title of the article between quotation marks.
- Name of the journal in italic.
- Volume and number or year and number of the journal.
- Date of publication, month and year.
- Reference pages of the article.

Example:

Weiming H., Tieniu T., Liang W., Maybank, S., "A survey on visual surveillance of object motion and behaviors", *IEEE Trans. Systems, Man, Cybern.*, Vol. 34, No. 3, Aug. 2004, pp. 334–352.

**Reference of a book:** must include the following information in the order described:

- Surname(s) of the author, initials of the name(s) of the author.
- Title of the work in italic.
- Edition Number if different from the first.
- Place of publication, city and country.
- Publisher name.
- Year of publication.
- Number of pages in case it applies.

Example:

Hamilton, J., *Time series analysis*. New Jersey, United Estates of America: Princeton University Press, 1994.

In the case of a reference taken from internet, the URL of the site must be written and the date it was taken.

## ARTICLE SUBMISSION

The article of the authors have to be submit through the application Open Journal System in digital format, the cover letter and the format article-authors.

### 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, where is included:

- Specific request to consider your article to be published in Tecnura journal.
- Full name of the article.
- Full names of all the authors of the paper.
- Certification of the originality and unpublished character of the paper.
- Exclusivity submission to Tecnurajournal.
- Confirmation of being the author 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://tecnura.udistrital.edu.co>, in the section "guide to authors". It is important to complete all the fields of information requested, some of them have comments to clarify better what is being requested. Not to be scanned.

### Article

Article in digital format (Word 2003 and later editions) that comply with all the presentation rules describe 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:

- i. Delivery of the article with the cover letter and the information format by the authors.
- ii. Notification to the author about the reception of the article.
- iii. Verification of the presentation rules by the monitor of the journal.
- iv. Notification to the author about the evaluation of the presentation rules.
- v. Submission of corrections made by the authors related to the evaluation of presentation rules.
- vi. Submission of the articles to the selected arbitrators.
- vii. Notification of the beginning of the arbitration process of the article.
- viii. Notification to the authors about the decision made by the editorial committee, and of the evaluations made by the arbitrators.
- ix. Delivery of the corrections made by the authors with respect to the evaluations made by the arbitrators.
- x. Study of the final version of the article and the evaluations of the arbitrators by the editorial committee.
- xi. Delivery by the authors of the letter that surrenders right to the editor of the journal.
- xii. Submission of the version with style corrections and diagrammed to the authors.
- xiii. Verification of errors and final approval of the version with style corrections and diagrammed by the authors.
- xiv. Publication of the article in the corresponding number of Tecnura journal.
- xv. Notification to the authors of the number of interest.
- xvi. 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 is expected to include more external peers that 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; it is considered confidential every paper sent and this is imposed this way 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 of the publication of an article, the editorial committee will send the article to 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 to his work institution evaluators, which must be specialists in the specific topic sent and at least must have Masters level and at least two must be internationals. Potential evaluators can belong to a university or

industry, public or private; of them must be provided complete name, highest academic formation, institutional affiliation and e-mail. The editorial committee to enrich the database of arbitrators of Tecnura journal will analyze these four potential evaluators.

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, has the right to make any editorial modification that considers necessary; in this case the author will receive written recommendations from the evaluators, that if accepted, must deliver the article with the suggested adjustments within the dates given by the journal to guarantee its publication in the programmed number.

As copyrights are recognized a copy of the journal in which the collaboration is published

## 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.co](mailto:tecnura@gmail.co) or by mail to Cesar Augusto Garcia Ubaque, Director and Publisher of the Journal Tecnura to the following address:

***Journal Tecnura***

Journals Room, Block 5, Office 305.  
Technology Faculty  
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://tecnura.udistrital.edu.co>



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>



## 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	46 USD
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)