

Tecnura

Tecnología y Cultura Afirmando el Conocimiento
 Universidad Distrital Francisco José de Caldas • Facultad Tecnológica

CALIBRACIÓN DE IMÁGENES DE RADARES METEOROLÓGICOS / Virgilio Santander Socorras Quintero / Ernesto Gómez Vargas / Nelson Obregón Neira • MODELO TEST-BED DE SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN DE CRIPTOGRAFÍA DE CURVA ELÍPTICA EN REDES IPV6 DE PRÓXIMA GENERACIÓN / Nelson Enrique Vera Parra / Danilo Alfonso López / Héctor Cristyan Manta Caro • MEJORAMIENTO DE LA TÉCNICA ATPM PARA REDUCCIÓN DE INTERFERENCIA EN SISTEMAS DE BANDA ANCHA POR LÍNEA DE POTENCIA EN RESIDENCIAS / José Roberto Cárdenas Castiblanco • ESTIMACIÓN DE LA CANTIDAD DE POTENCIA SUMINISTRADA POR LAS CELDAS FOTOVOLTAICAS DE UN CUBESAT / Jesús D. González-Llorente / Gustavo A. Puerto Leguizamón • ANÁLISIS DEL PROCESAMIENTO DE LOS DATOS DE ENTRADA PARA UN LOCALIZADOR DE FALLAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN / Walter Julián Gil-González / Juan José Mora-Flórez / Sandra Milena Pérez-Londoño • INSPECCIÓN DE CALIDAD PARA UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN INDUSTRIAL BASADO EN EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES / Andrés Jaramillo Ortiz / Robinson Jiménez M. / Olga Lucía Ramos • RELACIONES DE APRENDIZAJE SIGNIFICATIVO ENTRE DOS PARADIGMAS DE PROGRAMACIÓN A PARTIR DE DOS LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN / Omar Iván Trejos Buriticá • COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS DENSAS A PARTIR DEL ENSAYO DE VIGA SEMICIRCULAR SIMPLEMENTE APOYADA / Luis Alberto Paredes Chérrez / Óscar Javier Reyes Ortiz / Javier Fernando Camacho Tauta • ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE EL NIÑO Y LA NIÑA EN LA OFERTA HÍDRICA MENSUAL DE LA CUENCA DEL RÍO CALI / Álvaro Javier Ávila-Díaz / Yesid Carvajal Escobar / Sergio Enrique Gutiérrez Serna • MODELOS URBANOS TRIDIMENSIONALES GENERADOS A PARTIR DE NUBES DE PUNTOS DE UN ESCÁNER LÁSER TERRESTRE / Hernán Porras Díaz / Jhon Jairo Cáceres Jiménez / Elver Omar Gallo Lancheros

Modelo test-bed de simulación y evaluación de criptografía de Curva elíptica en redes IPV6 de próxima generación

Análisis del procesamiento de los datos de entrada para un localizador de fallas en sistemas de distribución

Inspección de calidad para un sistema de producción industrial basado en el procesamiento de imágenes



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Consulte la colección completa de REVISTA TECNURA en <http://tecnura.udistrital.edu.co>



Revista Tecnura • ISSN 0123-921X • Volumen 18 - Número 41 • UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Bogotá D.C. ISSN 0123-921X • Volumen 18 - Número 41 • Julio - Septiembre de 2014

Categoría A2
Publindex

Tecnura

Tecnología y Cultura, Afirmando el Conocimiento

Volumen 18 - No. 41
julio - septiembre, 2014
p-ISSN: 0123-921X
e-ISSN: 2248-7638

TECNURA JOURNAL
Edition 18 - Number 41
July - September, 2014
p-ISSN: 0123-921X
e-ISSN: 2248-7638



**UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
Facultad Tecnológica**

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 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

COMITÉ CIENTÍFICO

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

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

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

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

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

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

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

EVALUADORES

Ph. D. Carlos Felipe Urazan Bonells
Universidad de La Salle, Colombia

Ph. D. Edwin Rivas Trujillo
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Ph. D. Gustavo Adolfo Isaza Echeverry
Universidad de Caldas, Colombia

Ph. D. Hector Fernando Cancino De Greiff
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

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

Ph. D. Lilia Edith Aparico Pico
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Ph. D. Nestor Dario Duque Méndez
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Ph. D. Paola Andrea Niño Suárez
Escuela Superior de Ingeniería Eléctrica y Mecánica Unidad
Azcapotzalco, México

Ph. D. Pedro Limón Covarrubias
Universidad de Guadalajara, México

Ph. D. Roberto Ferro Escobar
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Ph. D. Rubén Darío Hernández Velaño
Universidad Piloto de Colombia, Colombia

M.Sc. Andrés Ricardo Herrera Orozco
Universidad Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

M.Sc. César Augusto Hernández Suárez
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

M.Sc. César Augusto Orozco Henao
Universidad Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

M.Sc. Diego Renza Torres
Universidad Militar Nueva Granada, Colombia

M.Sc. Esmeide Alberto Leal Narváez
Universidad Autónoma del Caribe, Colombia

M.Sc. Leonardo Plazas Nossa
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

M.Sc. Lina Mabel Castro Heredia
Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile

M.Sc. Luis Eduardo Peña Rojas
Universidad de Ibagué, Colombia

M.Sc. Marco Antonio Jinete Gomes
Universidad Antonio Nariño, Colombia

Esp. Sheyla Belén Olaya Aldana
Contact Center Americas, Colombia

ASISTENTES DE LA REVISTA *TECNURA*

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

PORTADA

“Grises”, Bogotá - Colombia
Fotografía: María Camila García

CONTRAPORTADA

“Grises”, Bogotá - Colombia
Fotografía: María Camila García

PREPARACIÓN EDITORIAL Y DISEÑO

Editorial Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Miembro Asociación de Editoriales Universitarias de
Colombia - ASEUC

DIRECCIÓN

Rubén Eliecer Carvajalino Carvajalino

COORDINACIÓN EDITORIAL

María Elvira Mejía Pardo

CORRECCIÓN DE ESTILO PARA ESPAÑOL

Alejandra Hurtado

CORRECCIÓN DE ESTILO PARA INGLÉS

Ing. Felipe Forero Rodríguez

DIAGRAMACIÓN ELECTRÓNICA

Y DISEÑO DE CUBIERTA

Carlos Vargas Salazar- Kilka diseño gráfico

IMPRESIÓN

Imprenta Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Formato: 21,5 cm x 28 cm

Papel: Bond 75g

Fuente: Times New Roman

Tiraje: 400 ejemplares

REVISTA *TECNURA*

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

PERIODICIDAD

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

COBERTURA TEMÁTICA

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

MISIÓN

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

PÚBLICO OBJETIVO

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

INDEXACIÓN

Tecnura es una publicación de carácter académico indexada en el Índice Bibliográfico Nacional Publindex (IBN) de Colciencias (Colombia) en la categoría A2, en los índices regionales Scielo Colombia (Colombia) y Redalyc (México); además de las siguientes bases bibliográficas: INSPEC del Institution of Engineering and Technology (Inglaterra), Fuente Académica Premier de EBSCO (Estados Unidos), CABI (Inglaterra), 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) y Ulrich de Proquest (Estados Unidos).

FORMA DE ADQUISICIÓN

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

SUSCRIPCIÓN

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

DECLARACIÓN DE ÉTICA Y BUENAS PRÁCTICAS

La revista *Tecnura* está comprometida con altos estándares de ética y toma las medidas posibles para evitar las malas prácticas como el fraude y el plagio. Todos los autores deben declarar que sus artículos enviados son originales, inéditos y de su autoría, a través de una carta firmada para ser considerados por el Comité Editorial. La revista *Tecnura* también se compromete a garantizar una justa y objetiva revisión de los artículos a través del sistema de evaluación de doble ciego. Los autores reconocen que han dado a conocer cualquier conflicto real o potencial de intereses con su trabajo o de beneficios parciales asociados, a través de la cesión de derechos.

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. César Augusto García Ubaque, Ph. D.,
director y editor de la revista *Tecnura*.

Sala de Revistas, bloque 5, oficina 305.

Facultad Tecnológica.

Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Transversal 70B No. 73A-35 sur.

Teléfono: 571-3238400, extensión: 5003.

Celular: 57-3153614852.

Bogotá, D. C., Colombia.

Correo electrónico: tecnura@udistrital.edu.co,

tecnura@gmail.com

Tecnura en Internet: <http://tecnura.udistrital.edu.co>



**UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
Facultad Tecnológica**

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. Carlos Felipe Urazan Bonells
Universidad de La Salle, Colombia

Ph. D. Edwin Rivas Trujillo
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Ph. D. Gustavo Adolfo Isaza Echeverry
Universidad de Caldas, Colombia

Ph. D. Hector Fernando Cancino De Greiff
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

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

Ph. D. Lilia Edith Aparico Pico
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Ph. D. Nestor Dario Duque Méndez
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Ph. D. Paola Andrea Niño Suárez
Escuela Superior de Ingeniería Eléctrica y Mecánica Unidad
Azcapotzalco, México

Ph. D. Pedro Limón Covarrubias
Universidad de Guadalajara, México

Ph. D. Roberto Ferro Escobar
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Ph. D. Rubén Darío Hernández Velaño
Universidad Piloto de Colombia, Colombia

M.Sc. Andrés Ricardo Herrera Orozco
Universidad Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

M.Sc. César Augusto Hernández Suárez
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

M.Sc. César Augusto Orozco Henao
Universidad Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

M.Sc. Diego Renza Torres
Universidad Militar Nueva Granada, Colombia

M.Sc. Esmeide Alberto Leal Narváez
Universidad Autónoma del Caribe, Colombia

M.Sc. Leonardo Plazas Nossa
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

M.Sc. Lina Mabel Castro Heredia
Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile

M.Sc. Luis Eduardo Peña Rojas
Universidad de Ibagué, Colombia

M.Sc. Marco Antonio Jinete Gomes
Universidad Antonio Nariño, Colombia

Esp. Sheyla Belén Olaya Aldana
Contact Center Americas, Colombia

TECNURA JOURNAL ASSISTANTS

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

TITLE PAGE

“Grey”, Bogotá - Colombia
Photograph: Maria Camila Garcia

BACK COVER

“Grey”, Bogotá - Colombia
Photograph: Maria Camila Garcia

EDITORIAL AND DESIGN PREPARATION

Editorial Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Member Association of University Editorial of Colombia -
ASEUC

DIRECTED BY

Rubén Eliecer Carvajalino Carvajalino

EDITORIAL COORDINATION

María Elvira Mejía Pardo

STYLE CORRECTION IN SPANISH

Alejandra Hurtado

STYLE CORRECTION IN ENGLISH

Ing. Felipe Forero Rodríguez

ELECTRÓNIC LAYOUT AND TITLE PAGE DISEGN

Carlos Vargas Salazar- Kilka diseño gráfico

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

TECNURA JOURNAL

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 electrical, 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) and Ulrich of Proquest (United States).

FORM OF ACQUISITION

Tecnura journal is available through purchase, exchange or subscription.

SIGN UP

The unit price of the journal is 6 USD (the price does not include 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.

DECLARATION OF ETHICS AND GOOD PRACTICES

As a scientific journal, Tecnura is committed to the highest ethical standards, and so it is our duty to take all possible actions to prevent inappropriate practices like fraud and plagiarism. All authors must clearly state that the materials sent to the journal are original, unpublished, and correspond to the ideas of the authors, by submitting a letter signed with their names. This letter is to be considered by the editorial committee. Tecnura is also committed to guarantee fair and unbiased revision of all articles by implementing a double-blind revision system. Authors must also acknowledge any factual or potential conflict of interest with their job or position within an organization, or any other conflict of collateral partial benefits, by signing a cession-of-rights letter.

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 - 3238400, extension: 5003
Cell phone Number: 57 - 3153614852
Bogotá D.C., Colombia
E-mail: tecnura@udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com
Tecnura on internet: <http://tecnura.udistrital.edu.co>

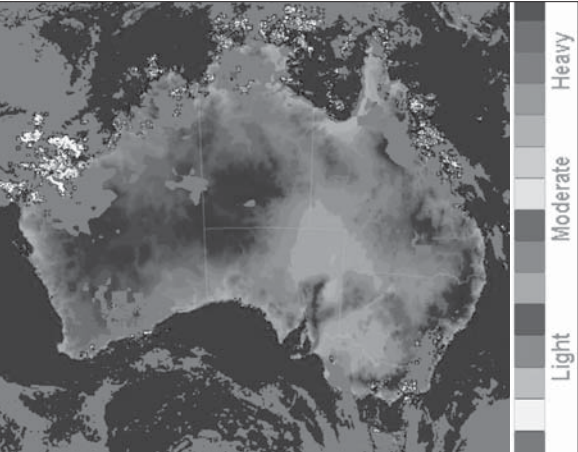


Revista *Tecnura*
 Volumen 18 - Número 41
 p-ISSN: 0123-921X
 e-ISSN: 2248-7638
 Julio-Septiembre de 2014

TABLA DE CONTENIDO

EDITORIAL 8

INVESTIGACIÓN

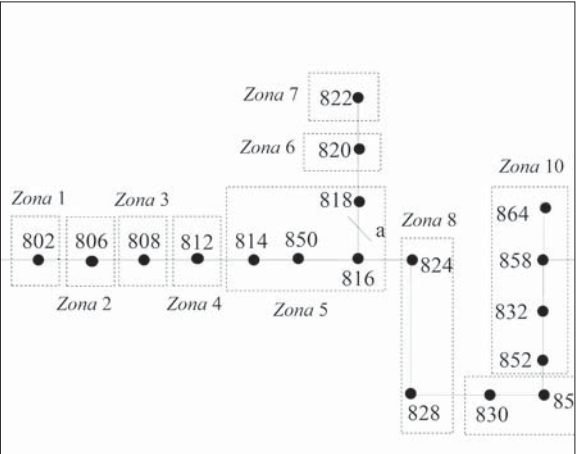


CALIBRACIÓN DE IMÁGENES DE RADARES METEOROLÓGICOS 12
Calibration of weather radar images
 Virgilio Santander Socorras Quintero / Ernesto Gómez Vargas / Nelson Obregón Neira

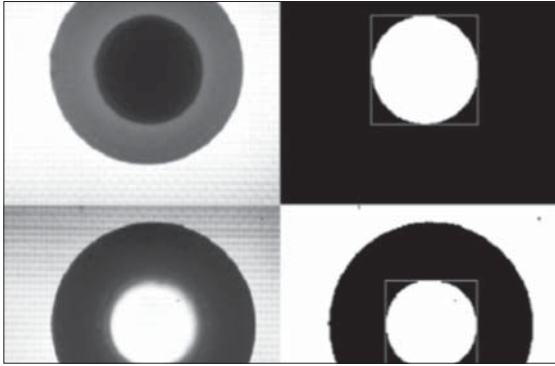
MODELO TEST-BED DE SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN DE CRIPTOGRAFÍA DE CURVA ELÍPTICA EN REDES IPV6 DE PRÓXIMA GENERACIÓN 27
Simulation test-bed for the evaluation of elliptic curve cryptography on next generation wireless ipv6-enabled networks
 Nelson Enrique Vera Parra / Danilo Alfonso López / Héctor Cristyan Manta Caro

MEJORAMIENTO DE LA TÉCNICA ATPM PARA REDUCCIÓN DE INTERFERENCIA EN SISTEMAS DE BANDA ANCHA POR LÍNEA DE POTENCIA EN RESIDENCIAS 38
Improvement of the atpm technique for interference reduction in systems of broadband by power line in residences
 José Roberto Cárdenas Castiblanco

ESTIMACIÓN DE LA CANTIDAD DE POTENCIA SUMINISTRADA POR LAS CELDAS FOTOVOLTAICAS DE UN CUBESAT 53
Estimation of power delivered by photovoltaic cells of a cubesat
 Jesús D. González Llorente / Gustavo A. Puerto Leguizamón

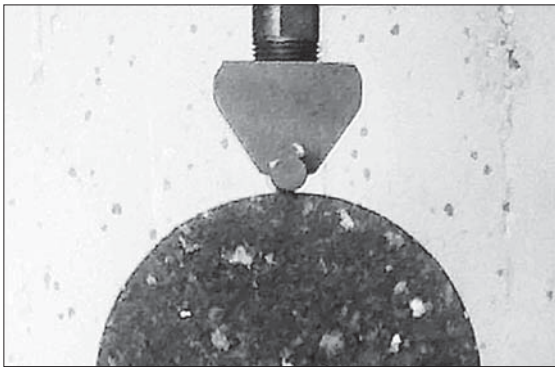


ANÁLISIS DEL PROCESAMIENTO DE LOS DATOS DE ENTRADA PARA UN LOCALIZADOR DE FALLAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN 64
Analysis of the input data processing for fault location in power distribution systems
 Walter Julián Gil González / Juan José Mora Flórez / Sandra Milena Pérez Londoño



INSPECCIÓN DE CALIDAD PARA UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN INDUSTRIAL BASADO EN EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES **76**
Quality inspection based on image processing for an industrial production system
 Andrés Jaramillo Ortiz / Robinson Jiménez M. / Olga Lucía Ramos

RELACIONES DE APRENDIZAJE SIGNIFICATIVO ENTRE DOS PARADIGMAS DE PROGRAMACIÓN A PARTIR DE DOS LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN **91**
Meaningful learning strategy between two programming paradigms using two programming languages
 Omar Iván Trejos Buriticá



COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS DENSAS A PARTIR DEL ENSAYO DE VIGA SEMICIRCULAR SIMPLEMENTE APOYADA **103**
Behavior of dense asphalt mixtures by the simply supported semicircular beam
 Luis Alberto Paredes Chérrez / Óscar Javier Reyes Ortiz / Javier Fernando Camacho Tauta

ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE EL NIÑO Y LA NIÑA EN LA OFERTA HÍDRICA MENSUAL DE LA CUENCA DEL RÍO CALI **120**
El niño and la niña analysis influence in the monthly water supply at Cali River basin
 Alvaro Javier Ávila Díaz / Yesid Carvajal Escobar / Sergio Enrique Gutiérrez Serna

REVISIÓN



MODELOS URBANOS TRIDIMENSIONALES GENERADOS A PARTIR DE NUBES DE PUNTOS DE UN ESCÁNER LÁSER TERRESTRE **134**
Three-dimensional urban models generated from point clouds of a terrestrial laser scanner
 Hernán Porras Díaz / Jhon Jairo Cáceres Jiménez / Elver Omar Gallo Lancheros

ANEXOS

INSTRUCCIONES PARA LOS AUTORES **154**

ÍNDICE PERIÓDICO DE AUTORES **176**

ÍNDICE PERIÓDICO DE ARTÍCULOS **184**

SUSCRIPCIÓN **186**

EDITORIAL

El análisis de la historia y la geografía del país desde el punto de vista ambiental, muestran que lo que hoy es Colombia antes era un país de selvas, sabanas, humedales, páramos y casi ningún desierto. Sin embargo, por causa del uso que la sociedad le ha dado a esos territorios y sus recursos naturales a lo largo de la historia, gran parte de estos ecosistemas ha sido reemplazado por potreros, cultivos, asentamientos humanos y obras de infraestructura.

Lo anterior ha dejado consecuencias tan evidentes como la reducción notable de la posibilidad de caza y pesca, la escasez de maderas, gran cantidad de suelos empobrecidos, reducción de la capacidad de regular aguas y clima, disminución de la biodiversidad y amenazas de destrucción para algunos ecosistemas entre otros. Paradójicamente, este empobrecimiento de nuestro territorio no ha enriquecido a la sociedad en general (salvo algunas personas beneficiadas por esta explotación).

Los ecologistas manejan tres premisas sobre los procesos de transformación¹ de los ecosistemas en Colombia:

- *La sociedad influye sobre la naturaleza*, dado que el ser humano ha conducido a la transformación y al deterioro de los ecosistemas.
- *La naturaleza influye en la sociedad*: los ecosistemas y recursos naturales incidieron en la forma como el país fue ocupado y en su devenir económico y social.
- *Las transformaciones inducidas por la sociedad en la naturaleza se revierten sobre la sociedad y viceversa*: los ecosistemas del país que encontramos hoy en día, son el resultado de los procesos sociales, políticos y económicos a lo largo de su historia y el estado actual de los ecosistemas afectarán y determinarán estos mismos procesos.

Según Márquez (2003), la relación entre la sociedad y los ecosistemas a lo largo de nuestra historia, en los últimos 500 años, se explica en las siguientes fases:

- Abundancia de recursos y escasez de mano de obra (época de la Conquista y la primera fase colonial).

¹ Transformación: cambios en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas naturales que son reemplazos por otros con diferente oferta ambiental.

- Equilibrio entre los recursos que disminuyen, mientras la población aumenta (final de la Colonia y primeros años de independencia).
- Transición a la escasez de recursos y abundancia de mano de obra (finales del siglo XIX).
- Abundancia de tierras y escasez de recursos naturales con exceso de mano de obra (situación actual).

Para algunos autores como el mismo Márquez, la concentración de la tierra en unos pocos es explicada como consecuencia de la abundancia de recursos naturales y la poca población en las primeras etapas de la historia de Colombia. Una parte de la sociedad logró tener el control de la tierra y los recursos naturales para explotarlos. Esta apropiación excluyente fue el generador del conflicto social no resuelto, que se ha manifestado en migraciones, pobreza y violencia a lo largo de nuestra historia.

Esta situación se ha agudizado en los últimos 80 años, con la modificación en la relación recursos naturales-mano de obra, donde los recursos naturales han disminuido mientras que la población ha aumentado, en un entorno con estructuras sociales que persisten y otras cuyos cambios han sido dramáticos. Este planteamiento lleva a concluir que en nuestro país existe una conexión muy estrecha entre la abundancia inicial de recursos naturales, su apropiación y destrucción a lo largo de su historia, y la situación social, económica y política que se vive hoy.

En la situación futura que algunos vislumbran para el país, este se enfrenta a la escasez absoluta de recursos renovables y no renovables por causa del deterioro ambiental, el exceso de población y demanda creciente de servicios ambientales como aire, agua y suelo, haciendo más grande aun las inequidades sociales. Este panorama nos debe obligar como nación a la búsqueda de la armonía entre las necesidades de desarrollo económico y social con un manejo adecuado de los recursos (desarrollo sostenible), para lo cual la educación y la formación integral son fundamentales.

César Augusto García Ubaque
Director

The analysis of history and geography of the country from an environmental point of view, show that Colombia was a country of jungles, savannas, wetlands, moors and no deserts. However because of land use that the society has given to those territories and their natural resources throughout history, much of these ecosystems have been replaced by pastures, crops, human settlements and infrastructure.

This has left obvious consequences like noticeable reduction of hunting and fishing possibilities, wood scarcity, impoverished soils, deregulation of water and climate cycles, biodiversity decrease and some ecosystems destruction threats. Paradoxically, our soil impoverishment has not enriched the general population (except some people benefit from this exploitation).

Ecologists propose three premises about the processes of ecosystems transformation¹ in Colombia:

- *Society influences the nature:* the human being has led ecosystems transformation and deterioration.
- *Nature influences in society:* ecosystems and natural resources influence land use and their economic and social future.
- *Transformations induced by society in nature are reversed on society and vice versa:* the country ecosystems that we find today are the result of social, political and economic processes and the current state of the ecosystems will affect and determine these same processes in the future.

According to Marquez 2003, relationship between society and ecosystems throughout the last 500 years in our country is explained by the following stages:

- Resources abundance and labor shortage (conquest and the colonial phase).
- Balance between resources decrease, while population increases (end of colony and early independence).
- Transition to resource scarcity and abundance of labor (late 19th century).

¹ Transformation: changes in the structure and functioning of natural ecosystems, replaced by others with different environmental offer.

- Land abundance and natural resources scarcity with labor excess (current situation).

Some authors, including Marquez, consider land concentration in a few people, as a consequence of natural resources abundance and small population in the early stages of Colombia history. A small part of the population was able to control and exploit the land and natural resources. This exclusionary appropriation was the generator of our unresolved social conflict, which have manifested in migration, poverty and violence.

This situation has worsened in the last 80 years, because of the modification in natural resources - labor relation. Natural resources have declined while population has increased, with social structures that persist and others whose changes have been dramatic. This approach shows a close connection between the initial natural resources abundance and their appropriation and destruction pattern along its history with the social, economic and political situation nowadays.

In the future, Colombia can confront an absolute scarcity of renewable and non-renewable resources because of environmental deterioration, excessive population and increasing demand for environmental services, such as air, water and soil, deepening social inequities. This scenario must face the nation to search harmony between economic needs and social development with an adequate resources management (sustainable development). To achieve this goal, education and training are fundamental.

César Augusto García Ubaque

Director

Calibración de imágenes de radares meteorológicos

Calibration of weather radar images

VIRGILIO SANTANDER SOCORRAS QUINTERO

Ingeniero Electrónico y de Telecomunicaciones. Estudiante de Maestría en Te-
leinformática, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia.
Contacto: vsscarrasq@correo.udistrital.edu.co

ERNESTO GÓMEZ VARGAS

Ingeniero Electrónico, Magíster en Teleinformática. Facultad de Ingeniería, Uni-
versidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia.
Contacto: egomezvargas@udistrital.edu.co

NELSON OBREGÓN NEIRA

Ingeniero Civil, Doctorado en Hidráulica. Facultad de Ingeniería, Pontificia Uni-
versidad Javeriana. Bogotá, Colombia.
Contacto: nobregon@javeriana.edu.co

Fecha de recepción: 14 de marzo de 2013

Clasificación del artículo: investigación

Fecha de aceptación: 23 de noviembre de 2013

Financiamiento: Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Palabras clave: fusión de imágenes, histograma, segmentación de imágenes, transforma-
da wavelet discreta.

Key words: Discrete wavelet transform, histogram, image fusion, image segmenta-
tion.

RESUMEN

En este documento se ilustran las técnicas de fu-
sión de imágenes para complementar y calibrar
la información meteorológica presente en imá-
genes de radares terrestres con el uso de imágenes
satelitales meteorológicas. Para realizar la cali-
bración de las imágenes de radares terrestres se
implementó un método de fusión de imágenes

basado en la herramienta matemática transforma-
da wavelet discreta. Ya que existe una familia de
wavelets, es necesario determinar cuál wavelet
ofrece el mejor resultado; para esto se determi-
na la correlación existente entre los resultados de
fusión de diferentes wavelets y las imágenes uti-
lizadas en cada fusión. Se define una metodología
para selección de umbral global de segmentación
y una metodología para realizar la calibración de

las imágenes de radares terrestres. Siguiendo la metodología de calibración de imágenes, se generan algunos resultados y se muestran sus ventajas.

ABSTRACT

This paper shows the image fusion techniques to complement and calibrate weather radar images present in terrestrial using meteorological satellite images. To calibrate the images weather radar images implemented a fusion method was used discrete wavelet transform (DWT) math-

ematics tool. As there is a family of wavelets, wavelets is necessary to determine which offers the best results, and it was determined, with the correlation between the results of different wavelet and fusion of the images used in each fusion. We defined a methodology for selecting global threshold segmentation and a methodology for calibration of terrestrial radar images. Following the methodology of calibration images, some results are generated and displayed its advantages. The methodology of calibration images, some results are generated and displayed its advantages.

* * *

INTRODUCCIÓN

El funcionamiento de un radar meteorológico está basado en radiaciones de ondas electromagnéticas que luego son reflejadas por los cuerpos (blancos) en el espacio. La energía reflejada por los blancos es recibida por el radar y convertida en datos digitales para ser procesados por un *software* especializado que interpreta y genera productos como: imágenes de reflectividad Z, toques de ecos, acumulaciones, indicador de plan de posición, etc.

En el cielo hay más que lluvia, nieve y viento; otros objetos (migración de aves, insectos a bajas altitudes, montañas, edificaciones, aeronaves, etc.) pueden ser mal interpretados como lluvia por el radar meteorológico. Es posible eliminar algunos falsos ecos con equipos más complejos en el postratamiento de datos, los cuales usan reflectividad de radares Dopplero mapas de ecos falsos (Zhiying *et al.*, 2010); pero en última instancia el ojo humano entrenado es el que puede distinguir estos objetos, utilizando para ello las características especiales que los diferencian de un fenómeno meteorológico. No obstante, en ocasiones el ojo humano falla y se generan falsas alertas metrologías (tornados, huracanes, tormentas, etc.), que generan retrasos en el trans-

porte aéreo, impacto económico y pánico en la población supuestamente afectada por el fenómeno meteorológico.

Existen nubes precipitantes y no precipitantes; una nube no precipitante puede estar formada por pequeñas gotas de agua o por pequeños cristales de hielo, que se mantienen suspendidos en el aire (Rinehart, 2004). Cuando hay cambios de temperatura o fuertes corrientes de aire, las pequeñas gotas de agua en las nubes pueden crecer y la nube puede convertirse en precipitante rápidamente. Se podría decir que las nubes no precipitantes son de gran importancia para una buena predicción del clima. Pero los radares meteorológicos están limitados para detectar este tipo de nubes, ya que solo detectan nubes precipitantes. Con la fusión de imágenes de radares meteorológicos y las imágenes de satélites geoestacionarios de operación ambiental (GOES) se podrían obtener imágenes con nubes precipitantes y no precipitantes de una región y, además, calibrar la imagen de los radares meteorológicos terrestres para que se muestre la menor cantidad de ecos falsos en la imagen y así poder mejorar la representación del estado del clima.

En la primera parte del artículo se muestra el esquema metodológico para realizar la calibración

de imágenes; en la segunda parte se muestra una explicación del método de segmentación empleado y el método de calibración de imágenes y, finalmente, se muestran los resultados obtenidos con la transformada wavelet discreta seleccionada.

METODOLOGÍA

Método de calibración de imágenes

El método de calibración planteado para integrar la información de las imágenes satelitales meteorológicas con las imágenes de radares meteorológicos terrestres está basado en la segmentación por umbralización, en la transformada wavelet discreta y la familia de wavelets. Para realizar la calibración de las imágenes de radar se crearon los siguientes pasos:

- Filtrar imágenes satelitales: ya que las imágenes satelitales contienen objetos no meteorológicos, estos interfieren con la segmentación de las imágenes satelitales. Para mejorar de alguna manera la imagen digitales necesario hacer un pre-procesamiento de la imagen, y así prepararla para una posterior segmentación. Este primer paso se realiza con un filtro digital píxel a píxel, que retira cualquier objeto que interfiera con la segmentación de las nubes presentes en las imágenes. En este caso en particular el procedimiento solo se hace en las imágenes satelitales, ya que son las únicas que cuentan con objetos (desiertos, montañas, ríos, etc.) que interfieren con la extracción de las nubes.
- Segmentar imágenes satelitales: en este procedimiento se realiza la extracción de las nubes presentes en las imágenes satelitales. La extracción se hace con el método de umbralización de niveles de grises; se define un umbral único y se realiza una comparación píxel a píxel para dejar solo nubes en la imagen.
- Ajustar dimensiones de imágenes: para poder fusionar las imágenes es necesario que estas tengan la misma dimensión. A simple vista pareciera que son iguales, pero las imágenes de radar obtenidas son ligeramente más pequeñas, y es necesario ajustarlas a las dimensiones de las imágenes satelitales.
- Seleccionar wavelet: se selecciona una wavelet diferente de la familia de wavelets (Haar, Daubechies, Symlet, Biortogonal, Coiflet, Discrete Meyer y Reverse Biortogonal) en cada iteración, hasta implementar las todas.
- Obtención de los coeficientes wavelet de las imágenes: en este procedimiento se utilizan las wavelets seleccionadas en el paso anterior, para descomponer las imágenes en los coeficientes de aproximación, detalle horizontal, detalle vertical y detalle diagonal.
- Combinar los coeficientes wavelet de las imágenes: en este procedimiento se implementa un criterio de calibración y un criterio de fusión (máximos, mínimos, media aritmética, etc.) para combinar los coeficientes de las imágenes de radar con los de las imágenes satelitales.
- Aplicar la transformada inversa wavelet: en este último procedimiento se reconstruye una imagen de los coeficientes wavelet combinados, para poder obtener y visualizar la imagen de radar calibrada.

Método de selección de umbral de segmentación

Para realizar la segmentación de las nubes es necesario escoger el umbral global óptimo. Para realizar esta elección se diseñó una metodología, que sigue los siguientes pasos:

- Filtrar imagen satelital: este primer paso se realiza con un filtro digital píxel a píxel, que retira cualquier objeto que interfiera con la

segmentación de las nubes de las imágenes. En este caso en particular, el procedimiento solo se hace en la imagen satelital, ya que es la única que cuenta con objetos (desiertos, montañas, ríos, etc.) que interfieren con la extracción de las nubes las imágenes.

- Segmentar imagen con umbral de prueba: en este procedimiento se realiza la extracción de las nubes presentes en las imágenes satelitales con varios umbrales.
- Segmentación con el *software* Sistema de Información Geográfico (SIG) Integrated Land and Water Information System (ILWIS): se realiza la segmentación de las nubes con el método de clustering, que consiste básicamente en agrupar píxeles similares (Kim *et al.*, 2013; Saraswathi y Allirani, 2013; Isa *et al.*, 2009). La imagen resultado de este paso va a ser usada como referencia (valor esperado) para medir la efectividad de la segmentación con diferentes umbrales.
- Calcular el error cuadrático medio: como criterio de evaluación de la segmentación conseguida con cada umbral de prueba, se mide el promedio de los cuadrados de las diferencias entre los valores pronosticados y observados. Ver ecuación (1).

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (I_i - I'_i)^2 \quad (1)$$

En este paso se calcula el error cuadrático medio entre los valores de la imagen segmentada con un umbral de prueba (valores obtenidos) y los valores de la imagen segmentada con el *software* ILWIS (valores esperados). Y se obtiene una medida que permite medir la similitud entre las dos imágenes segmentadas (Arathi y Soman, 2009).

- Por último se compara cada uno de los errores obtenidos hasta encontrar el mejor umbral.

PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

El procesamiento digital de imágenes es un conjunto de técnicas que busca mejorar la calidad de las imágenes para la interpretación humana, y facilitar la búsqueda de información en las imágenes. Esto surgió desde que se cuenta con tecnología necesaria para captar y manipular grandes cantidades de información espacial en forma de matrices de valores (Esqueda y Palafox, 2005). Para el análisis de imágenes existen dos dominios, el espacial y el de la frecuencia, en el dominio espacial se opera directamente sobre los píxeles con técnicas como: filtros pasa bajos espacial (suaviza la imagen), filtro pasa altos (aumenta el contraste), filtros detección de bordes, filtro de dirección. En el dominio de la frecuencia contamos con herramientas como: transformada de Fourier, transformada discreta coseno y transformada wavelet.

En el dominio de la frecuencia las imágenes son representadas por la suma de señales periódicas con diferentes frecuencias (Esqueda y Palafox, 2005). Con el procesamiento en el dominio de la frecuencia es posible realizar eficiente y eficazmente la eliminación de ruido en imágenes (Biswas y Om, 2013; Parmar y Patil, 2013), búsqueda de información en las imágenes, fusión de imágenes (Sruthy *et al.*, 2013; Pradnya y Sachin, 2013; Kaplan y Erer, 2013), compresión de imágenes (Xie *et al.*, 2013), amplificación de imágenes, etc.

Segmentación por umbralización de niveles de grises

La segmentación permite identificar secciones comunes en la imagen, sin descartar las características relevantes en esta (Díaz y de Haro, 2004). De una buena segmentación se pueden obtener mejores resultados en el análisis o el procesamiento de las imágenes. El nivel de segmentación se realiza hasta obtener los objetos deseados. Para poder

realizar la segmentación debe existir una similitud entre los píxeles del objeto y una diferencia con el resto (Alam *et al.*, 2013). Los algoritmos de segmentación de imagen que utilizan los niveles de gris de la imagen se concentran en dos propiedades básicas: discontinuidad y similitud entre los niveles de gris de los píxeles vecinos (Zafra, 2008). En esta investigación se desea separar las nubes del resto de objetos (ríos, lagos, mar, continente, montañas) presentes en la imagen, y el método de segmentación por umbralización niveles de grises permite realizar esta tarea (Gómez *et al.*, 2013; Wenlong *et al.*, 2009).

La segmentación por umbralización de niveles de grises tiene como objetivo resaltar las regiones de características similares en una imagen. Este método trabaja bien cuando los objetos de la imagen tienen una intensidad de grises que los distinguen del fondo de la imagen (Zafra, 2008; Xiang *et al.*, 2004). El histograma se construye calculando para cada nivel de grises el número de píxeles en la imagen que tienen ese nivel de grises (Angulo y Serra, 2005). Al analizar el histograma se puede definir el umbral. Este umbral podría ser el punto medio entre los dos máximos principales del histograma, o podría obtenerse de manera óptima maximizando la varianza entre clases (método de Otsu), mediante una búsqueda exhaustiva (Pepsi y Mala, 2013). Con el umbral (T) se toma la imagen en escala de grises, $f(x,y)$ y se convierte todo lo que pertenece al objeto en 1 y lo que pertenece al fondo en 0, consiguiendo con esto una imagen binarizada. Cuando el objeto es más claro que el fondo se aplica la ecuación (2).

$$g(x,y) = \begin{cases} 1 & \leftrightarrow f(x,y) > T \\ 0 & \leftrightarrow f(x,y) \leq T \end{cases} \quad (2)$$

Pero si el objeto es más oscuro que el fondo de la imagen se aplica la ecuación (3).

$$g(x,y) = \begin{cases} 1 & \leftrightarrow f(x,y) < T \\ 0 & \leftrightarrow f(x,y) \geq T \end{cases} \quad (3)$$

Ya que en esta investigación el objeto de interés son las nubes presentes en las imágenes y estas

son menos oscuras que el fondo, se podría utilizar la primera regla. Con la imagen binarizada $g(x,y)$ se puede separar el objeto del resto de la imagen y conseguir el objetivo final de la segmentación. Este método de segmentación es el ideal para esta investigación, ya que existe una similitud en los niveles de grises de las nubes y una considerable diferencia entre los niveles de grises de las nubes y el fondo de las imágenes meteorológicas que se va a usar.

Transformada wavelet

La transformada de wavelet es una herramienta matemática que cuenta con la capacidad de analizar señales no estacionarias y de rápida transitoriedad; para lograr esto el análisis espectral de la señal se realiza dependiendo del tiempo (Dragotti y Vetterli, 2003). Su funcionamiento es similar al de la transformada de Fourier con ventana, donde la señal es dividida en segmentos de tiempo (ventana) y se puede aplicar la transformada de Fourier localmente. La diferencia entre estas dos herramientas es que en la transformada de wavelet la ventana no es fija y se adapta a las frecuencias de la señal. Con dicha diferencia la transformada de wavelet obtiene un mejor comportamiento con este tipo de señales. Además del análisis local de señales no estacionarias, esta herramienta es comúnmente usada en el procesamiento de imágenes, fusión, compresión y reconocimiento de patrones.

Una ventaja de esta transformada frente a otras técnicas matemáticas es que dispone de una amplia familia de transformadas que permiten tratar imágenes de diferentes índoles (Hernández, 2010).

La wavelet es una pequeña onda que tiene una característica de oscilación ondulatoria y una energía concentrada en el tiempo. En la figura 1 se muestra una ilustración de una onda sinusoidal y una wavelet.

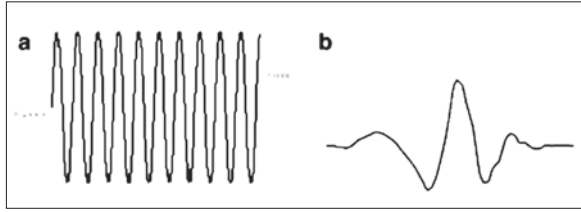


Figura 1. Representación de una señal y una wavelet.
a) Onda sinusoidal y b) una wavelet

Fuente: tomada de Gao y Yan (2010).

La principal diferencia entre una onda y una wavelet es que una onda usualmente es de forma regular y suave, y puede ser eterna, mientras que una wavelet puede ser de forma irregular y normalmente dura un periodo límite. Una wavelet puede servir como una plantilla determinista y no determinista para analizar variables en el tiempo o señales no estacionarias por descomposición de la señal en el dominio del tiempo y la frecuencia (Gao y Yan, 2010; Fernández, 2007).

Matemáticamente una wavelet es una función de cuadrado integrable $\psi(t)$, que satisface la condición de admisibilidad. Ver ecuación (4).

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\psi(t)|^2}{|t|} dt < \infty \quad (4)$$

La transformada wavelet está compuesta por unas funciones base llamadas wavelets. Esta familia de wavelets es generada a partir de la wavelet madre $\psi(t)$, con la ecuación (5) por medio de translación y dilatación.

$$\psi_{s,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad (5)$$

S es el factor de dilatación y τ es el factor de translación.

La transformada wavelet de una función $f(t)$ es la descomposición de $f(t)$ en un conjunto de funciones $\psi_{s,\tau}(t)$ llamadas wavelets. La transformada wavelet se define mediante la ecuación (6).

$$w_f(s,\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{s,\tau}^*(t) dt \quad (6)$$

Reemplazando la ecuación (5) en la ecuación (6) se obtiene la ecuación (7).

$$w_f(s,\tau) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^*\left(\frac{t-\tau}{s}\right) dt \quad (7)$$

En general con la transformada wavelet de la ecuación (7) se pueden extraer características de una señal, que no serían reveladas en su forma original. Por último, para recuperar la señal original $f(t)$ existe la transformada wavelet inversa, que corresponde a una integral de los parámetros a y b . Ver ecuación (8).

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} w_f(s,\tau) \psi^*\left(\frac{t-\tau}{s}\right) dt \right) ds \quad (8)$$

RESULTADOS CALIBRACIÓN DE IMÁGENES

En esta investigación se utilizan imágenes satelitales del continente australiano, que se encuentra ubicado en el hemisferio sur entre los océanos Índico y Pacífico, entre las latitudes 9°S y 44°S y entre las longitudes 112°E y 154°. Se usarán imágenes GOES infrarrojas combinadas con imágenes estáticas de la superficie de la tierra y el océano del continente australiano. Las imágenes infrarrojas son derivadas de la radiación emitida por la tierra y su atmósfera en longitudes de onda del infrarrojo térmico (10-12 micras). Son imágenes de onda corta (IRCH2) que permiten tener una percepción de la nubosidad existente sin importar la luz solar (operativa de noche) y proporcionan información sobre la temperatura las nubes. Estas imágenes se combinarán con imágenes de radares meteorológicos terrestres de la misma zona geográfica. Las imágenes de los radares contienen información de reflectividad Z en decibelio (dBZ), que muestran la intensidad de lluvia que se encuentra en el radio de alcance de cada radar. Para la implementación de esta técnica de segmentación se desarrolló un *software* en Matlab, que permite cargar la imagen de radar y de satélite correspondientes al mismo espacio de tiempo.

Tabla 1. Resultados de error cuadrático medio entre la imagen segmentada con el software ILWIS y la segmentación hecha en MATLAB a diferentes umbrales

Imagen	UB=70	UB=82	UB=93	UB=116	UB=127
Img 1	1,4933	5,1693	6,1273	7,1674	7,4727
Img 2	1,4391	5,2999	6,3022	7,3887	7,7023
Img 3	1,4128	5,3266	6,4467	7,721	8,1176
Img 4	1,393	5,3316	6,6699	7,7707	8,0562
Img 5	1,3352	5,1817	6,5207	7,5873	7,8925
Img 6	0,894	3,4022	5,131	7,8351	9,0107
Img 7	1,2409	4,6639	6,1086	6,9756	7,2929
Img 8	1,188	4,7587	6,0856	8,1701	9,0094
Img 9	1,197	4,3187	5,8123	7,8313	9,037
Img 10	1,1239	4,3137	6,575	8,4736	9,1
Promedio	1,27172	4,77663	6,17793	7,69208	8,26913

Fuente: elaboración propia.

El primer objetivo en la investigación es segmentar las nubes de la imagen satelital. Ya que la segmentación es por umbralización y es necesario escoger un umbral global óptimo. Siguiendo la metodología de selección de umbral, se realizó la segmentación de 10 imágenes con 5 umbrales diferentes; cada segmentación se comparó con la segmentación hecha en la herramienta ILWIS, y se obtuvo los resultados de la tabla 1.

Si se observan los resultados de los promedios de errores cuadráticos medios de la tabla 1, se puede determinar que el 12,71 %, que se obtuvo con un umbral de 70 y con 10 imágenes, es determinante para escogerlo como el umbral global óptimo de segmentación.

En la investigación se encontró un problema al segmentar las nubes de la imagen de la figura 2. Estas imágenes satelitales meteorológicas cuentan con un suelo que se confunde con las nubes durante el proceso de segmentación. A pesar de que en Gómez *et al.*, 2013 se comprobó que la técnica de segmentación por umbralización es la

óptima para segmentar las nubes de una imagen satelital GOES, esto no aplica para algunas imágenes de ciertas partes de mundo. Para las imágenes de esta investigación es necesario realizar un prefiltrado.

Se diseñó un filtro que trabaja píxel a píxel sobre la imagen satelital original en color, sobre los tres planos (RGB) de la imagen, con el objetivo de no dejar pasar los objetos con un patrón de colores diferentes al de las nubes.

En la figura 3 vemos el resultado de aplicar el filtro digital a la imagen de la figura 2, y podemos observar que todo el continente australiano es retirado de la imagen y así evitamos que los tonos del suelo interfieran con la segmentación de las nubes.

Con la imagen satelital filtrada podemos realizar la segmentación (ver figura 4) y conseguir que el umbral para la segmentación sea un poco más bajo y se pueda extraer la mayor cantidad de nubes.

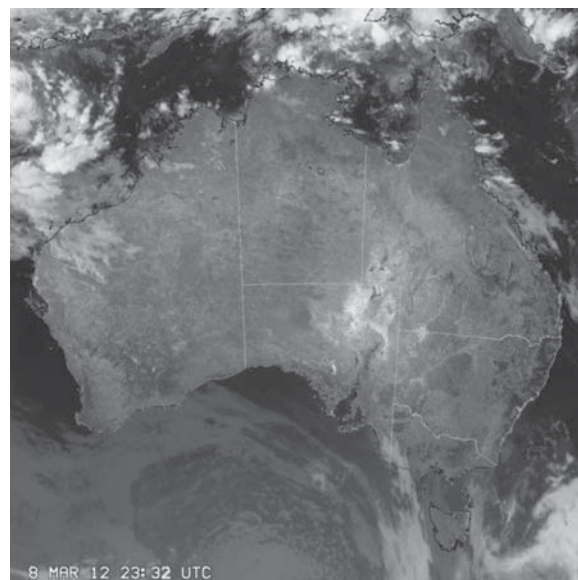


Figura 2. Imagen meteorológica de Australia del 9 de marzo de 2012

Fuente: tomada del sitio web http://www.bom.gov.au/products/national_radar_sat.loop.shtml.

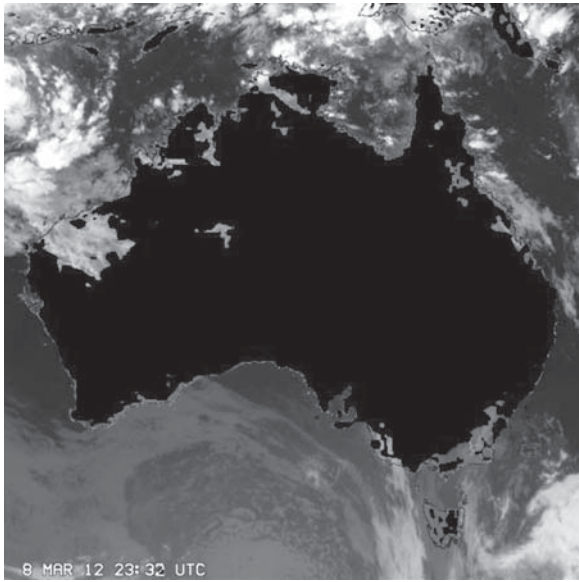


Figura 3. Resultado del filtro digital aplicado a la imagen de la figura 2

Fuente: elaboración propia.

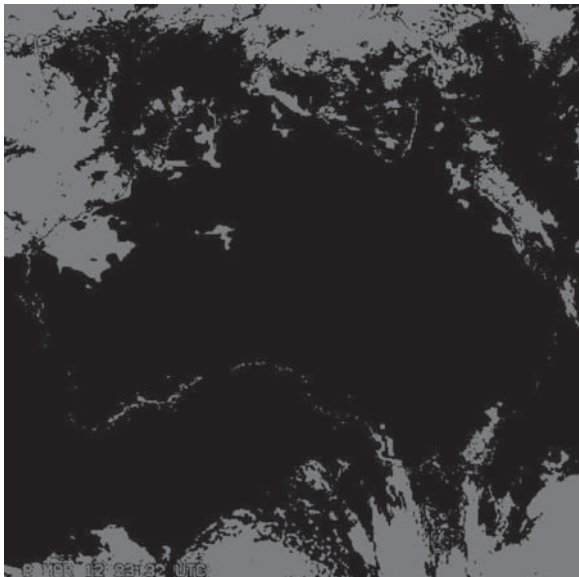


Figura 4. Segmentación de la imagen de la Figura 3 con un umbral de 70

Fuente: elaboración propia.

En la figura 4 se nota cómo después de filtrada la imagen de la figura 2 se pueden obtener mejores resultados en la segmentación de las nubes. Ya es

posible extraer únicamente la información de nubosidad presente en la imagen, de esta manera se logra el primer objetivo.

Con la imagen satelital segmentada podemos hacer la fusión con la imagen de radar. Para realizar la fusión por medio de wavelet es necesario utilizar una función madre. Existe una familia de wavelets de las que seleccionamos las que son comúnmente utilizadas para fusionar imágenes: Discrete Meyer, Haar, Daubechies, Biorthogonal, Reverse Biorthogonal y Coiflets.

De igual manera, existen varios criterios de fusión de píxeles que define la forma en que interactúan los píxeles de las imágenes por fusión. Entre estos métodos tenemos los siguientes:

- Linear: $C = A * \text{paramMETH} + B * (1 - \text{paramMETH})$, donde $0 \leq \text{paramMETH} \leq 1$.
- Max : $D = \text{abs}(A) \text{abs}(B)$; $C = A(D) + B(\sim D)$
- Min $D = \text{abs}(A) \text{abs}(B)$; $C = A(D) + B(\sim D)$
- Mean : $C = (A+B) / 2$; $D = \text{ones}(\text{size}(A))$
- Rand : $C = A(D) + B(\sim D)$; D is a Boolean random matrix
- Img1 : $C = A$
- Img2 : $C = B$

Después de realizar varias pruebas con cada uno de estos criterios de fusión se pudo determinar, por medio de la correlación entre las dos imágenes origen y la fusionada, que el mejor método es “Max” para aproximaciones y detalles.

La correlación entre dos imágenes consiste en la identificación automática de puntos homólogos entre una o varias imágenes digitales. Esta correlación se calcula con la ecuación (8).

$$r = \frac{\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})(B_{mn} - \bar{B})}{\sqrt{(\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})^2)(\sum_m \sum_n (B_{mn} - \bar{B})^2)}} \quad (8)$$

Para encontrar la correlación entre la imagen de satélite y la imagen fusionada se tuvo en cuenta que estas imágenes están formadas por tres planos RGB (Red, Green, Blue), y es necesario encontrar la correlación de cada plano (ecuaciones (9), (10), (11) y (12)) para encontrar la correlación total entre las dos imágenes. Para encontrar la correlación de cada plano se utilizó una función de Matlab (*corr2*) que recibe como parámetro dos matrices y retorna la correlación entre estas dos matrices.

$$CorrR = corr2(MatrixRedSat, MatrixRedImgFus) \quad (9)$$

$$CorrG = corr2(MatrixGreenSat, MatrixGreenImgFus) \quad (10)$$

$$CorrB = corr2(MatrixBlueSat, MatrixBlueImgFus) \quad (11)$$

$$CorrSat = \frac{CorrR + CorrG + CorrB}{3} \quad (12)$$

Además las ecuaciones (9), (10), (11) y (12) se utilizan para encontrar la correlación de la imagen fusionada con la imagen de radar. Como último paso se encuentra el promedio entre la correlación de la imagen fusionada y la imagen satelital y la correlación de la imagen fusionada y la imagen de radar, denominada correlación total como se muestra en la ecuación (13).

$$CorrTotal = \frac{CorrSat + CorrRadar}{2} \quad (13)$$

La ecuación (13) permite determinar qué tan parecida es la imagen fusionada con las imágenes (imagen de radar y la imagen satelital) que la generaron. Esta medida es un buen indicador de la calidad del método de fusión, ya que indica qué tanta información se logró pasar a la imagen fusionada de las dos originales.

Se realizaron pruebas con cada una de wavelets mencionadas con 100 imágenes de radar y satélites; se evaluó la efectividad de la fusión con cada una de la familia de wavelets por medio del promedio de la correlación existente entre la imagen fusionada y la imagen de radar y la imagen satelital. Aunque la diferencia no es mucha, en la tabla 2 se ve claramente que la wavelet que conserva mejor la información de las imágenes de radares y de satélites en el proceso de fusión es Biorthogonal 2.2.

A continuación vamos a ver una serie de resultados de calibración de imágenes de radar generados con el *software* implementado. Se mostrará una imagen de radar, una imagen de satélite y el resultado, respectivamente.

Tabla 2. Valores de correlación de las primeras 50 imágenes utilizadas en la figura 10 para diferentes wavelets

Imagen	Daubechies 2	Haar	Biorthogonal 2.2	Reverse Biorthogonal 2.2	Coiflets 2	Discrete Meyer
IMAGEN_1	0,7150	0,7164	0,7208	0,7069	0,7147	0,7135
IMAGEN_2	0,7047	0,7053	0,7103	0,6968	0,7036	0,7021
IMAGEN_3	0,7096	0,7109	0,7156	0,7020	0,7089	0,7076
IMAGEN_4	0,7257	0,7263	0,7310	0,7170	0,7246	0,7234
IMAGEN_5	0,7151	0,7157	0,7235	0,7046	0,7148	0,7136
IMAGEN_6	0,7214	0,7219	0,7295	0,7106	0,7211	0,7201
IMAGEN_7	0,7294	0,7296	0,7388	0,7179	0,7296	0,7283
IMAGEN_8	0,7282	0,7290	0,7372	0,7167	0,7284	0,7269
IMAGEN_9	0,6807	0,6815	0,6835	0,6780	0,6805	0,6796
IMAGEN_10	0,6843	0,6854	0,6881	0,6784	0,6836	0,6822
IMAGEN_11	0,6883	0,6894	0,6917	0,6832	0,6880	0,6866

Continúa

IMAGEN_12	0,6694	0,6705	0,6722	0,6660	0,6691	0,6681
IMAGEN_13	0,6686	0,6698	0,6713	0,6656	0,6683	0,6670
IMAGEN_14	0,7574	0,7578	0,7625	0,7494	0,7569	0,7559
IMAGEN_15	0,7557	0,7558	0,7602	0,7473	0,7550	0,7540
IMAGEN_16	0,7546	0,7556	0,7601	0,7474	0,7548	0,7539
IMAGEN_17	0,7548	0,7554	0,7602	0,7470	0,7544	0,7535
IMAGEN_18	0,6985	0,6987	0,7000	0,6953	0,6978	0,6973
IMAGEN_19	0,7030	0,7036	0,7046	0,6991	0,7020	0,7012
IMAGEN_20	0,7072	0,7081	0,7092	0,7028	0,7066	0,7052
IMAGEN_21	0,7088	0,7096	0,7111	0,7048	0,7085	0,7075
IMAGEN_22	0,6892	0,6902	0,6932	0,6839	0,6883	0,6868
IMAGEN_23	0,6949	0,6954	0,6980	0,6895	0,6939	0,6926
IMAGEN_24	0,6987	0,6991	0,7020	0,6924	0,6974	0,6962
IMAGEN_25	0,6999	0,7014	0,7044	0,6944	0,6995	0,6982
IMAGEN_26	0,7351	0,7354	0,7399	0,7292	0,7351	0,7342
IMAGEN_27	0,7387	0,7389	0,7433	0,7322	0,7382	0,7375
IMAGEN_28	0,7434	0,7443	0,7491	0,7368	0,7434	0,7423
IMAGEN_29	0,7449	0,7450	0,7491	0,7385	0,7442	0,7434
IMAGEN_30	0,6837	0,6843	0,6856	0,6801	0,6833	0,6827
IMAGEN_31	0,6820	0,6827	0,6840	0,6786	0,6817	0,6809
IMAGEN_32	0,6792	0,6797	0,6809	0,6754	0,6785	0,6777
IMAGEN_33	0,6772	0,6778	0,6791	0,6733	0,6766	0,6759
IMAGEN_34	0,6968	0,6971	0,6986	0,6928	0,6960	0,6952
IMAGEN_35	0,6962	0,6970	0,6986	0,6926	0,6957	0,6947
IMAGEN_36	0,6940	0,6949	0,6963	0,6910	0,6940	0,6931
IMAGEN_37	0,6946	0,6951	0,6964	0,6911	0,6940	0,6932
IMAGEN_38	0,6941	0,6942	0,6955	0,6901	0,6930	0,6922
IMAGEN_39	0,6957	0,6962	0,6978	0,6922	0,6954	0,6946
IMAGEN_40	0,6970	0,6974	0,6995	0,6930	0,6966	0,6957
IMAGEN_41	0,6983	0,6985	0,7003	0,6939	0,6978	0,6971
IMAGEN_42	0,6979	0,6987	0,7012	0,6934	0,6980	0,6970
IMAGEN_43	0,7009	0,7012	0,7036	0,6963	0,7006	0,6997
IMAGEN_44	0,6992	0,6998	0,7019	0,6950	0,6991	0,6982
IMAGEN_45	0,6978	0,6985	0,7006	0,6932	0,6976	0,6968
IMAGEN_46	0,6978	0,6989	0,7007	0,6936	0,6980	0,6970
IMAGEN_47	0,7154	0,7160	0,7174	0,7097	0,7146	0,7135
IMAGEN_48	0,7185	0,7189	0,7210	0,7114	0,7173	0,7160
IMAGEN_49	0,7192	0,7200	0,7232	0,7125	0,7185	0,7171
IMAGEN_50	0,7262	0,7275	0,7296	0,7197	0,7256	0,7245

Fuente: elaboración propia.

investigación

En la figura 5 se encuentra una imagen de radar con información anómala que se ve como líneas rectas saliendo de la base del radar; están en la parte superior izquierda de la imagen.

Al pasar las imágenes de la figuras 5 y 6 por el proceso de calibración, se genera el resultado mostrado en la figura 7.

En este caso el algoritmo de calibración detecta que el radar muestra una información que no corresponde con la del satélite y realiza los ajustes donde es necesario. En este caso se realizó en la parte superior izquierda del continente australiano.

La imagen de radar de la figura 8 también contiene información anómala e información certera del estado del clima.

Al pasar las imágenes de la figuras 8 y 9 por el proceso de calibración se genera el resultado mostrado en la figura 10. En esta se ve cómo el algoritmo de calibración detecta las anomalías en la imagen de radar y realiza la calibración correspondiente; en este caso se ve en la parte inferior derecha del continente.

En los resultados se aprecia visualmente que todas las imágenes obtenidas contienen mayor información que la imagen de radar original. La información de la red de radares es complementada y calibrada con la información de nubosidad presente en la imagen satelital meteorológica. La información de la imagen satelital en ningún momento se sobrepone a la información de los radares y no altera la información de color de los radares donde es considerada como correcta.

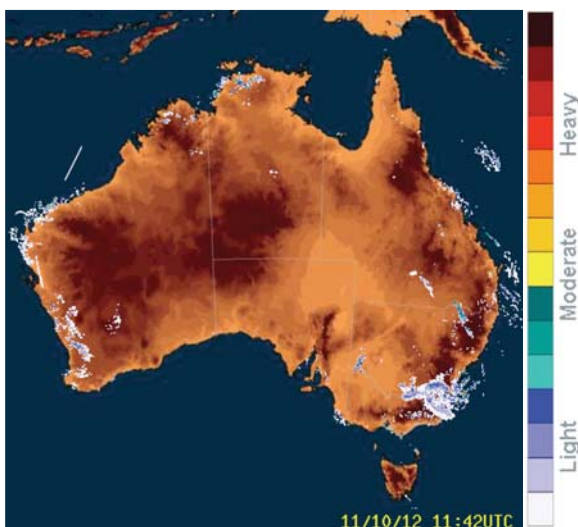


Figura 5. Imagen de la distribución de reflectividad Z de la red de radares meteorológicos del continente australiano

Fuente: tomada del sitio web http://www.bom.gov.au/products/national_radar_sat.loop.shtml.

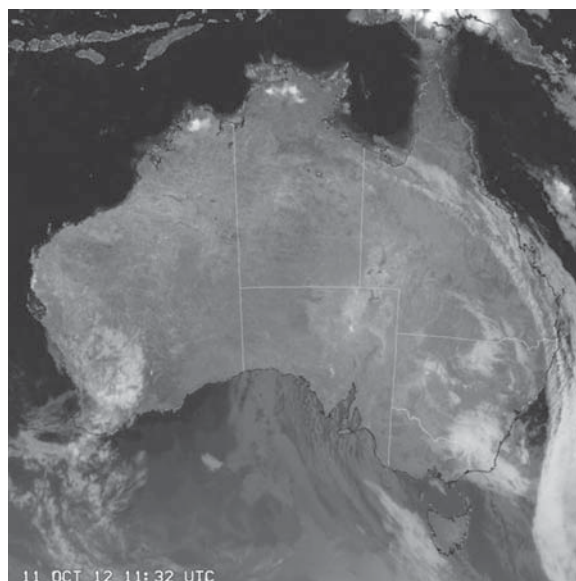


Figura 6. Imagen satelital meteorológica del continente australiano

Fuente: tomada del sitio web http://www.bom.gov.au/products/national_radar_sat.loop.shtml.

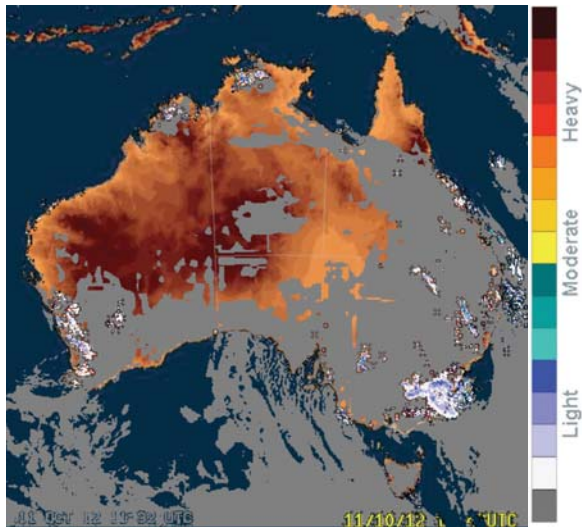


Figura 7. Imagen fusionada con wavelet Biorthogonal de nivel 2 y con criterio de fusión, el valor absoluto máximo para las aproximaciones y detalles de las imágenes

Fuente: elaboración propia.

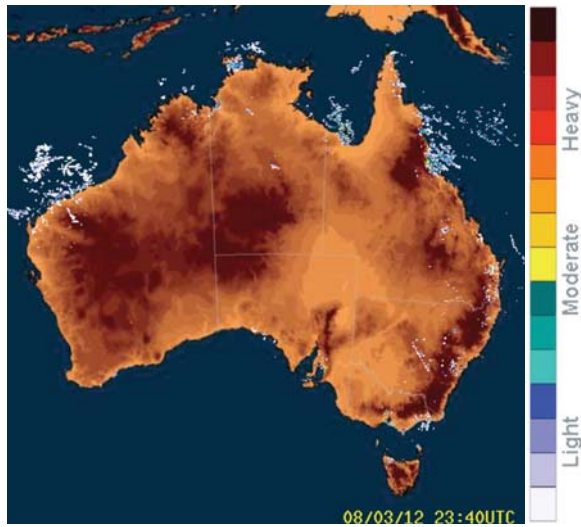


Figura 8. Imagen de la distribución de reflectividad Z de la red de radares meteorológicos del continente australiano

Fuente: tomada del sitio web http://www.bom.gov.au/products/national_radar_sat.loop.shtml.

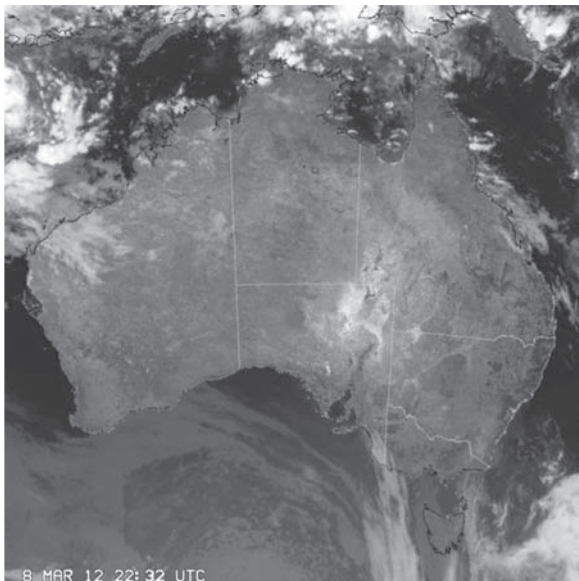


Figura 9. Imagen satelital meteorológica del continente australiano

Fuente: tomada del sitio web http://www.bom.gov.au/products/national_radar_sat.loop.shtml.

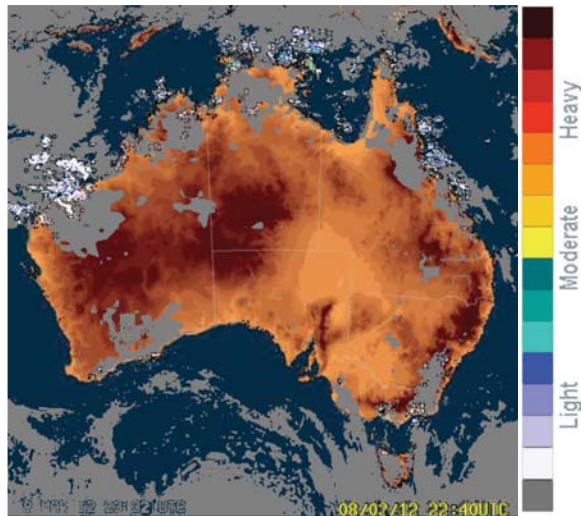


Figura 10. Imagen fusionada con wavelet Biorthogonal de nivel 2 y con criterio de fusión, el valor absoluto máximo para las aproximaciones y detalles de las imágenes

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

Si bien el método de segmentación por umbralización es óptimo para extraer las nubes de una imagen satelital meteorológica, existen zonas con objetos que tienen niveles de grises muy parecidos o iguales a los niveles de gris de las nubes; esto hace imposible realizar una segmentación con buenos resultados. Por esta razón, antes de realizar la segmentación de nubes en una imagen GOES se debe analizar la zona de estudio y realizar primero el preprocesamiento necesario.

Al realizar la fusión de imágenes con diferentes wavelets, se obtuvieron valores de correlación muy similares, con los que se pudo establecer que la wavelet que conserva la mayor cantidad de información en la imagen fusionada es la Biorthogonal 2.2. El hecho de que se obtuvieran valores de correlación muy parecidos indica que todas las wavelet utilizadas (Haar, Biorthogonal, Coiflets,

Daubechies, Discrete Meyer y Reverse Biorthogonal) son muy buenas integrando información procedente de dos imágenes.

Así como es importante elegir la mejor wavelet para fusionar las imágenes, también se debe escoger un buen criterio de combinación de píxeles para lograr una buena fusión. En esta investigación se escogió el método de máximos para los coeficientes de aproximaciones y los de detalles, y se logró mantener la información de reflectividad Z y nubosidad en la imagen fusionada de manera eficiente.

Las imágenes de radares que fueron calibradas con el método propuesto tienen información meteorológica más acorde al verdadero estado del tiempo. Con estas imágenes los meteorólogos no tendrán que evaluar qué información del radar es verdadera o falsa, ya que estas imágenes están libres de ecos falsos y de reflexiones anómalas, y permiten hacer mejores pronósticos del tiempo.

REFERENCIAS

- Alam, F.I., Chowdhury, M.I.H., Rabbani, M.R. y Bappee, F.K. (2013). *An Optimized Image Segmentation Algorithm*. Informatics, Electronics & Vision (ICIEV), International Conference, pp. 1-6. DOI: 10.1109/ICIEV.2013.6572644
- Arathi, T. y Soman, K.P. (2009). *Performance Evaluation of Information Theoretic Image Fusion Metrics over Quantitative Metrics*. *Advances in Recent Technologies in Communication and Computing*. ARTCom '09, International Conference, pp. 225-227. DOI: 10.1109/ARTCom.2009.192
- Angulo, J. y Serra, J. (2005). Segmentación de imágenes en color utilizando histogramas bi-variables en espacios color polares luminancia/ saturación/ matiz. *Computación y Sistemas*, 8(4), 303-316.
- Biswas, M. y Om, H. (2013). *An Adaptive Wavelet Thresholding Image Denoising Method*. Communications (NCC), National Conference, pp. 1-5. DOI: 10.1109/NCC.2013.6488014
- Díaz, C. y de Haro, F. (2004). *Técnicas de exploración en medicina nuclear*. España: Elsevier Masson.
- Dragotti, P. y Vetterli, M. (2003). Wavelet Footprints: Theory, Algorithms, and Applications. *IEEE Transaction on Signal Processing*, 51(5), 1306-1323.

- Esqueda, J., y Palafox, L. (2005). *Fundamento de procesamiento de imágenes*. México: Departamento Editorial de la Universidad Autónoma de Baja California.
- Fernández, A. (2007). *Estudio de técnicas basadas en la transformada wavelet y optimización de sus parámetros para la clasificación por textura de imágenes digitales*. (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Valencia, España. Recuperado el 10 de octubre de 2012, de <http://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/1955/tesisUPV2573.pdf>
- Gómez, E., Obregón, N., y Rocha, D. (2013). Métodos de segmentación de nubes en imágenes satelitales. *Tecnura*, 17(36), 95-110.
- Gao, R., y Yan, R. (2010). *Wavelets Theory and Applications for Manufacturing*. New York: Springer.
- Hernández, R. (2010). *Procesamiento digital de imágenes de ultrasonido*. (Tesis de pregrado). Instituto Politécnico Nacional, México. Recuperado el 15 de diciembre de 2012, de <http://itzamna.bnct.ipn.mx/dspace/bitstream/123456789/8591/1/582.pdf>
- Isa, N.A.M., Salamah, S.A., y Ngah, U.K. (2009). Adaptive Fuzzy Moving K-means Clustering Algorithm for Image Segmentation. *Consumer Electronics IEEE Transactions*, 55, 2145-2153. DOI: 10.1109/TCE.2009.5373781
- Kim, K., Zhang, D., Kang, M., y Ko, S. (2013). Improved Simple Linear Iterative Clustering Superpixels. *Consumer Electronics (ISCE)*, IEEE 17th International Symposium, pp. 259-260. DOI: 10.1109/ISCE.2013.6570216
- Kaplan, N.H., y Erer, I. (2013). *An Additive Empirical Mode Decomposition Based Method for The Fusion of Remote Sensing Images*. Recent Advances in Space Technologies (RAST), 6th International Conference, pp. 165-169. DOI: 10.1109/RAST.2013.6581193
- Pepsi, M., y Mala, K. (2013). *Similarity Search On Metric Data Of Outsourced Lung Images*. Green High Performance Computing (ICGHPC), IEEE International Conference, pp. 1-6. DOI: 10.1109/ICGHPC.2013.6533912
- Pradnya, P.M., y Sachin, D.R. (2013). *Wavelet Based Image Fusion Techniques*. Intelligent Systems and Signal Processing (ISSP), International Conference, pp. 77-81. DOI: 10.1109/ISSP.2013.6526878
- Parmar, J.M., y Patil, S.A. (2013). *Performance Evaluation and Comparison of Modified Denoising Method and the Local Adaptive Wavelet Image Denoising Method*. Intelligent Systems and Signal Processing (ISSP), International Conference, pp. 101-105. DOI: 10.1109/ISSP.2013.6526883
- Rinehart, R. (2004). *Radar for Meteorologists* (Fifth Edition). Rinehart Publishing.
- Sruthy, S., Parameswaran, L., y Sasi, A.P. (2013). *Image Fusion Technique Using DT-CWT*. Automation, Computing, Communication, Control and Compressed Sensing (iMac4s), International Multi-Conference, pp. 160-164. DOI: 10.1109/iMac4s.2013.6526400
- Saraswathi, S., y Allirani, A. (2013). *Survey on Image Segmentation Via Clustering*. Information, Communication and Embedded Systems (ICICES), International Conference, pp. 331-335. DOI: 10.1109/ICICES.2013.6508376
- Wenlong, F., Hong, L., y Zhihui, W. (2009). *Satellite Cloud Image Segmentation Based on the Improved Normalized Cuts Model*. Information Science and Engineering (ICISE), 1st

International Conference, pp. 1418-1421.
DOI: 10.1109/ICISE.2009.1044

Xiang, L., Ramachandran, R., He, M., Movva, S., Rushing, J., Graves, S., Lyatsky, W., Arjun, T. y Germany, G. (2004). *Comparing Different Thresholding Algorithms for Segmenting Auroras* *Information Technology: Coding and Computing*. Proceedings. ITCC. International Conference, 2, 594 - 601. DOI: 10.1109/ITCC.2004.1286718

Xie S., Wang, C. y Yang, Z. (2013). *Image Compression Using Wavelet Transform with Lifting Scheme and SPIHT in Digital Cameras for Bayer CFA*. *Wavelet Analysis and Pattern Recognition (ICWAPR)*, International

Conference, pp. 163-167. DOI: 10.1109/ICWAPR.2013.6599310

Zhiying, L., Huan, Z., Hongmin M. y Huizhen, J., (2010). *Hailstone Detection Based on Time Series Association Rules*. *Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD)*, Seventh International Conference, 5, 2143-2146. DOI: 10.1109/FSKD.2010.5569742

Zafra, C. (2008). *Análisis de métodos de procesamiento de imágenes estereoscópicas forestales*. (Tesis de maestría) .Universidad Complutense de Madrid, España. Recuperado el 10 de octubre de 2012, de http://eprints.ucm.es/10046/1/Carlos_Zafra_Fernandez_de_Tejada_Curso_2007-08.pdf

Modelo *test-bed* de simulación y evaluación de criptografía de curva elíptica en redes IPv6 de próxima generación

Simulation test-bed for the evaluation of elliptic curve cryptography on next generation wireless IPv6-enabled networks

NELSON ENRIQUE VERA PARRA

Ingeniero Electrónico, magíster en Teleinformática. Docente e investigador de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia.

Contacto: *neverap@udistrital.edu.co*

DANILO ALFONSO LÓPEZ

Ingeniero Electrónico, magíster en Teleinformática. Docente e investigador de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia.

Contacto: *dalopezs@udistrital.edu.co*

HÉCTOR CRISTYAN MANTA CARO

Ingeniero Electrónico, magíster en Teleinformática. Investigador de la Universidad de Granada. Granada, España.

Contacto: *cristyan.manta@gmail.com*

Fecha de recepción: 2 de marzo de 2013

Clasificación del artículo: investigación

Fecha de aceptación: 23 de noviembre de 2013

Financiamiento: Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Palabras clave: criptografía, curvas elípticas, redes móviles e inalámbricas, seguridad informática.

Key words: Cryptography, elliptic curves, information security, wireless networks.

RESUMEN

En la actualidad, las redes móviles e inalámbricas de nueva generación, tales como las redes de área personal IPv6 de baja potencia (6LoWPAN), redes de sensores inalámbricos sobre IPv6 y redes móviles IPv6 jerárquicas se encuentran bajo

rigurosa investigación y desarrollo, pues representan el paso por seguir en la evolución de las redes Machine-to-Machine (M2M), al tiempo que apoyan el acceso de banda ancha de la próxima generación de tecnologías y sistemas inteligentes sobre Internet futuro.

Estas redes de nueva generación imponen restricciones en cuanto al poder de procesamiento, ancho de banda y recursos de energía, lo que representa una gran limitante en la implementación de mecanismos de seguridad. En este sentido, en los últimos años han surgido diversas propuestas para la administración de claves, procedimientos de firma digital y cifrado de datos basados en curvas elípticas e hiper-elípticas, que logran niveles de seguridad equivalentes a los algoritmos convencionales basados en algoritmos *Diffie-Hellman* y *Rivest-Shamir-Adleman* (RSA), pero que reducen la longitud de clave y, por ende, los recursos computacionales y de red asociados.

Este artículo examina los algoritmos basados en criptografía de curvas elípticas (ECC) y su aplicación a redes móviles e inalámbricas de nueva generación habilitadas para IPv6. Así mismo, describe un modelo de simulación para la evaluación de ECC, donde se comparan los recursos computacionales necesarios y las limitaciones en mecanismos ligeros de seguridad.

ABSTRACT

Currently, mobile networks and next generation wireless networks such as, IPv6 low-power Wireless Personal Area networks 6LoWPAN, wireless

* * *

in secure neighbor discovery, and DNS security extensions.

INTRODUCCIÓN

Los avances en matemática aplicada, matemática discreta aplicada, criptografía de curva elíptica e hiperelíptica han permitido a lo largo de los últimos años el desarrollo y la estandarización de novedosos protocolos de seguridad y marcos de referencia (Blade *et al.*, 2005; Cohen *et al.*, 2006).

sensor networks and hierarchical mobile networks in IPv6, are under rigorous research and development, therefore those networks represent the next step in the evolution of the Machine-to-Machine M2M networks, while supporting broadband access for the next generation of intelligent systems, technologies and future Internet.

These next generation networks impose restrictions on the processing power, bandwidth and energy resources, which represents a major constraint in the implementation of security mechanisms. In this regard, in recent years there have been various proposals for key management, digital signature procedures and data encryption based on elliptic and hyper-elliptic curves, to achieve levels of safety equivalent to conventional algorithms based on Diffie-Hellman and Rivest-Shamir-Adleman RSA, but reducing the key length and thus the computational and network resources.

This paper reviews algorithms based on Elliptic Curves Cryptography ECC and their application to IPv6-enabled new generation wireless networks. This paper also describes a simulation test-bed for the evaluation of ECC, where we compare computational resources required and limitations for lightweight security mechanisms

La criptografía de curva elíptica puede proveer el mismo nivel y tipo de seguridad que los algoritmos convencionales RSA o *Diffie-Hellman* pero con claves mucho más cortas. A causa del tamaño de claves más cortas, los protocolos con base en ECC pueden ser implementados en *hardware* especializado como FPGA (Gwalani *et al.*, 2009) o tarjetas inteligentes sin el uso de coprocesadores matemáticos y empleando a cambio aceleradores computacionales. La longitud corta de las claves se traduce directamente a mecanismos de seguridad ligeros, a su vez, ECC se puede

convertir en un elemento para la próxima generación de comunicaciones inalámbricas habilitadas con soporte a IPv6.

Desde la definición de IPv6, el esquema de direccionamiento para la Internet del futuro, múltiples investigaciones se han llevado a cabo en el tema. Algunos de ellos han estudiado específicamente las aplicaciones de la ECC a IPv6 (Huang, 2008); sin embargo, donde ECC desempeña un papel clave en la seguridad es en entornos de recursos limitados y restringidos. En los últimos años, el escenario móvil de IPv6 ha sido objeto de continua investigación. Mobile IPv6 trae a la sociedad de la información un amplio espectro de posibilidades y aplicaciones, desde el comercio electrónico móvil, e-salud hasta los sistemas de gobierno electrónico.

Los sistemas inteligentes sobre IP, así como las redes de comunicación inalámbrica con el apoyo de Mobile IPv6 requieren estudios de vulnerabilidad en la etapa de implementación (Seo *et al.*, 2008), además de asegurar todos los principios y factores de autenticidad e identidad (Ehmke *et al.*, 2008), integridad, confidencialidad y demás. Como ejemplo, se encuentra un sistema de cifrado basado en identidad aplicada al control de la señalización en Mobile IPv6 (Ehmke *et al.*, 2008). Otros investigadores se han centrado en el análisis comparativo de los sistemas criptográficos para redes jerárquicas móviles IPv6 (Kandikattu *et al.*, 2008).

Este trabajo se organiza de la siguiente forma. En la sección I se presenta una revisión de los principales cripto-sistemas elípticos e hiper-elípticos, comenzando con una breve reseña de los aspectos matemáticos tras las curvas elípticas y luego describiendo los protocolos criptográficos basados en ECC, estrechamente relacionados con los mecanismos ligeros discutidos en este documento. En la sección II se presentan aplicaciones específicas de ECC en la definición de mecanismos de seguridad ligeros. En la sección III se describe

el planteamiento propuesto de modelo de simulación y evaluación. En la sección IV se describen las herramientas y procedimientos realizados. Finalmente, en la sección V se presentan y discuten los resultados y en la sección VI se concluye.

SISTEMAS CRIPTOGRÁFICOS CON BASE EN CURVAS ELÍPTICAS E HIPERELÍPTICAS

Fundamentos en aritmética de curvas elípticas e hiper-elípticas

Las curvas elípticas son una clase específica de curvas algebraicas (Cohen *et al.*, 2006).

Definición 1: una curva elíptica E sobre un cuerpo K denotado por E/K está dada por la ecuación (1) (ecuación de *Weierstrass*).

$$E: y^2 + a_1xy + a_3y = x^3 + a_2x^2 + a_4x + a_6 \quad (1)$$

Donde los coeficientes $a_1, a_2, a_3, a_4, a_6 \in K$ tal que para cada punto (x_1, y_1) con coordenadas en K satisfacen la ecuación (1), las derivadas parciales $2y_1 + a_1x_1 + a_3$ y $3x_1^2 + a_2x_1 + a_4 - a_1y_1$ no desaparecen simultáneamente. Para propósitos criptográficos se presentan curvas hiperelípticas cuadráticas.

Definición 2: una curva dada por la forma de la ecuación (2):

$$C: y^2 + h(x)y = f(x), h, f \in K[x], \quad (2)$$

$$\deg(f) = 2g, \deg(h) \leq g, f \text{ monic}$$

Se conoce como *curva hiper-elíptica de Genus g sobre K* si no hay punto de la curva sobre la clausura algebraica de \bar{K} de K que satisfaga ambas derivadas parciales $2y+h=0$ y $f'-h'y=0$. Las curvas elípticas pueden ser definidas sobre cualquier campo finito $GF(q)$, conocido como campo de *Galois*, donde q es referido como la característica del campo. Considerando solo campos primos $GF(q)$, donde p es un número primo, y $GF(2^m)$,

donde la característica es un polinomio primitivo binario de grado m . Una curva elíptica definida sobre un campo finito describe un conjunto finito de puntos, referidos como puntos en la curva.

En relación con la implementación de la criptografía de curva elíptica, esta puede ser descrita en un acercamiento de forma piramidal (Victorovich, 2010). Ver figura 1. En el segundo nivel de la pirámide se encuentran varios tipos de operaciones de punto de curva elíptica que permiten la manipulación de los puntos de la curva. La definición de la curva elíptica sobre un campo finito implica que por parte de las operaciones aritméticas de punto se emplea aritmética de campo finito, que se encuentra en el primer nivel. Las operaciones de punto de curva elíptica se pueden utilizar de tal manera que permitan la aritmética entre los puntos de curvas elípticas y los factores escalares, lo cual permite la creación del nivel de operaciones escalares de curva elíptica, a pesar de que solo una de esas operaciones se utiliza realmente en el ECC: multiplicación punto de curva elíptica.

En el nivel superior se encuentran las operaciones criptográficas de curva elíptica; esto es, los protocolos y algoritmos de cifrado, los cuales proporcionan mecanismos de seguridad y servicios como

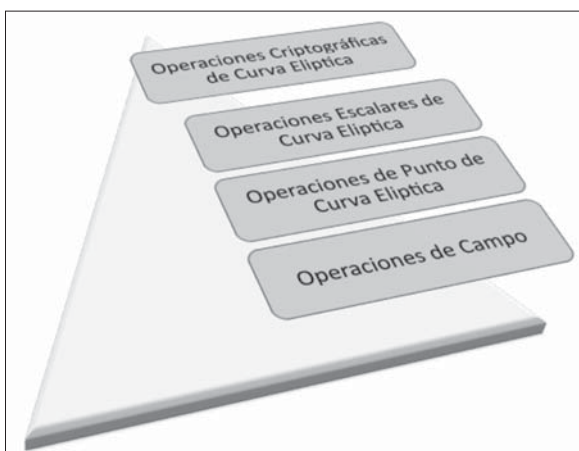


Figura 1. Criptografía de curva elíptica enfoque de implementación en pirámide

Fuente: elaboración propia.

cifrado de datos, autenticación, y la generación y verificación de firmas digitales. Todos ellos se basan en la multiplicación punto.

Protocolos criptográficos con base en curvas elípticas

Con base en la criptografía de curvas elípticas se ha propuesto un número significativo de algoritmos y protocolos, con el fin de direccionar principios de seguridad convencionales. Además, múltiples esfuerzos de normalización han tenido lugar, y muchos de estos estándares han reducido las opciones disponibles para la aplicación por medio de recomendación de ciertos parámetros, tales como curvas específicas o campos finitos específicos (Blake *et al.*, 2005). La idea detrás de las recomendaciones y los estándares es permitir la interoperabilidad entre sistemas criptográficos, y al mismo tiempo definir adecuadamente un conjunto de parámetros. El primer estándar ECC fue desarrollado en ANSI X9.62. Algunos de los estándares más importantes en el área del campo de ECC son:

- ANSI X9.62
- ANSI X9.63
- FIPS 186.2
- IEEE 1363
- ISO 15946-2
- SECG

ECC tiene también un papel clave en la internet futura, y de esta manera la Fuerza de Tarea de Ingeniería de Internet (IETF) ha publicado varios Request for Comments (RFC) en los que especifican lo siguiente: los roles de la criptografía de curva elíptica en la seguridad de capa de transporte TLS (Blake *et al.*, 2006; Badra *et al.*, 2009), ECC y su rol en Kerberos (Zhu *et al.*, 2008), ECC e esquemas de información de clave pública (Turner *et al.*, 2009), el algoritmo de firma digital con base en curva elíptica ECDSA y su papel

en infraestructura de clave pública (Dang *et al.*, 2010). Recientemente, la IETF publicó en febrero de 2011 una descripción de temas fundamentales de criptografía de curva elíptica contenidos en la RFC 6090 (McGrew *et al.*, 2011).

Algoritmo de firma digital de curva elíptica ECDSA

En 1992, el algoritmo ECDSA fue por primera vez propuesto por Scott A. Vanstone en respuesta a una solicitud de comentarios del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología y luego fue definido en la norma ANSI X9.62. ECDSA es un esquema de firma de variante *ElGamal*. Para ECDSA los parámetros del dominio están dados por (H, K, E, q, G) , donde H es una función *hash*, E es una curva elíptica sobre un campo finito K , y G es un punto en la curva de orden primo q . Por lo tanto, los parámetros de dominio definen una función *hash*, un grupo de orden q , y un generador de este grupo. El algoritmo de firma ECDSA se describe en la tabla 1. El algoritmo de verificación ECDSA se presenta en la tabla 2.

Algoritmo Diffie-Hellman de curva elíptica ECDH

El protocolo *Diffie-Hellman* DH permite el intercambio de llaves a dos pares de una comunicación

sobre un canal no seguro con el fin de acordar una llave secreta (McGrew *et al.*, 2011). El algoritmo DH fue originalmente definido en términos de operaciones en el grupo multiplicativo de un campo con característica prima. Una primera modificación fue realizada por Massey, quien definió el algoritmo en términos de un grupo cíclico arbitrario y, más tarde, se analizó el protocolo DH sobre un grupo de curva elíptica (Koblitz, 1987).

El algoritmo puede ser descrito así: primero las dos partes acuerdan en un conjunto de parámetros de dominio (K, E, q, h, G) de forma similar a ECDSA; luego, el protocolo sigue como se describe en las ecuaciones (3) y (4).

$$\text{Parte A} \quad a \xrightarrow{[a]G} [a]G \quad (3)$$

$$[b]G \xleftarrow{[b]G} b \quad \text{Parte B} \quad (4)$$

En segunda instancia, la parte A de la comunicación computa K_A , y la parte B computa K_B . Ver ecuaciones (5) y (6).

$$K_A = [a]([b]G) = [ab]G \quad (5)$$

$$K_B = [b]([a]G) = [ab]G \quad (6)$$

Tabla 1. Algoritmo 1: Firma ECDSA

Entrada:	Un mensaje m y una llave privada x .
Salida:	Una firma (r, s) sobre el mensaje m .
<ol style="list-style-type: none"> 1. Elegir $k \in \mathbb{R} \{1, \dots, q - 1\}$. 2. $T \leftarrow [k]G$. 3. $r \leftarrow f(T)$. 4. Si $r = 0$ entonces ir al Paso 1. 5. $e \leftarrow H(m)$. 6. $s \leftarrow (e + xr)/k \pmod{q}$. 7. Si $s = 0$ entonces ir al Paso 1. 8. Retornar (r, s). 	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Algoritmo 2: Verificación ECDSA

ENTRADA:	Un mensaje m , una llave pública Y y una firma (r, s) .
SALIDA:	Rechazar o Aceptar.
<ol style="list-style-type: none"> 1. Rechazar si $r, s \in \{1, \dots, q - 1\}$. 2. $e \leftarrow H(m)$. 3. $u_1 \leftarrow e/s \pmod{q}$, $u_2 \leftarrow r/s \pmod{q}$. 4. $T \leftarrow [u_1]G + [u_2]Y$. 5. Aceptar si y solo si $r = f(T)$. 	

Fuente: elaboración propia.

Puesto que $K_A = K_B$ y ambas partes han acordado en la misma clave privada. Los mensajes transferidos son frecuentemente referidos como llaves públicas efímeras, *ephemeralpublickeys*, ya que toman la forma de llaves públicas con base en logaritmos discretos, pero solo existen por un periodo corto. Dado $[a]G$ y $[b]G$, el problema de recuperar $[ab]G$ se denomina el problema *Diffie-Hellman* de curva elíptica, ECDHP. El protocolo ECDH particularmente consume un ancho de banda bajo si se emplea un punto de compresión; además, este es muy eficiente si se compara con la base estándar, el protocolo DH con base en campo finito.

APLICACIONES ECC: MECANISMOS DE SEGURIDAD LIGEROS

Descubrimiento seguro ligero de vecinos

El descubrimiento de vecinos de IPv6 definido por el IETF y la configuración automática de direcciones sin estado, en adelante denominados conjuntamente protocolos de descubrimiento de vecinos (NDP), no son adecuados en referencia a aspectos de seguridad y requieren optimizaciones para ambientes de recursos limitados de baja potencia, que operan en enlaces inalámbricos con alta probabilidad de pérdida como 6LoWPAN (Kushalnagar *et al.*, 2007; Sarikaya *et al.*, 2011). Las optimizaciones para el descubrimiento de Vecino en 6LoWPAN incluyen optimizaciones que deben ser simples (Kandikattu *et al.*, 2008).

Los protocolos NDP no son seguros, especialmente cuando la seguridad física en el enlace no está asegurada y es vulnerable a ataques (Kushalnagar *et al.*, 2007). El protocolo de descubrimiento de vecinos seguro (SEND) es definido para asegurar NDP. Las direcciones criptográficamente generadas CGA se utilizan en SEND. SEND exige el uso del algoritmo de firma RSA que es computacionalmente intenso y no es adecuado utilizarlo para nodos de bajo consumo de energía

y de recursos limitados (Sarikaya *et al.*, 2011). Por consiguiente, el uso de algoritmos de firma y clave pública RSA conllevan a tamaños de mensajes poco adecuados para su uso en enlaces de baja tasa de bits, de corto alcance, asimétricos y no transitivos, como 6LoWPAN.

En Sarikaya *et al.* (2011) se propone una ampliación del protocolo de descubrimiento de vecinos con CGA para 6LoWPAN. Los nodos generan CGA y registran estas direcciones con el enrutador por defecto. La generación de CGA se basa en ECC y la firma se calcula utilizando el algoritmo ECDSA con P-256. La curva por utilizar es la recomendación secp256r1 correspondiente al OID 1.2.840.10045.3.1.7. (Shelby *et al.*, 2010) y el cálculo de la función *hash* de la clave se basa en SHA-2. El protocolo resultante se denomina protocolo de descubrimiento de vecinos seguro ligero LSEND; la figura 2 ilustra el intercambio de mensajes en el protocolo LSEND.

Extensiones de seguridad a DNS

Las extensiones de seguridad para el servicio de nombres de dominio (DNSSEC) han sido ampliamente definidas por la IETF. DNSSEC utiliza cifrado de claves y firmas digitales para proporcionar autenticación de datos DNS. En Hoffman *et al.* (2011) se propone la extensión y la aplicación de la ECC para DNSSEC y la definición de dos nuevos algoritmos de firma: ECDSA con la curva P-256 (seguridad aproximada equivalente a RSA con llaves de 3072 bits) y SHA-256, y ECDSA con la curva P-384 y SHA-384, así como el empleo de registros de recursos RR, DNSKEY y RRSIG.

MODELO TEST-BED DE SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN

El objetivo principal de cualquier banco de pruebas o modelo *test-bed* es facilitar el estudio y la evaluación de las ideas que tienen una visión

promisoria en aplicaciones reales. De hecho, en una plataforma real existen también una o varias restricciones físicas de *hardware* y tal vez de otro tipo. Estas restricciones afectan al rendimiento de los algoritmos implementados. Con el fin de simular y evaluar nuevas ideas en el área de la seguridad informática en escenarios móviles, se ha diseñado e implementado un modelo *test-bed* de simulación realista. Este modelo permite la evaluación preliminar de nuevos paradigmas y sirve como base para extensiones y futuras investigaciones en el área de la criptografía de curva elíptica e hiperelíptica en escenarios con restricciones de procesamiento y memoria.

El modelo *test-bed* de simulación y evaluación está construido sobre los pilares de cuatro curvas elípticas *secp256k1*, *secp256r1*, *secp384r1* y *secp521r1* (Certicom Research, 2010), cuyos parámetros fundamentales han sido seleccionados según normatividad y su discusión se encuentra en la siguiente subsección "Propiedades de los parámetros recomendados de curva elíptica de dominio sobre". Con base en estos se implementa el algoritmo de firma digital ECDSA descrito en la subsección "Algoritmo de firma digital de curva

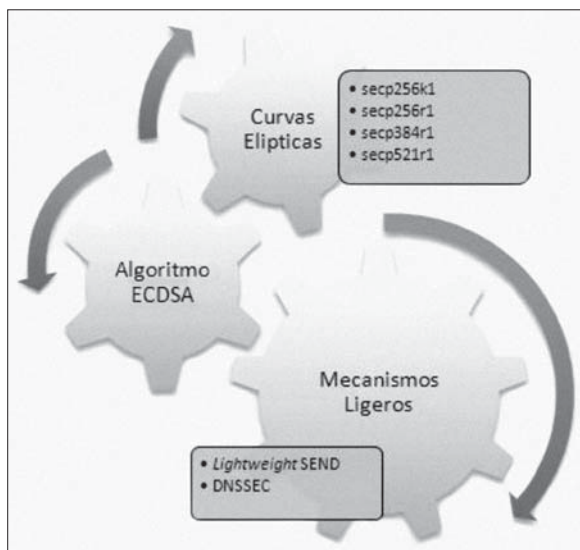


Figura 2. Modelo de simulación test-bed

Fuente: elaboración propia.

elíptica ECDSA". Como trabajo futuro de investigación se plantea el desarrollo de mecanismos ligeros de seguridad de acuerdo con el modelo propuesto. Los aspectos principales del modelo *test-bed* de simulación y evaluación se muestran en la figura 2.

Propiedades de los parámetros recomendados de curva elíptica de dominio sobre \mathbb{F}_p

Un elemento clave de la propuesta de modelo simulación *test-bed* es la selección de la(s) curva(s) elíptica(s) base del criptosistema por evaluar; en este trabajo se emplea la recomendación de curvas y parámetros en Sarikaya *et al.* (2011); Certicom Research (2010). En la tabla 3 se listan las propiedades de los parámetros de dominio de curva elíptica recomendados y al mismo tiempo la situación con respecto a su alineación con otras normas.

Los parámetros de dominio de curva elíptica aleatorios verificables sobre \mathbb{F}_p *secp256r1* están especificados por la séxtupla $T = (p; a; b; G; n; h)$ donde el campo finito \mathbb{F}_p se define por la ecuación (7).

$$\begin{aligned}
 P &= \text{FFFFFFFF} \text{00000001} \text{00000000} \text{00000000} \\
 &\quad \text{00000000} \text{FFFFFFFF} \text{FFFFFFFF} \text{FFFFFFFF} \\
 &= 2^224(2^32 - 1) + 2^192 + 2^96 - 1 \quad (7)
 \end{aligned}$$

La curva $E = y^2 = x^3 + ax + b$ sobre \mathbb{F}_p se define por la ecuación (8).

$$\begin{aligned}
 a &= \text{FFFFFFFF} \text{00000001} \text{00000000} \text{00000000} \\
 &\quad \text{00000000} \text{FFFFFFFF} \text{FFFFFFFF} \text{FFFFFFFC} \\
 b &= \text{5AC635D8} \text{AA3A93E7} \text{B3EBD55} \text{769886BC} \\
 &\quad \text{651D06B0} \text{CC53B0F6} \text{3BCE3C3E} \text{27D2604B} \quad (8)
 \end{aligned}$$

E fue seleccionada verificable y aleatoria como se especifica en la norma ANSI X9.61 de la semilla. Ver ecuación (9).

$$\begin{aligned}
 S &= \text{C49D3608} \text{B6E70493} \text{6A667BE1} \text{139D26B7} \\
 &\quad \text{B19F7E90} \quad (9)
 \end{aligned}$$

El punto base G en forma comprimida es como se muestra en la ecuación (10).

$$G = 03\ 6B1\ 7D1F2\ E12C4247\ F8BCE6E5\ 63A440F2\ 77037D81\ 2DEB33A0\ F4A13945\ D898C296 \quad (10)$$

Finalmente, el orden n de G y el co-factor se expresan en la ecuación (11).

$$n = \text{FFFFFFFF}\ 00000000\ \text{FFFFFFFF}\ \text{FFFFFFFF}\ \text{BCE6FAAD}\ A7179EB4\ F3B9CAC2\ FC632551$$

$$h = 01 \quad (11)$$

HERRAMIENTAS Y PROCEDIMIENTOS

En este modelo se emplea el ambiente de desarrollo Eclipse IDE para desarrolladores Java como base para el sistema de simulación *test-bed*, en conjunto con el kit de desarrollo de *software Android* y Herramientas de desarrollo ADT con el fin de emular dispositivos móviles virtuales con restricción de recursos. Para fines comparativos y para establecer una línea base se utiliza MATLAB® como una herramienta de simulación de rendimiento en PC del cómputo de las curvas elípticas seleccionadas y el algoritmo de firma digital ECDSA. Estos se utilizan para la evaluación de ECC, donde se comparan los recursos computacionales necesarios y las limitaciones. La figura 3 ilustra el tiempo de procesamiento T para diferentes curvas elípticas empleando longitud de clave desde 256 bits hasta claves de 521 bits. El presente trabajo se centra en la medición del tiempo del algoritmo ECDSA, en los procesos de firma y verificación (tipo aleatorio).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Existe una dependencia directa entre el aumento de tiempo de procesamiento en relación con la longitud de la clave, tanto en PC como en el dispositivo de simulación virtual de *Android*. Sin embargo, para mejorar la seguridad del algoritmo ECDSA por medio de la utilización de una

clave de 521 bits, el costo en tiempo aumenta un 87,5% en el dispositivo *Android* virtual respecto a la simulación de PC. Así mismo, en los resultados se proyecta el costo en tiempo para una clave hipotética de 768 bits como se muestra en los gráficos de la figura 3. Existen fuertes limitaciones en las herramientas computacionales del modelo de simulación *test-bed*, en cuanto a los dispositivos *Android* virtuales, puesto que no es posible realizar restricción de recursos de memoria en la simulación. En ese sentido, las limitaciones de potencia de procesamiento no se pueden simular con la herramienta seleccionada. El próximo objetivo del estudio es establecer las limitaciones del procesador y de la energía en entornos reales.

Tabla 3. Parámetros de curvas elípticas en simulación

FIPS 186-3SEC2				
Curva	Fortaleza	Tamaño	RSA/ DSA	Koblitz o Random
secp256k1	128	256	3072	K
secp256r1	128	256	3072	R
secp384r1	192	384	7680	R
secp521r1	256	521	15360	R

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Características de dispositivos móviles Android

Modelo	Android	Procesador	Memoria
Google Nexus S	2.3	1GHz Single	512 MB
LG Optimus 2X	2.2	1GHz Dual Core	512 MB
Motorola Atrix 4G	2.2	1GHz Dual Core	1 GB
HTC Thunderbolt	2.2	1GHz Single	768 MB
Samsung Galaxy S II	2.3	1GHz Dual Core	1 GB

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 4 se listan las principales características de los dispositivos móviles *Android* reales, a fin de seleccionar las restricciones de memoria en

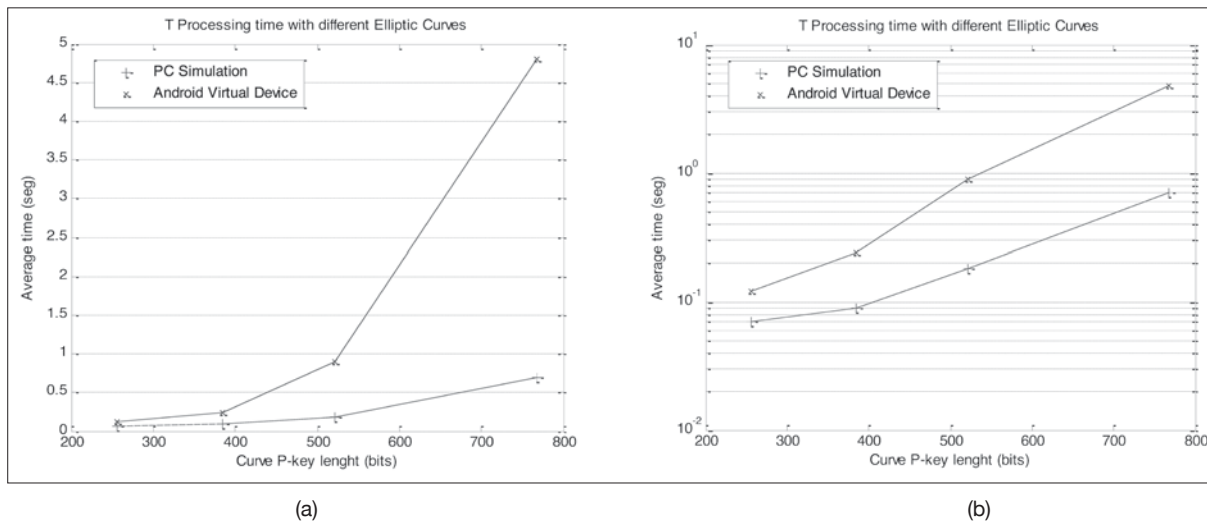


Figura 3. Tiempo de procesamiento T para diferentes curvas elípticas a escala lineal (a) y a escala logarítmica (b)
 Fuente: elaboración propia.

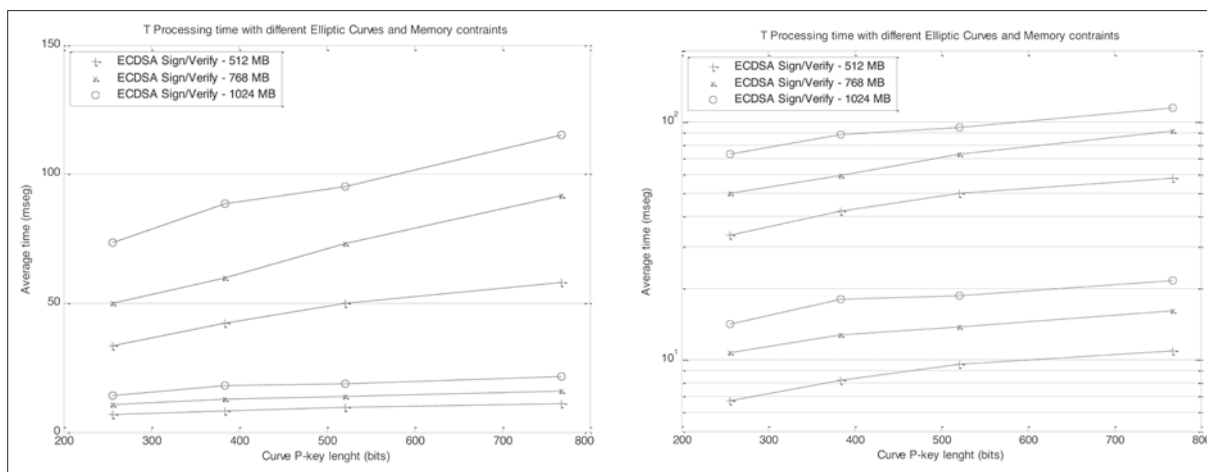


Figura 4. Tiempo de procesamiento T con diferentes curvas elípticas y limitaciones de memoria a escala) lineal, b escala) logarítmica
 Fuente: elaboración propia.

la evaluación de la simulación. La figura 4 ilustra el tiempo de procesamiento T con diferentes curvas elípticas de longitud de clave de 256 bits de longitud de clave hasta 521 bits y al mismo tiempo con limitaciones en el tamaño de la memoria RAM en el dispositivo *Android* virtual. Las medidas tomadas son discriminadas por tipo de proceso, es decir, firma (gráficos de la parte inferior) y verificación (gráficos de la parte superior).

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

La criptografía con base en curva elíptica es cada vez más importante para la nueva generación de tecnologías inalámbricas de comunicaciones habilitadas con IPv6. En este contexto el algoritmo ECDSA es un esquema de firma de la variante *ElGamal* que se ha propuesto como base de nuevos mecanismos de seguridad de carácter ligero. En este

trabajo se midió el costo en tiempo requerido por parte de algoritmos criptográficos ECDSA, que se constituye como base de mecanismos ligeros nuevos; el costo de tiempo aumenta exponencialmente en relación directa con la longitud de la clave y hay un esfuerzo del 85 % adicional para aplicar un esquema de seguridad de mayor fortaleza.

Un elemento clave del modelo de simulación *test-bed* es la selección de las curvas elípticas, como base del sistema de cifrado. Un aspecto importante a tener en cuenta es el uso de curvas y pará-

metros estándar tales como los recomendados en FIPS 186-3, normas ANSI. Es importante señalar que el proceso de verificación dentro del algoritmo ECDSA tiene un costo de tiempo más grande que el proceso de registro, además de que se encuentra una relación directa entre la longitud de la clave y el coste de tiempo. El siguiente paso en la investigación es la implementación de los algoritmos criptográficos en un escenario de banco de pruebas reales en dispositivos ligeros basados en *hardware*, y también la inclusión de otros algoritmos de cifrado en el modelo.

REFERENCIAS

- Badra, M. y Hajjeh, I. (2009). *ECDHE_PSK Cipher Suites for Transport Layer Security (TLS)*. Internet Engineering Task Force RFC 5489.
- Blake, G., y Seroussi, N. (2005). *Advances in elliptic Curve Cryptography*. USA: Cambridge University Press.
- Blake, S., Bolyard, N., Gupta, V., Hawk, C. y Moeller, B. (2006). *Elliptic Curve Cryptography (ECC) Cipher Suites for Transport Layer Security (TLS)*. Internet Engineering Task Force RFC 4492.
- Certicom Research. (2010). *SEC 2: Recommended Elliptic Curve Domain Parameters*. Standards for Efficient Cryptography Version 1.0.
- Cohen, H., Frey, G., Avanzi, R., Doche, C., Lange, T., Nguyen, K. y Vercauteren, F. (2006). *Handbook of Elliptic and Hyperelliptic Cryptography*. France: Chapman & Hall/CRC Taylor & Francis Group.
- Dang, Q., Santesson, S., Moriarty, K., Brown, D. y Polk, T. (2010). *Internet X.509 Public Key Infrastructure: Additional Algorithms and Identifiers for DSA and ECDSA*. Internet Engineering Task Force RFC 5758.
- Ehmke, M., Forsgren, H., Grahn, K., Karlsson, J., Karvi, T. y Pulkkis, G. (2009). Securing Control Signaling in Mobile IPv6 with Identity-Based Encryption. *Issues in Informing Science and Information Technology*, 6, 649-667.
- Gwalani, K. y Elkeelany, O. (2009). Design and Evaluation of FPGA Based Hardware Accelerator for Elliptic Curve Cryptography Scalar Multiplication. *WSEAS Trans. on Computers*, 8(5), 47-53.
- Hoffman, P. y Wijngaards, W. (2011). *Elliptic Curve DSA for DNSSEC*, Internet-Draft (draft-ietf-dnsext-ecdsa-00). Unpublished.
- Huang, P. (2008). *A Research of the Elliptic Curve Cryptology Applies to the IPv6 Protocol*. Int. Conf. on Mathematical Methods and Computational Techniques in Electrical Engineering, 3, 108-115.
- Kandikattu, R. y Jacob, L. (2008). A Secure IPv6 based Urban Wireless Mesh Network. *Jour-*

- nal on Computer Communications*, 31(15), 112-120.
- Kandikattu, R. y Jacob, L. (2010). Comparative Analysis of Different Cryptosystems for Hierarchical Mobile IPv6-based Wireless Mesh Network. *International Journal of Network Security*, 10(3), 190-203.
- Koblitz, N. (1987). Elliptic Curve Cryptosystems. *Mathematics of Computation*, 48, 203-209.
- Kushalnagar, N., Montenegro, G. y Schumacher, C. (2007). *IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs): Overview, Assumptions, Problem Statement, and Goals*. Internet Engineering Task Force RFC 4919.
- McGrew, D., Igoe, K. y Salter, M. (2011). *Fundamental Elliptic Curve Cryptography Algorithms*. Internet Engineering Task Force RFC 6090.
- Sarikaya, B. y Xia, F. (2008). *Lightweight Secure Neighbor Discovery for Low-power and Lossy Networks*. Internet-Draft (draft-sarikaya-6lowpan-cgand-00). Unpublished.
- Seo, K., Balitanas, M., Cho, E. y Kim, S. (2009). Mobile Network Protocol Vulnerabilities in Advent of IPV6. *Journal of Security Engineering*, 6, 91-98.
- Shelby, Z., Chakrabarti, S. y Nordmark, E. (2010). *Neighbor Discovery Optimization for Low-power and Lossy Networks*”, Internet-Draft (draft-ietf-6lowpan-nd-15). Unpublished.
- Turner, S., Brown, D., Yiu, K., Housley, R. y Polk, T. (2009). *Elliptic Curve Cryptography Subject Public Key Information*. Internet Engineering Task Force RFC 5480.
- Victorovich S. (2010). *Elliptic Curve Cryptography on Heterogeneous Multicore Platform*. M.Sc. Computer Engineering Thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Zhu, L., Jaganathan, K. y Lauter, K. (2008). *Elliptic Curve Cryptography (ECC) Support for Public Key Cryptography for Initial Authentication in Kerberos (PKINIT)*. Internet Engineering Task Force RFC 5349.

Mejoramiento de la técnica ATPM para reducción de interferencia en sistemas de banda ancha por línea de potencia en residencias

Improvement of the ATPM technique for interference reduction in systems of broadband by power line in residences

JOSÉ ROBERTO CÁRDENAS CASTIBLANCO

Ingeniero Electrónico, Magister en Teleinformática, Doctor en Ingeniería. Profesor asociado de la Maestría en Ciencias de la Información y las Comunicaciones de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia.

Contacto: rcardenas@udistrital.edu.co

Fecha de recepción: 30 de noviembre de 2012

Clasificación del artículo: investigación

Fecha de aceptación: 23 de noviembre de 2013

Financiamiento: Universidad Nacional de Colombia

Palabras clave: mitigación de la interferencia, técnica ATPM, variación de funciones de transferencia.

Key words: ATPM Technique, mitigation of the interference, variation of transfer functions.

RESUMEN

La interferencia electromagnética producida por los sistemas de comunicación de banda ancha por línea de potencia (en inglés, *Broadband over Power Lines* [BPL]) en redes residenciales es un aspecto técnico que no está totalmente solucionado. Este artículo presenta una técnica en la cual la longitud y la carga de los ramales de la red, cuya topología es de bus, son modificadas para variar la función de transferencia del canal entre un transmisor y un receptor, con el objeto de disminuir la densidad espectral de potencia (DEP) del transmisor. El algoritmo que desarrolla esta técnica hace uso

de tres principios teóricos encontrados: la ganancia por distancia, la construcción discreta de la capacidad de canal y direccionalidad de los nodos de transmisión y recepción. Se estudió una red típica y, como resultado, combinando esta técnica con la técnica conocida como *Adaptive Transmit Power Management* (ATPM) se logró una reducción de 26.4 dB en la densidad espectral de potencia.

ABSTRACT

The electromagnetic interference produced by the In-House Broadband over Power Line (BPL)

communication systems is a technical aspect that is not completely settled. This article presents a technique in which the length and load of the branches of the network, whose topology is bus, are modified to vary the transfer function of the channel between a transmitter and a receiver in order to reducing the Power Spectral Density (PSD) of the transmitter. The algorithm that develops this technique makes use of three theo-

retical principles found: the gain by distance, the discrete construction of the channel capacity and directionality of the nodes of transmission and reception. A typical network was studied and as a result, combining this technique with the technique known as Adaptive Transmit Power Management (ATPM), there was a reduction of 26.4 dB in the power spectral density.

* * *

INTRODUCCIÓN

Estudios han mostrado que una importante fuente de interferencia electromagnética que está emergiendo en la banda de frecuencias de HF (3-30 MHz) es producida por sistemas de para comunicaciones en banda ancha que usan las líneas de distribución de energía eléctrica (Stott, 2006). Se ha observado que esta interferencia sobrepasa el límite especificado por cuerpos nacionales como la Federal Communications Commission (FCC) (Federal Communications Commission, 2009) y las recomendaciones de la International Telecommunication Union (ITU) (ITU-R SM Series, 2011).

En diciembre de 2010, el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) publicó el estándar 1901 (IEEE Communications Society, 2010) (cuya banda de operación es 1,8-30 MHz), el cual oficializó la tecnología que usa la transmisión de datos de banda ancha por línea de potencia (en inglés, *Broadband Over Power Line [BPL]*). En dicho estándar se especificó una densidad espectral de potencia (DEP) de transmisión de -55 dBm/Hz, valor que está lejano del valor estimado por Chende -72 dBm/Hz (Cheng, 2003), el cual sería necesario para cumplir con lo especificado por la FCC para efectos de compatibilidad electromagnética. La máscara espectral de transmisión especificada por IEEE atenúa la DEP en las frecuencias usadas por los radioaficionados mediante un sistema de ranuras.

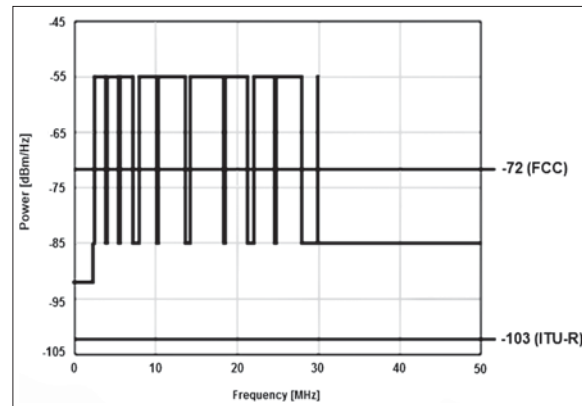


Figura 1. Máscara espectral de transmisión propuesta por IEEE 1901 y límites recomendados

Fuente: IEEE Communications Society (2010).

ITU-R también se ha pronunciado en relación con la protección de las comunicaciones aeronáuticas (ITU-R SM Series, 2011) (sección A.2.6), y ha recomendado que los sistemas PLT (denominación europea para BPL) operando con una DEP de -55 dBm/Hz deberían reducir la DEP en 48 dB. En la figura 1 se muestra el actual estado de las recomendaciones de DEP para redes BPL.

De acuerdo con ITU-R el nivel de DEP recomendado de -103 dBm/Hz se obtendría con una combinación de técnicas, para así poder reducir la DEP de transmisión en 18 dB usando control dinámico de potencia de transmisión (en inglés, *Adaptive Transmit Power Management,-ATPM-*) y en 30 dB usando técnicas de ranuras. De acuerdo con esto la técnica ATPM logra menores resultados si

se compara con la técnica de ranuras. Este trabajo mejora la técnica ATPM, obteniendo mejoras de hasta 26,4 dB en la DEP de transmisión, haciéndola así equiparable con el rendimiento de la técnica de ranuras. Esta mejora se logró mediante un algoritmo que propone un aumento en la magnitud de la función de transferencia ($|H(f)|$) para el caso del canal de distribución eléctrica residencial.

ESTADO DEL ARTE EN TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DE INTERFERENCIA DE SISTEMAS BPL RESIDENCIALES

Las corrientes de modo común generadas a lo largo de los cables de una línea de potencia y sus campos magnéticos asociados (causantes de la interferencia) son principalmente debidas a asimetrías eléctricas. De acuerdo con Favre *et al.* (2009), las corrientes de modo común pueden ser reducidas con el uso en los tomacorrientes de unos “insertos” y así disminuir el campo magnético radiado entre 6 y 10 dB. Sin embargo, las pruebas realizadas se hacen en espacios pequeños y preocupa el hecho de aumentar en su operación la impedancia hacia tierra de protección.

Otra técnica se basa en colocar una interferencia destructiva intencional, inyectando una señal auxiliar seleccionada en el circuito Tierra-Neutro (Vukicevic *et al.*, 2007). Sin embargo, es posible que no se pueda lograr una alineación entre las componentes del campo emitido y el destructivo, lo que puede resultar en que algunas componentes de la emisión sean incrementadas. Los autores argumentan que en promedio se logra una reducción de 10 a 20 dB en todas las componentes del campo en el área de interés. En pruebas de laboratorio, Pang *et al.* (2010) aseguran haber mejorado esta técnica inyectando una señal entre fase y tierra, y otra entre tierra y neutro.

Por otra parte, las conclusiones de la tesis doctoral de Mekuria (2008) señalan que es posible transmitir pulsos ultra wide band (UWB) en el

intervalo nano sobre canales PLC y, con ello, se puede lograr una reducción de las interferencias del orden de 15 dB en frecuencias por debajo de 30 MHz. Esta propuesta llevaría a replantear totalmente la actual tecnología.

En un enfoque teórico, Chaaban *et al.* (2009) analizan una antena de hilo y representan el campo radiado en función de la reducción de la longitud y el radio del conductor de la antena, para demostrar que la potencia radiada es mínima para diferentes valores de longitud. A partir de este resultado se pueden escoger valores de frecuencia óptimos para limitar la potencia electromagnética radiada y, así, reducirla a alrededor de 7.5 dB.

ITU-R (ITU-R SM Series, 2011), por su parte, solamente considera dos técnicas para reducción de la interferencia: ranuras dinámicas y ATPM. Existen dos versiones en la técnica de ranuras. En la primera las ranuras son estáticas, como se muestra en la figura 1. La segunda técnica denominada de ranuras dinámicas (Weling, 2011) se basa en la detección de estaciones de radiodifusión y de acuerdo con ITU-R la reducción en la DEP es de 30 dB. A continuación se trata la técnica ATPM.

ADAPTIVE TRANSMIT POWER MANAGEMENT (ATPM)

ATPM hace uso de la habilidad que tienen implementada los actuales módems BPL en el Control Automático de Ganancia (CAG) para amplificar la señal en el lado receptor. ATPM propone que, en vez de transmitir con un nivel de transmisión constante, tiene sentido reducir el nivel de transmisión y dejar que el CAG amplifique la señal recibida. Esto quiere decir que el modem debe detectar pérdidas de transmisión y fijar la potencia por transmitir al mínimo nivel requerido para lograr una transferencia de datos a una velocidad dada. Conviene aclarar que actualmente en general los módems BPL no tienen implementado ATPM. Schwager (2010) propone que usando

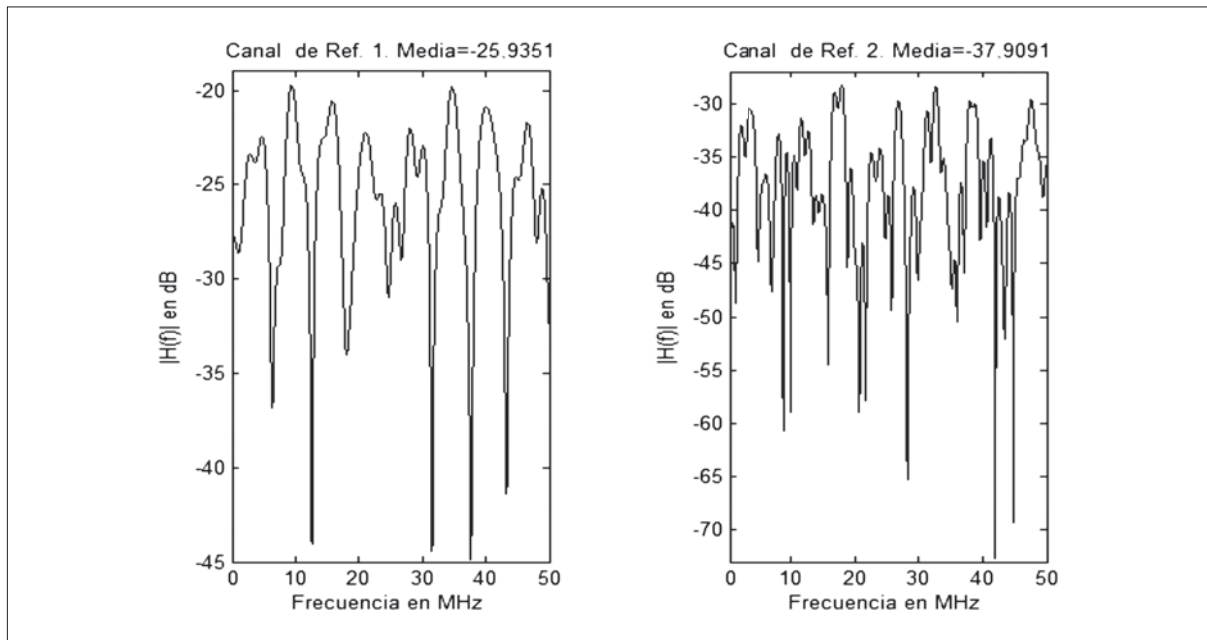


Figura 2. $|H(f)|$ de canales de referencia para BPL

Fuente: Datos suministrados por Babic *et al.* (2005).

ATPM se puede hacer la reducción de potencia en el transmisor mediante la ecuación (1).

$$\begin{aligned} \text{Reducción de potencia (dB)} &= 30 \text{ dB} \\ &+ \text{Atenuación mínima de canal (dB)} \quad (1) \end{aligned}$$

Es importante tratar en este punto el tipo de canal que cubre este artículo. Para ello es valioso el aporte de Babic *et al.* (2005), el cual consiste en la definición de cuatro canales de referencia para canales de banda ancha por línea de potencia. El presente estudio toma los dos primeros, los cuales corresponden a canales de redes de distribución eléctrica residenciales, cuyas magnitudes de función de transferencia se muestran en la figura 2 y las cuales se convierten en los límites sobre los que se trabajará. Cabe aclarar que la figura 2 se obtiene gracias a que Babic *et al.* proporcionaron los detalles de la respuesta al impulso de cada canal.

Como ejemplo se considera el canal de referencia 1 (gráfica de la izquierda en figura 2). En este caso la mínima atenuación del canal es -19,7056

dB. Al aplicar la ecuación (1) se obtiene una reducción de potencia de transmisión de 10,3 dB. Se observa que el cálculo de 18 dB de ITU-R con respecto a reducción de potencia con ATPM podría ser un poco optimista. Sin embargo surge la pregunta: ¿podría existir alguna técnica que permitiera obtener picos menores de $|H(f)|$, para así lograr una mayor reducción de potencia? En lo que sigue se intentará responder esta pregunta.

METODOLOGÍA

Para encontrar la respuesta fue necesario seguir algunos pasos con diferentes diseños metodológicos, que a continuación se describen.

Uso del método analítico

A simple vista, para examinar el comportamiento de una red de transmisión de energía para uso con BPL sería suficiente con plantear las ecuaciones de una red en forma de bus compuesta por líneas

de transmisión. La aproximación tradicional en este caso se basa en el método analítico, el cual algunas veces en la literatura se referencia como método *bottom-up*, donde se conocen los parámetros eléctricos de las líneas de transmisión, las cargas, sus longitudes y la estructura de la red. Sin embargo en el caso BPL residencial la tierra de protección introduce grandes variaciones en la $|H(f)|$ del canal residencial, haciendo que su modelación no sea sencilla. No obstante, se encontraron algunas soluciones que permitieron usar el método analítico.

Parámetros eléctricos para las líneas de transmisión de canales residenciales

Bostoey y Van de Wiel (2003) hicieron un estudio con el cable de distribución de $4 \times 95 \text{ mm}^2$ y los cables de conexión de $4 \times 10 \text{ mm}^2$ y $4 \times 25 \text{ mm}^2$. Todos estos cables se componen de cuatro conductores: un cable para neutro y tres conductores para cada fase. Sin embargo, estos cables se aproximan como líneas monofásicas al unir dos de los cuatro conductores (neutro y una fase) o al unir los conductores para las tres fases. Por tanto, se definen tres modos de conexión, 1-2, 1-3, y 1-(2+3+4).

Para estos modos de conexión, Bostoey y Van de Weil encontraron los parámetros eléctricos por unidad de longitud, los cuales dependen de la frecuencia y de los factores r_1 , l_1 , l_2 , g_1 , c_1 , (ecuación (5)).

$$r = r_1 \sqrt{f}, \quad l = l_1 + \frac{l_2}{\sqrt{f}} \quad (3)$$

$$g = g_1 f \quad (4)$$

$$c = c_1 \quad (5)$$

Estos factores son listados por Bostoey y Van de Weil (2003) y cuando se utilizan en el cálculo de

magnitudes de funciones de transferencia se observa un error promedio de $\pm 1.13 \text{ dB}$.

Por su parte, Barmada *et al.* (2009) también proporcionan los parámetros por unidad de longitud para una línea de transmisión residencial, pero se encuentra que estos parámetros tienen valores muy cercanos con la línea $4 \times 10 \text{ mm}^2$ modo 1-3 de Bostoey y Van de Weil.

Herramienta de cálculo de las magnitudes de funciones de transferencia de canales en una red residencial

Algunas de las siguientes consideraciones han sido inspiradas en comentarios hechos por Tucic en *Computational Intelligence in Power-Line Communication Systems*, 2009. La matriz de transmisión T_f para una línea de transmisión se puede expresar a partir de la ecuación (6).

$$T_f = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma l & Z_c \sinh \gamma l \\ \frac{1}{Z_c} \sinh \gamma l & \cosh \gamma l \end{bmatrix} \quad (6)$$

En la ecuación (6) γ es la constante de propagación, Z_c es la impedancia característica de la línea y l es la longitud de la línea. Es posible calcular la constante de propagación y la impedancia característica usando los parámetros eléctricos encontrados por Bostoey y Van de Weil.

Resulta útil describir la red de admitancia Y de dos puertos en términos de los parámetros de transmisión de T_f mediante la ecuación (7) (Dorf y Svoboda, 2006).

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = Y \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{A}{B} & -\frac{1}{B} \\ -\frac{1}{B} & \frac{A}{B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Considerando que un hilo está aterrizado para todas las líneas de transmisión de dos hilos que

componen la red, entonces solo se considera un término de la ecuación (7) para cada línea de transmisión, el cual se muestra en la ecuación (8).

$$I_1 = \frac{A}{B} V_1 - \frac{1}{B} V_2 \quad (8)$$

En la ecuación (8) I_1 y V_1 son la corriente y la tensión a la entrada a una línea de transmisión que está conectada a un nodo con tensión V_1 . V_2 es el voltaje en el otro extremo de la línea, la cual puede estar conectada a una carga final u otra línea de transmisión. De acuerdo con la ley de corrientes de Kirchhoff, la suma de corrientes en un nodo debe ser cero. Si en un nodo k están conectadas N líneas de transmisión, las cuales a su vez están conectadas a otros N nodos, la sumatoria de corrientes en el nodo k , aplicando la ecuación (8), es la que se describe mediante la ecuación (9).

$$0 = V_k^0 \sum_{i=1}^N \frac{A_i}{B_i} - \sum_{i=1}^N \frac{V_k^i}{B_i} \quad (9)$$

En la ecuación (9) V_k^0 es la tensión en el nodo k , V_k^i son las tensiones de los N nodos adyacentes al nodo k conectados por las N líneas de trans-

misión conectadas al nodo k ; B_i y A_i , B_i son los elementos de la matriz de transmisión de la línea que conecta el nodo k con el nodo i . En la ecuación (9) se considera que todas las corrientes son salientes desde el nodo k . Para incluir los ramales terminados en una carga, se puede demostrar que hay que modificar la ecuación (9) para incluir a Y^v , donde Y^v es la admitancia de entrada del ramal (ecuación (10)).

$$0 = V_k^0 \sum_{i=1}^N \left(\frac{A_i}{B_i} + Y^v \right) - \sum_{i=1}^N \frac{V_k^i}{B_i} \quad (10)$$

Al aplicar adecuadamente la ecuación (9) a cada línea de transmisión de la red residencial es posible desarrollar una herramienta que calcule las tensiones en cada nodo y carga de la red, lo que habilita el cálculo de $|H(f)|$ entre puntos de la red, como efectivamente se hizo. Esta herramienta fue validada con resultados obtenidos por Bostoen y Van de Weil (2003). En la figura 3 se observa el caso de $|H(f)|$ en una red con un nodo y en la figura 4 el caso de $|H(f)|$ en una red con seis nodos. La herramienta despliega los resultados desde 1,8 MHz hasta 30 MHz.

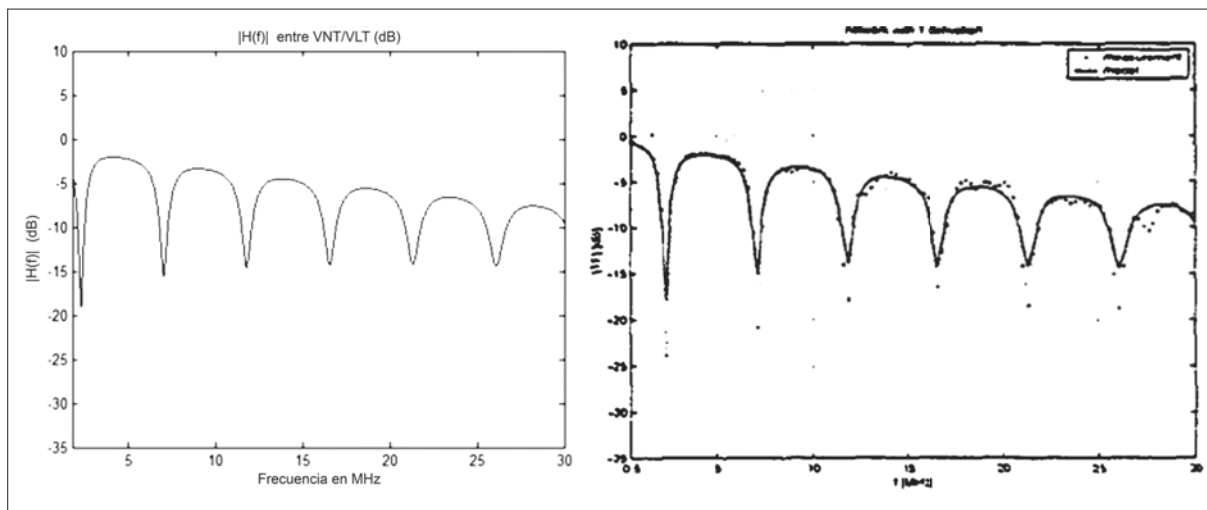


Figura 3. $|H(f)|$ en una red de 1 nodo. Izquierda, resultado de la herramienta desarrollada

Fuente: Bostoen y Van de Weil (2003).

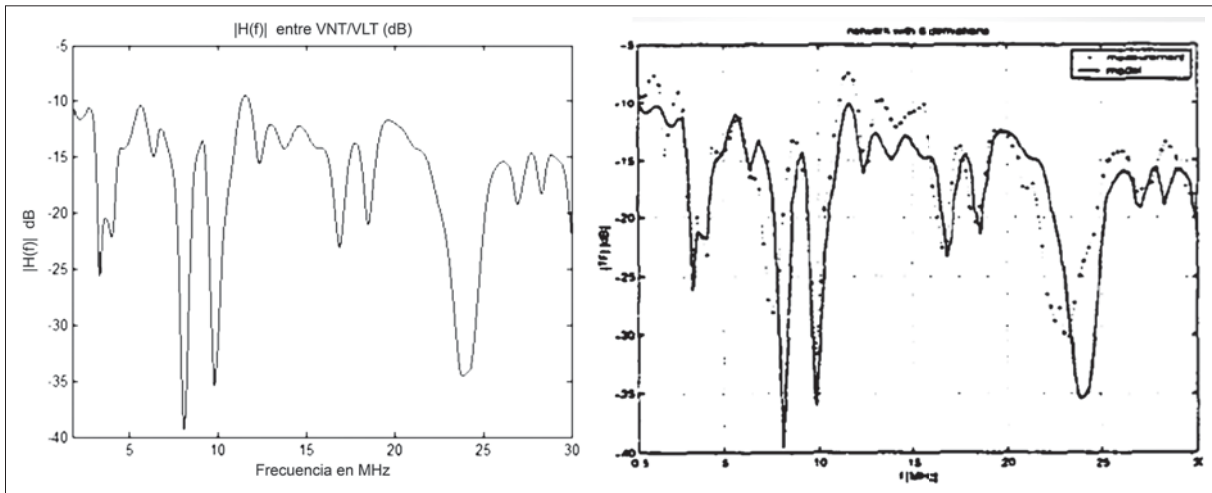


Figura 4. $|H(f)|$ en una red de 6 nodos. Izquierda, resultado de herramienta desarrollada

Fuente: Bostoen y Van de Weil (2003).

Tanto en la figura 3 como en la figura 4 se observa coincidencia en los resultados. Sin embargo, el modelo de redes de dos puertos, aunque permite obtener las magnitudes de la función de transferencia entre puntos de la red, no deja vislumbrar mecanismos propios de las redes residenciales. Si dichos mecanismos son encontrados, estos potenciarían algún posible control sobre la interferencia. En el siguiente apartado se explora este aspecto.

Uso del método sintético

Este método de modelación (también conocido como *top-down*) opera desde un punto meramente fenomenológico, observándose el comportamiento del canal como un todo. Con este método Zimmermann y Dostert (1999, 2002), lograron reconocimiento con la formulación de su modelo llamado *multicamino* y su posterior comprobación práctica en una red de acceso de un nodo. Este método es similar a la técnica de diagrama de celosía de Bewley (Bewley, 1931) y puede expresar la función de transferencia del canal mediante la ecuación (11).

$$H(f) = \sum_{i=1}^{N'} g_i \cdot e^{-(a_0+a_1f^k)d_i} \cdot e^{-j2\pi f \frac{d_i}{v_p}} \quad (11)$$

En la ecuación (11) los valores de g_i (los cuales pueden ser positivos o negativos y, aunque existen expresiones analíticas para ellos, estos son medidos con precisión en el laboratorio en virtud de que se sigue el método sintético) se relacionan con fenómenos de reflexión y transmisión a lo largo del camino i de propagación, y siendo d_i la longitud de dicho camino, v_p la velocidad de fase, a_0 y a_1 constantes de los cables conductores, y k un valor entre cero y 1. El término de atenuación se relaciona con las pérdidas de señal RF a lo largo de la línea y son el resultado del efecto piel y de las pérdidas en el dieléctrico. El término de retardo es la porción de constante de fase. Sin embargo, este modelo tiene dos limitaciones importantes:

- No se sabe la cantidad de caminos que se deben incluir y solo se encuentra cuando se compara el resultado del modelo con las mediciones hechas sobre el canal físico. En ese momento se habrán encontrado los N' caminos necesarios para que el modelo funcione.
- Se deben hacer mediciones sobre el canal, que pueden ser previas, las cuales solo serán válidas para el canal específico.

Estas limitaciones llevan a que sean muy reducidas las posibilidades de poder hacer prediccio-

nes del comportamiento de redes y canales. Sin embargo, es posible pensar que como modelo no solo debe ser aplicable a las redes de acceso, sino también a las redes residenciales.

Escenario típico residencial

Como caso de análisis se presenta en la figura 5 la red residencial propuesta por Tucci *et al.*, 2007. En este caso las consideraciones se centran entre los puntos TX y RX. El interruptor L coloca sobre el ramal 6 una carga igual a la impedancia característica de la línea o termina la línea en circuito abierto. Las cargas FAN, COFFEE MACHINE y TV son cargas no lineales, las cuales son modeladas siguiendo la técnica de Bardama *et al.* (2009).

APORTES TEÓRICOS PARA HALLAR UN MÉTODO DE MODIFICACIÓN DE $|H(f)|$

En este apartado se consignan los aportes teóricos que permitieron desarrollar un algoritmo que de manera sistemática permite la modificación de $|H(f)|$.

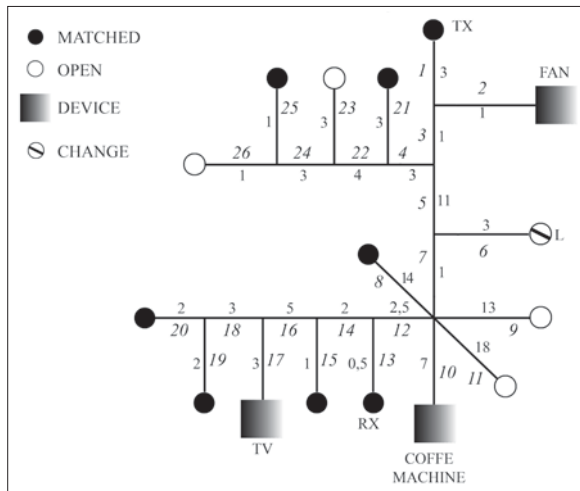


Figura 5. Red eléctrica residencial típica con longitudes (números pequeños) y numeración de ramales (números grandes)

Fuente: Tucci *et al.* (2007). Blind Channel Estimation for Power-line Communications by a Kohonen Neural Network.

Uso del método hipotético-deductivo: ganancia por distancia

Para explicar analíticamente el comportamiento de los canales, se asumió (hipótesis) que la base teórica del modelo *top-down* para canales de acceso de alguna forma también podría explicar fenómenos de las redes residenciales con más de un nodo. De hecho, la red de topología de bus puede ser construida interconectando redes de un nodo. La ecuación (11) se puede escribir como la ecuación (12).

$$H(f) = \sum_{i=1}^{N'} (g_i e^{-a(f)d_i} \cos w_i) + j \sum_{i=1}^{N'} (-g_i e^{-a(f)d_i} \text{sen} w_i) \quad (12)$$

donde, $a(f) = a_0 + a_1 f^k$, $w_i = 2\pi f \tau_i$, $\tau_i = d_i / v_p$. De la ecuación (12) se puede derivar $|H(f)|^2$ (ecuación (13)).

$$|H(f)|^2 = \left(\sum_{i=1}^{N'} g_i e^{-a(f)d_i} \cos w_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{N'} g_i e^{-a(f)d_i} \text{sen} w_i \right)^2 \quad (13)$$

Desarrollando la ecuación (13) para $N' = 1$ se obtiene la ecuación (14).

$$(|H(f)|^2)_1 = g_1^2 e^{-2a(f)d_1} \quad (14)$$

Desarrollando la ecuación (13) para $N' = 2$ se obtiene la ecuación (15).

$$(|H(f)|^2)_2 = (|H(f)|^2)_1 + g_2^2 e^{-2a(f)d_2} [1 + 2(g_1/g_2) e^{-2a(f)d_1} \cos(w_1 - w_2)] \quad (15)$$

Desarrollando la ecuación (13) para $N' = 3$ se obtiene la ecuación (16).

$$(|H(f)|^2)_3 = (|H(f)|^2)_2 + g_3^2 e^{-2a(f)d_3} \left[1 + 2 \sum_{i=1}^2 \frac{g_i}{g_3} e^{-2a(f)d_i} \cos(w_1 - w_3) \right] \quad (16)$$

Recordando que en una línea de transmisión $v_p = \lambda * f$ m/s, se puede generalizar $N > 1$ para (ecuación (17))

$$(|H(f)|^2)_{N'} = (|H(f)|^2)_{N'-1} + \Delta_{N'} \quad (17)$$

siendo,

$$\Delta_{N'} = g_{N'}^2 e^{-2a(f)d_{N'}} \left\{ 1 + 2 \sum_{i=1}^{N'-1} \frac{g_i}{g_{N'}} e^{-2a(f)d_i} \cos \left[2\pi \cdot \frac{d_i - d_{N'}}{\lambda} \right] \right\} \quad (18)$$

La función $\Delta_{N'}$ (ecuación (18)) describe la influencia en la magnitud de la función de transferencia al cuadrado, al considerarse un camino adicional al número de caminos $N'-1$, observándose de inmediato el comportamiento discreto de $(|H(f)|^2)_{N'}$. Además se observa claramente en la ecuación (18) que el factor $\Delta_{N'}$ es dependiente de la diferencia de longitud de caminos (lo que indica dependencia de la configuración geométrica de la red). Si se define Gd_i a partir de la ecuación (19).

$$Gd_i = \cos \left[2\pi \cdot \frac{|d_i - d_{N'}|}{\lambda} \right] \quad (19)$$

y llamando a Gd_i ganancia por distancia, se observa que esta ganancia puede tener un valor positivo, negativo o cero dependiendo del valor $|d_i - d_{N'}| = k \cdot \lambda$ con $k \in \mathbb{R}^+$, como se muestra en la Figura 6.

Al observar la ecuación (18) interesarán los casos donde $g_i/g_{N'}$ y Gd_i tengan el mismo signo, ya que esto significa un valor positivo en la sumatoria y la suma de muchos valores positivos podría llevar a que $\Delta_{N'}$ sea mayor a 0 dB. En la figura 7 se muestra un caso en el cual $|d_i - d_{N'}|$ (Gd_i máximo).

En los cálculos de las longitudes de los caminos de propagación se ha tenido en cuenta que en las líneas de transmisión terminadas en circui-

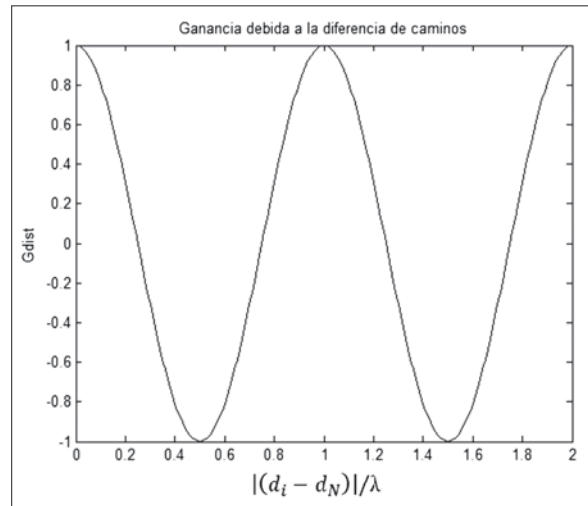


Figura 6. Ganancia por distancia debida a la diferencia de caminos de propagación

to abierto la onda de tensión incidente se refleja exactamente, de la misma manera como si fuera a continuar a lo largo de una línea infinitamente larga. El camino de propagación del primer y segundo recorrido sería la adición de las siguientes distancias, donde las cantidades entre paréntesis muestran caminos creados por reflexión (ecuación (20) y (21)).

$$\text{Distancia 1er. camino} = 3+1+11+1+13+(13+1+11+3+3)=60\text{m} \quad (20)$$

$$\text{Distancia 2do. camino} = 3+1+3+4+3+1+[(1+3+3) \cdot 5] + (3+4+3)3+4+3=60\text{m} \quad (21)$$

Si se considera que la velocidad de fase está alrededor de 188 280 000 m/s (estimada computacionalmente) y si además se asume que en este caso $\lambda=60$ m, entonces se podría presumir que se presentaría una posible ganancia de $|H(f)|$ en una frecuencia determinada a partir de la ecuación (22).

$$f = \frac{v_p}{\lambda} = \frac{188280000}{60} = 3,1138 \text{ MHz} \quad (22)$$

En la figura 8 se muestra $|H(f)|$ entre TX y la carga del ramal 21 calculada con la herramienta

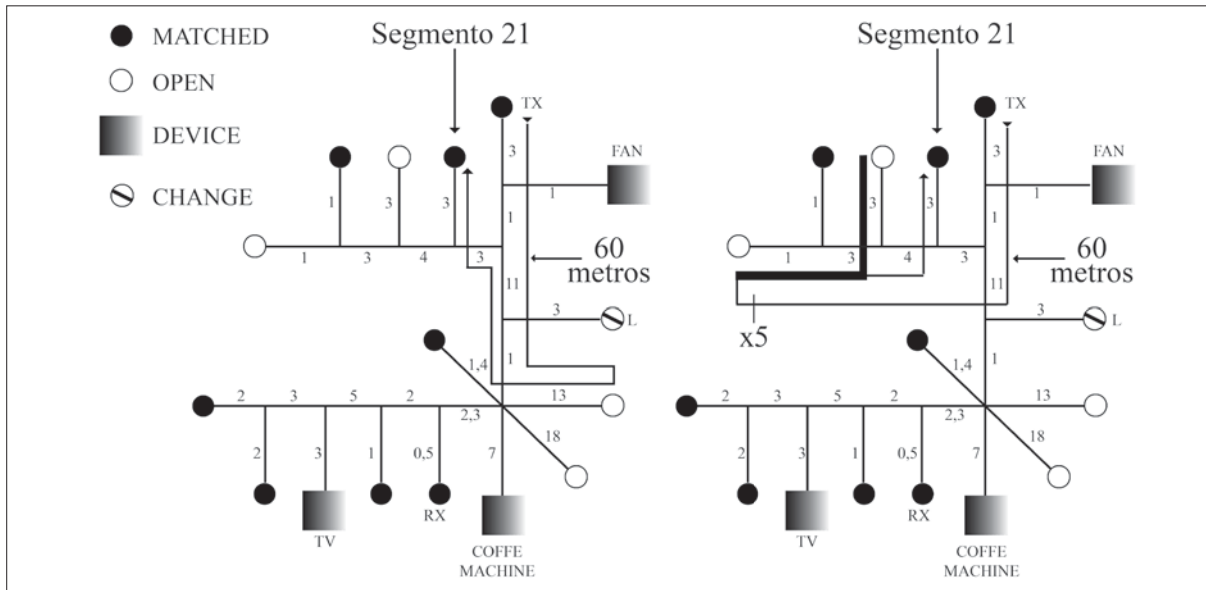


Figura 7. Dos posibles caminos de propagación de 60 metros en la red residencial

Fuente: Tucci *et al.* (2007). Blind Channel Estimation for Power-line Communications by a Kohonen Neural Network.

bottom-up. Se observa efectivamente que existe en 3,138 MHz una ganancia que está muy cercana al pico máximo de $|H(f)|$.

Una $|H(f)|$ como la mostrada en la figura 8 no es común, pero se puede explicar con la teoría de Gd_i . Del cálculo realizado en las ecuación (21) y (22) se puede concluir que las longitudes de los ramales y sus cargas influyen en $|H(f)|$, al punto de poder producir ganancias.

Construcción discreta de la capacidad de canal en redes residenciales

Si se considera que la técnica de transmisión adoptada para sistemas BPL hogareña es OFDM (con N portadoras) y que la densidad espectral de potencia del ruido en redes residenciales varía sustancialmente, para intervalos lineales del canal se podrá expresar la capacidad a partir de la ecuación (23).

$$C = \Delta f \cdot \sum_{i=1}^N \log_2 \left[1 + \frac{S_i(f_i) \cdot |H(f_i)|^2}{S_n(f_i)} \right] \left(\frac{bits}{s} \right) \quad (23)$$

En este estudio se asumen $\Delta f = 9KMz$ especificada por la FCC (Federal Communications Commission, 2009) para el caso de redes BPL, $S_i(f_i)$ la DEP de transmisión definida por IEEE 1901, $S_n(f_i)$ la DEP de ruido típica residencial encontrada por Benyoucef (Benyoucef, 2003). Aumentos en $|H(f_i)|^2$ se reflejarán en aumento de C.

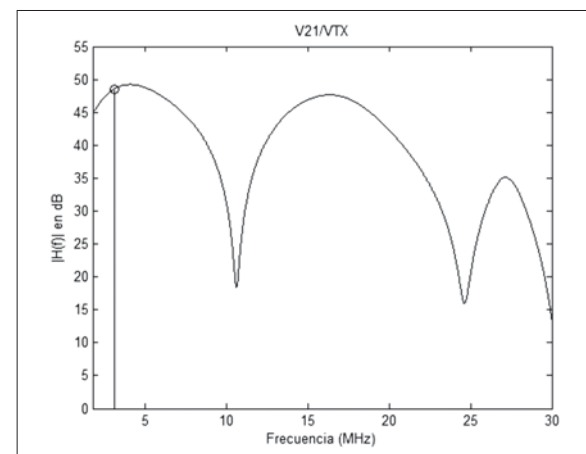


Figura 8. $|H(f)|$ entre TX y la carga del ramal 21 (con L abierto) con frecuencia para máximo Gd_i ($|d_i - d_N| = 0$)

Sería posible usar la ecuación (17) en la ecuación (23), obteniendo la ecuación (24).

$$C_N = \Delta f \cdot \sum_{i=1}^N \log_2 \left[1 + \frac{S_i(f_i) \cdot |H(f_i)|_N^2}{S_n(f_i)} \right] \left(\frac{\text{bits}}{s} \right) \quad (24)$$

La ecuación (24) define la capacidad para redes BPL residenciales, la cual demuestra un comportamiento discreto al depender de $(|H(f_i)|_N^2)$ y es dependiente de la longitud de los caminos de propagación (incluidas las longitudes de los ramales) y de las cargas de terminación en los ramales. Entre más N caminos de propagación se habiliten, la sumatoria de Δ_N tendrá mayor oportunidad de agregar términos positivos. La habilitación de N caminos puede hacerse colocando sobre los ramales cargas que reflejen la onda (p.e. $Z_L=100Z_c$). Cuando no se logre aumentar la sumatoria de Δ_N operando con un ramal, se coloca una carga acoplada ($Z_L=Z_c$).

Direccionalidad en el nodo transmisor

Ahora se asumirá que el transmisor (V_s) está situado en el ramal de la red de un nodo, como se

muestra en la figura 9. En este caso se definen $l_{1B} = \lambda/4$, $r_{21} = l_{2B}/l_{1B}$ y $r_{31} = l_{3B}/l_{1B}$. El estudio se hace con los parámetros eléctricos de la línea $4 \times 95 \text{ mm}^2$ 1-(2+3+4) para todos los ramales y las impedancias en los puntos 2 y 3 son 100 veces la impedancia característica de las líneas 2-B y 3-B respectivamente.

Considerando las distancias de la red residencial, interesará acotar los valores de r_{31} y r_{21} a valores entre 1 y 2, ya que por ejemplo si se considera que el ramal tiene una longitud $\lambda/4$ @ 20,1 MHz, se estarían considerando longitudes de alrededor de 2,34 m.

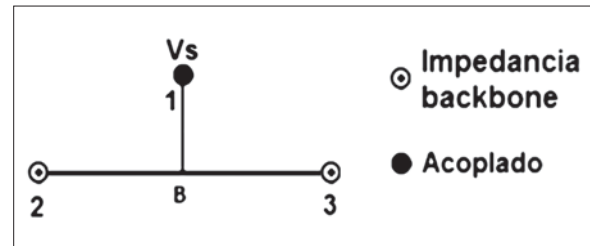


Figura 9. Red de un nodo con el transmisor situado en el ramal 1-B (Punto 1)

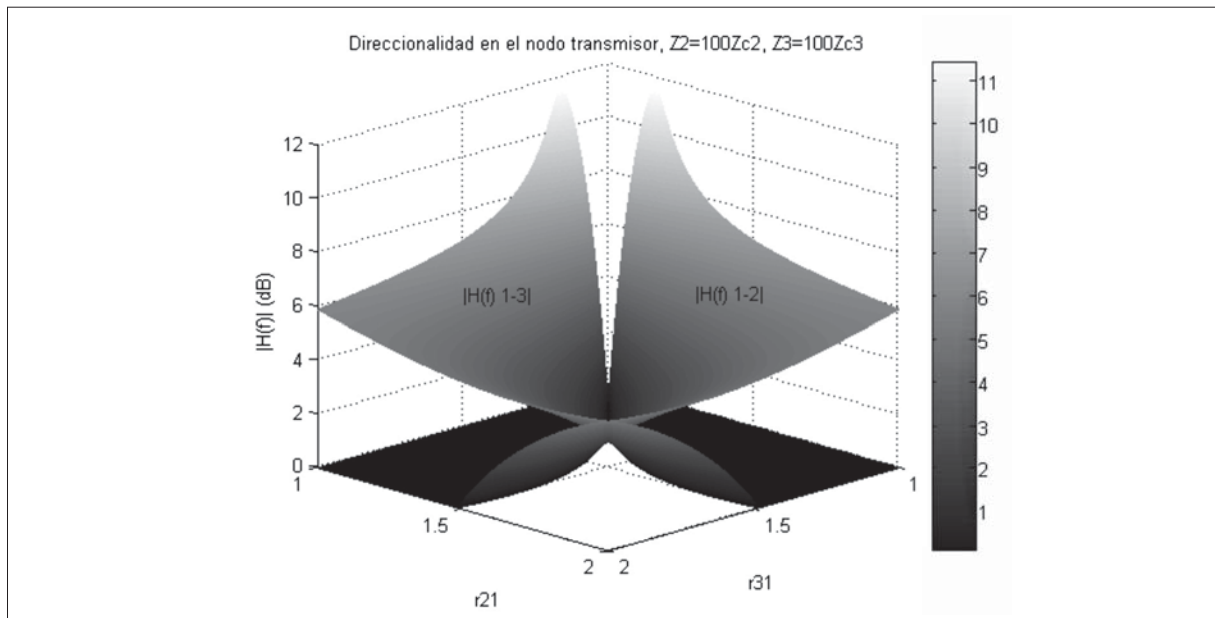


Figura 10. Superposición de $|H(f)|_{1-2}$ con $|H(f)|_{1-3}$ cuando se transmite por el ramal 1-B @ 20,1 MHz

La figura 10 es obtenida mediante el uso de la herramienta *bottom-up* y muestra la superposición de las $|H(f)|$'s cuando se sale por los ramales 2 y 3 de figura 9, para $|H(f)| > 0$ dB. Se observa que existen puntos donde para $|H(f)_{1-3}| > 0$ corresponde $|H(f)_{1-2}| \leq 0$ y viceversa, es decir se produce una orientación de la transmisión.

La unidireccionalidad se puede obtener ajustando la longitud del ramal TX (1-B). De forma análoga se puede demostrar que se produce ganancia en RX ajustando la longitud del ramal RX.

ALGORITMO DE VARIACIÓN DE LONGITUD DE RAMAL (AVLR)

Con los anteriores aportes teóricos se construyó el algoritmo AVLR (figura 11) que permite disminuir valores de $|H(f)|$ y así obtener mayor reducción de la DEP en TX usando ATPM.

Las convenciones adoptadas para el diagrama de flujo de la figura 11 son:

- N = número de ramales participantes
- $i \leq N-2$ = índice referente a ramales diferentes a ramal RX (receptor) o ramal TX (transmisor).
- $i = N-1$ = índice referente al ramal receptor.
- $i = N$ = índice referente al ramal transmisor.
- Z_{ci} = impedancia característica del ramal i .
- $Z_{c_{N-1}}$ = impedancia característica del ramal receptor.
- Z_{c_N} = impedancia característica del ramal transmisor.
- Z_{N-1} = impedancia de carga del ramal receptor.
- Z_N = impedancia de carga del ramal transmisor.

Z_i = impedancia de carga del ramal i (puede tomar valores de Z_{ci} o $100Z_{ci}$ para ramales diferentes a TX y RX, $Z_N = Z_{c_N}$ para ramal TX (acoplado), $Z_{N-1} = 5Z_{c_{N-1}}$ para ramal RX).

C_{max} = Capacidad máxima entre los puntos TX y RX.

$C_i = C_{max}$ al procesar el ramal i .

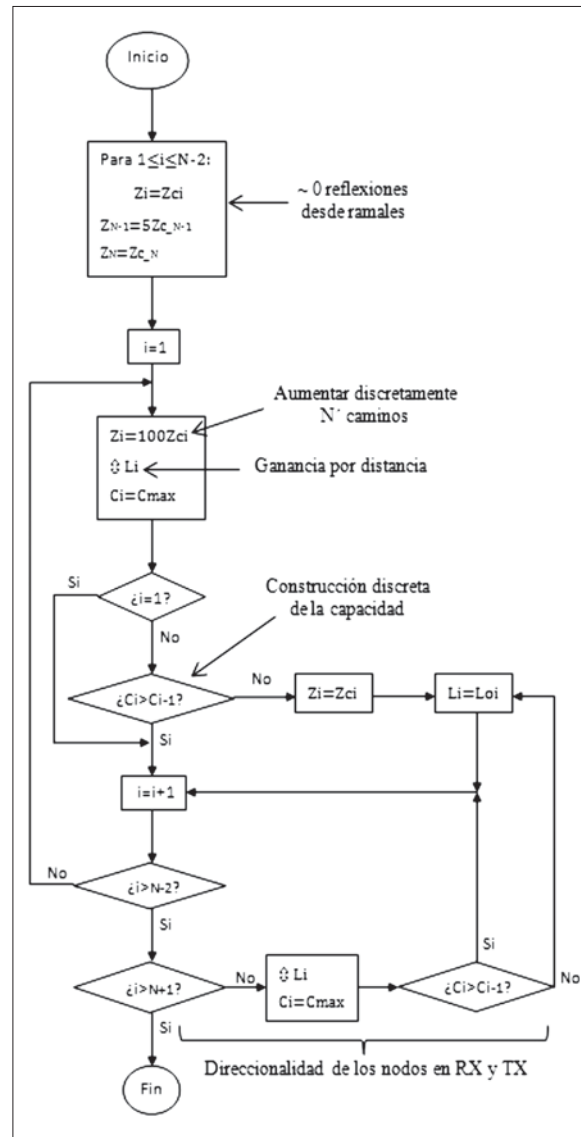


Figura 11. Diagrama de flujo del algoritmo AVLR

Fuente: elaboración propia.

L_i = longitud del ramal i .

L_{oi} = longitud original del ramal i .

⌘ L_i = variar L_i .

La tabla 1 muestra los pasos al usar el algoritmo AVLRL con el canal TX-RX de la figura 5.

En la figura 12 se observa que la mínima $|H(f)|$ en el canal original es $-15,3174$ dB y cuando se aplica el algoritmo AVLRL es $-3,6141$ dB. Por tanto, desde la perspectiva de ATPM, con el canal original se podría disminuir la DEP de transmisión $30-15,3174=14,6826$ dB y con el canal modificado $30-3,6141=26,3859$ dB.

CONCLUSIONES

Como se ha demostrado, es posible mejorar el desempeño de la técnica ATPM usando tres aportes teóricos hallados en esta investigación: ganancia por distancia, construcción discreta de la capaci-

dad de canal y direccionalidad en los nodos de transmisión y recepción. La mejora obtenida en la DEP de transmisión usando ATPM + AVLRL en el caso de estudio fue de $26,3859$ dB. Este resultado hace que el rendimiento de la técnica ATPM + AVLRL sea comparable a la de ranuras dinámicas (30 dB) y mejor que las demás técnicas mencionadas en el estado del arte. Esta mejora hace factible la reducción recomendada por ITU-R de 48 dB, ya que mediante la combinación ATPM + AVLRL y de ranuras dinámicas se lograría una reducción teórica de 30 dB + $26,4$ dB = $56,4$ dB. Adicionalmente, la técnica ATPM+AVLRL como técnica individual logra el cumplimiento de lo especificado por la FCC, ya que se lograría transmitir con -55 dBm/Hz - $26,4$ dB = $-81,4$ dBm/Hz, recordando que lo necesario sería -72 dBm/Hz. Desde el punto de vista teórico, se demuestra que el canal residencial puede tener un tratamiento determinístico y su respuesta puede ser alterada, diferenciándolo así de los modelos modernos de canales como el inalámbrico.

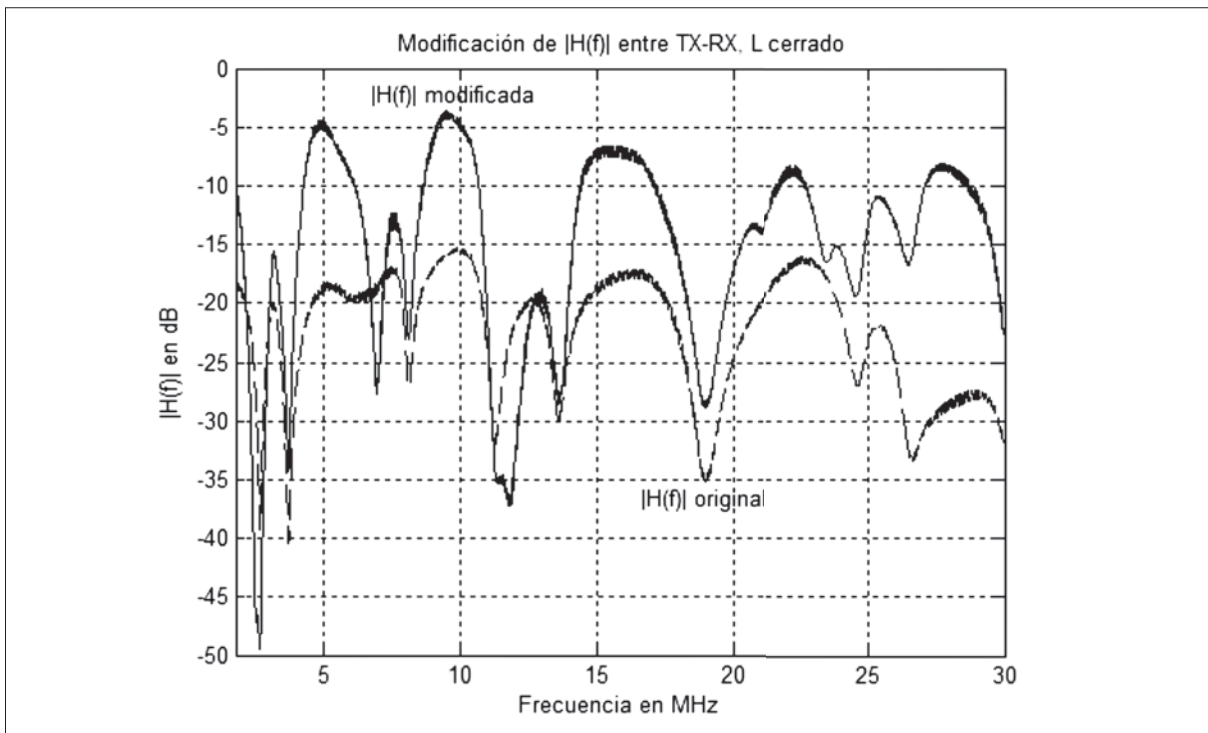


Figura 12. Resultado al aplicar el algoritmo AVLRL al canal TX-RX de la figura 5 con L cerrado

Tabla 1. Evolución del algoritmo AVLRL para el canal TX-RX de la figura 5. Cálculo con DEP de transmisión = -52 dBm/Hz

Paso	Número de ramal	Longitud final (m)	Factor k de kZc en la carga	Capacidad TX-RX (Mbps)
1	25	7,5	100	570,38
2	21	1,6	100	573,52
3	20	6,9	100	573,73
4	19	6,9	100	573,91
5	15	1,8	100	577,64
6	13	2,7	5	592,75
7	8	0,5	100	606,72
8	1	0,1	1	608,16

REFERENCIAS

- Babic, M. *et al.* (2005). *Theoretical Postulation of PLC Channel Model*. Technical Report, Open PLC European Research.
- Barmada, S. *et al.* (2009). Response Bounds of Indoor Power-Line Communication Systems With Cyclostationary Loads. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24 (2), 596-603.
- Benyoucef, D. (2003). A New Statistical Model of the Noise Power Density Spectrum for Powerline Communication. *International Symposium on Power-Line Communications and Its Applications*, pp. 136-141. Kyoto.
- Bewley, V. (1931, june). Traveling Waves on Transmission Systems. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 532-550.
- Bostoen, T., Van de Weil, O. (2003). Modeling the low-voltage power distribution network in the frequency band from 0.5 Mhz to 30 Mhz for broadband powerline communications. *Proceedings of Seminar on Broadband Communications, Accessing, Transmission, Networking*, pp. 171-178. Zurich.
- Chaaban, M., *et al.* (2009). Reduction of Power Field Radiation for PLC Applications. *AC-TEA'09, Advances in Computational Tools for Engineering Applications*, pp. 422-426. Zouk Mosheh.
- Cheng, W. (2003). *Home Networking Basis* (1a. ed.). New Jersey: Prentice Hall.
- Dorf, R. y Svoboda, J. (2006). *Circuitos Eléctricos* (6 ed.). México D.F., México: Alfaomega.
- Favre, P. *et al.* (2009). Radiation and disturbance mitigation in PLC networks. *20th Int. Zurich Symposium on EMC*, 5-8.
- Federal Communications Commission. (2009). § 15.209 Radiated Emission Limits. 810.
- IEEE Communications Society. (2010). *IEEE Standard for Broadband over Power Line Networks: Medium Access Control and Physical Layer Specifications*, IEEE

- Std 1901-2010*. New York: IEEE STANDARDS ASSOCIATION.
- ITU-R SM Series. (2011). Impact of power line telecommunication systems on radiocommunication systems operating in the LF, MF, HF and VHF bands below 80 MHz.
- Mekuria, G. (2008). *Mitigating EMI Powerline Communications Using Carrier-less UWB Pulses*. Disertación para obtener el título de Doctor en Ingeniería, Universidad de Duisburg-Essen, Duisburg-Essen.
- Pang, S. *et al.* (2010). Feasibility Study of a New Injection Method for EMI Reduction in Indoor Broadband PLC Networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25 (4), 2392-2398.
- Schwager, A. (2010). *Powerline Communications: Significant Technologies to become Ready for Integration*. Disertación para obtener el título de Doctor en Ingeniería, Universidad Duisburg-Essen, Duisburg-Essen.
- Stott, J. (2006, julio). Potentials threats to radio services from PLT systems. *EBU Technical Review*, 1-15.
- Tucci, M. (2009). *Computational Intelligence in Power-Line Communication Systems*. Beau Bassin, Mauritius: VDM Publishing House.
- Tucci, M. *et al.* (2007). Blind Channel Estimation for Power-line Communications by a Kohonen Neural Network. *IEEE International Symposium on Power-line Communications and Its Applications*, pp. 35-40. Pisa.
- Vukicevic, A. *et al.* (2007). On the Impact of Mitigating Radiated Emissions on the Capacity of PLC Systems. *IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, ISPLC '07*, pp. 487-492. Udine.
- Weling, N. (2011). Feasibility Study on Detecting Short Wave Radio Stations on the Powerlines for Dynamic PSD Reduction as Method for Cognitive PLC. *IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*, pp. 311-316.
- Zimmermann, M. y Doster, K. (1999). A Multipath Signal Propagation Model for the Power Line Channel in the High Frequency Range. *IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*, 45-51.
- Zimmermann, M. y Dostert, K. (2002). A Multipath Model for the Powerline Channel. *IEEE Transactions on Communications*.

Estimación de la cantidad de potencia suministrada por las celdas fotovoltaicas de un cubesat

Estimation of power delivered by photovoltaic cells of a cubesat

JESÚS D. GONZÁLEZ LLORENTE

Ingeniero electrónico, especialista en Ingeniería de Software, magíster en Ingeniería Eléctrica, Docente Investigador en la Universidad Sergio Arboleda. Bogotá, Colombia.

Contacto: jesusd.gonzalez@correo.usa.edu.co

GUSTAVO A. PUERTO LEGUIZAMÓN

Ingeniero de telecomunicaciones, doctor en Telecomunicaciones, docente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia.

Contacto: gapuerto@udistrital.edu.co

Fecha de recepción: 28 de septiembre de 2012

Clasificación del artículo: investigación

Fecha de aceptación: 23 de noviembre de 2013

Financiamiento: Universidad Sergio Arboleda

Palabras clave: celdas fotovoltaicas, CubeSat, órbitas, pico-satélites, potencia.

Key words: CubeSat, orbit, photovoltaic cells, pico-satellites, power.

RESUMEN

Los CubeSat son pequeños satélites que, debido a las restricciones propias de sus dimensiones, tienen como única fuente de energía celdas fotovoltaicas sobre su superficie. El propósito de este artículo es estimar la cantidad máxima de potencia que puede obtenerse de estas celdas solares, de manera que sea posible realizar un balance de energía cuando se diseñan misiones espaciales con este tipo de satélites. En el escenario analizado, un CubeSat de 10cm x 10cm x 10cm (1U) tiene una cara siempre orientada hacia la Tierra. Se consideran las pérdidas por el coseno del án-

gulo y la variación de la temperatura debido a la órbita del satélite. Para la estimación se usa un modelo matemático de las celdas solares, con el cual se calcula el punto de máxima potencia según el ángulo de incidencia de la radiación solar y la temperatura sobre una órbita baja alrededor de la Tierra. Los resultados muestran la variación de la potencia eléctrica máxima suministrada por los paneles sobre la porción iluminada de la órbita, sin considerar el albedo de la Tierra. Además de la potencia, se estiman las curvas corriente-voltaje para diferentes ubicaciones sobre la órbita del CubeSat.

ABSTRACT

CubeSats are small satellites that due to their size restriction have photovoltaic cells placed on their surface as the only energy source. The purpose of this work is to estimate the maximum amount of power that can be obtained from these solar cells, so that an energy balance can be made during the design of space mission with this kind of satellites. In the analyzed scenario, a CubeSat of 10cm x 10cm x 10cm (1U) has always a face oriented toward the Earth. Cosine loss and the temperature

variation due to satellite orbit are considered. For the estimation we use a mathematical model of the solar cells, which is also used to estimate the maximum power point according to the incidence angle of the solar radiation and the temperature on a low orbit around the Earth. The results show the variation of the maximum electric power supplied by the panels on the illuminated portion of the orbit, without considering the Earth's albedo. Apart from the power, the current-voltage curves are estimated for different locations over the CubeSat's orbit.

* * *

INTRODUCCIÓN

Un satélite se puede clasificar según su peso; en este contexto se tienen picosatélites que pesan menos de 1 kg, pasando por nanosatélites que tienen un peso entre 1 y 10 kg, minisatélites que pesan entre 100 y 500 kg hasta satélites estándar y supersatélites con un peso de varias toneladas (Fortescue, Starky Swinerd, 2011). El estándar CubeSat define un satélite en miniatura confinado en un cubo que tiene unas dimensiones de 10x10x10 cm y un peso que no supera los 1,33 kg. A este cubo se le denomina una unidad (1U) (The CubeSat Program, 2009). El estándar CubeSat fue ideado en 1999 por los profesores Jordi Puig-Suari de la Universidad Politécnica del estado de California (CalPoly) y el profesor Robert Twiggs de la Universidad de Stanford, con el fin de usarlos para realizar investigación espacial de carácter académico o empresarial (Heidt, Puig-Suari, Moore, Nakasukay Twiggs, 2000).

Los CubeSat están compuestos por varios subsistemas conocidos como: manejo de comandos y datos, comunicaciones, energía, orientación y la carga útil (Twiggs y Malphrus, 2011). El subsistema de energía se encarga de suministrar la potencia al resto de subsistemas para su funcionamiento, basado en la captura de energía por medio de paneles solares. Estos paneles están compues-

tos por celdas fotovoltaicas, las cuales convierten la luz solar en electricidad (Ropp, 2007). Las celdas fotovoltaicas para aplicaciones espaciales son fabricadas por Spectrolab y Emcore en los Estados Unidos, y por AzurSpace en Alemania. Estas celdas son conocidas como III-V, compuesta de una triple juntura de Arseniuro de Galio (GaAs), Fosfato de Indio con Galio (GaInP) y Germanio (Ge), y tienen una eficiencia de alrededor del 30 % para condición en el espacio (Bailey *et al.*, 2009).

Anteriormente se ha determinado la cantidad de potencia solar en la órbita de un picosatélite CubeSat, mostrando la variación de la irradiación solar según la traslación de la Tierra (Hernández, Gómez Vargas y Rocha, 2012). En este artículo se estima la cantidad de potencia que puede obtenerse de las celdas fotovoltaicas en las caras de un CubeSat 1U, considerando que el CubeSat tiene una órbita terrestre baja *Low Earth Orbit* (LEO) y un control de orientación pasivo de manera que una cara está siempre orientada hacia la Tierra. Para la determinación de la cantidad de potencia se usan modelos matemáticos de las celdas fotovoltaicas y se considera el ambiente espacial, considerando la temperatura y la variación de la irradiación solar debido al ángulo de incidencia sobre las celdas. Además, se consideran métodos de extracción de máxima potencia que acoplan la carga al panel.

ESTADO DEL ARTE

Celdas fotovoltaicas para uso espacial

Las celdas fotovoltaicas usadas para aplicaciones espaciales y para los CubeSat generalmente son de triple juntura (GaInP/GaAs/Ge), con un área de 26,62 cm², las celdas de Spectrolab y un área de 30,18 cm² las celdas de Azur Space (Azur Space, 2012; Spectrolab, 2010). Debido a que una cara de un CubeSat 1U tiene un área de 100 cm², se podrían ubicar máximo dos celdas por cara. Considerando celdas de 28,3 % de eficiencia de Spectrolab, cuyos parámetros tomados de la hoja de datos son listados en la tabla 1, cada celda suministra 1,04W bajo la condición de prueba (1353W/m² y 28 °C); sin embargo, la característica corriente-voltaje y, por tanto, la potencia suministrada varía dependiendo de la temperatura y de la irradiación, como también de la carga que alimentan. Por lo tanto, las dos celdas no siempre suministran 2,08 W.

Para el estudio del comportamiento eléctrico de las celdas fotovoltaicas existen diferentes modelos matemáticos, los cuales pueden estar basados en comportamiento o en circuitos (Gil-Arias y Ortiz-Rivera, 2008). El modelo basado en comportamiento, propuesto inicialmente en (Ortiz-Rivera y Peng, 2005), establece que la relación

Tabla 1. Parámetros de una celda fotovoltaica

Parámetros a 28°C y 1353W/m ²	Valor	Unidad
Voltaje de circuito abierto (V_{oc})	2665	mV
Corriente de corto circuito (I_{sc})	464	mA
Voltaje de máxima potencia (V_{mpp})	2350	mV
Corriente de máxima potencia (I_{mpp})	443,17	mA
Coefficiente de temperatura de voltaje (TC_v)	-5,9	mV/C
Coefficiente de temperatura de corriente (TC_i)	0,14	mA/C
Ancho de la celda	39,70	mm
Largo de la celda	69,11	mm

Fuente: Tomada de <http://www.spectrolab.com> (Spectrolab, 2010).

entre la corriente (I) y el voltaje (V) de la celda solar está dada por la ecuación (1)

$$I = \frac{I_x}{1 - \exp(-\frac{1}{b})} \left[1 - \exp\left(\frac{V}{bV_x} - \frac{1}{b}\right) \right] \quad (1)$$

Donde V_x es el voltaje de circuito abierto, I_x es la corriente de corto circuito del panel, la constante b es característica del panel y puede calcularse como se describe en (Gil-Arias y Ortiz-Rivera, 2008). Este modelo presenta una gran aproximación a la curva característica de las celdas fotovoltaicas de Spectrolab (Gonzalez-Llorente y Hurtado, 2012). Tanto el voltaje de circuito abierto V_x como la corriente de corto circuito I_x dependen de la temperatura y la irradiación, y están dados por las ecuaciones (2) y (3)

$$V_x = (T - T_n)TCV + A(\exp(B\frac{E_i}{E_{in}}) - \exp(C\frac{E_i}{E_{in}})) \quad (2)$$

$$I_x = \frac{E_i}{E_{in}}(I_{sc} + (T - T_n)TCI) \quad (3)$$

Donde T es la temperatura, T_n es la temperatura de prueba especificada en la hoja de datos, TCv es la constante de variación del voltaje con respecto a temperatura, TCi es la constante de variación de la corriente de corto circuito con respecto a la temperatura, E_i es la irradiación solar, E_{in} la irradiación solar estándar para pruebas especificada en la hoja de datos; las constantes A , B y C para la ecuación de circuito abierto se calculan evaluando la ecuación para V_x en tres puntos de operación conocidos, como lo describe Gil-Arias (2008).

Orbita sincrónica solar

La órbita de los CubeSat generalmente es sincrónica solar; esto es, el plano orbital rota aproximadamente un grado por cada día para mantenerse orientado hacia el sol, a medida que la tierra gira alrededor de este (Angelo, 2006). Por lo tanto, en algunos puntos de la órbita el satélite recibirá directamente la radiación solar, mientras que en otros puntos estará en la sombra de la tierra. Como consecuencia, la temperatura del CubeSat

variará continuamente al igual que la irradiación; así mismo, la irradiación absorbida dependerá de la orientación hacia el sol.

El periodo orbital, T_0 , puede calcularse a partir de la tercera ley de Kepler, la cual dice que el cuadrado del periodo orbital es proporcional al cubo del eje semimayor, como lo describe la ecuación (4).

$$T_0^2 = \frac{4\pi^2 a^3}{\mu} \quad (4)$$

Donde a es el eje semi-mayor, μ es la constante gravitacional del planeta (para la Tierra $\mu=3,986 \times 10^5 \text{ km}^3/\text{s}^2$) (Patel, 2005). Dado que los CubeSat generalmente son puestos en órbitas LEO (de 500 km a 2000 km), aplicando la ecuación (4) el periodo orbital está entre 96,6 minutos y 127,2 minutos. Para el caso del pico-satélite colombiano Libertad 1 con una altura de alrededor de 710 km, su periodo orbital es 99 minutos (Joya, 2007).

Características de irradiación y temperatura en la órbita

La potencia solar disponible en un sitio es conocida como irradiación y está dada en unidades de vatio por metro cuadrado (W/m^2) (Ropp, 2007). Los CubeSat generalmente están ubicados en orbitas LEO, por lo que su distancia a la tierra está entre 500 km y 2000 km (Angelo, 2006). La irradiación solar varía con la distancia al sol; la Organización Mundial de Meteorología (World Meteorological Organization [WMO]) estableció una irradiación promedio de $1365 \text{ W}/\text{m}^2$ a unidad astronómica (Hyder, Wiley, Halpert, Floody Sabripour, 2000). Debido a los movimientos de traslación de la Tierra y de los satélites en su órbita, la irradiación que recibe un picosatélite varía entre $1328,66 \text{ W}/\text{m}^2$ y $1421,06 \text{ W}/\text{m}^2$ (Hernández *et al.*, 2012). No obstante, la constante solar fuera de la atmosfera terrestre, conocida como Aire Masa Cero (AM0), aceptada por la Sociedad Americana para Prueba y Materiales (American

Society for Testing and Materials [ASTM]), es de $1366,1 \text{ W}/\text{m}^2 \pm 7 \text{ W}/\text{m}^2$ (Myers, Emery y Gueymard, 2002), el cual es el valor usado en el presente estudio.

En cuanto a la temperatura de los CubeSat, se han realizado análisis térmicos basados en modelos, los cuales muestran variaciones de -85°C a 50°C (Sintes Arroyo, 2009). Además, se cuenta con datos reales enviados por los CubeSat como los del CP3 de la Universidad Politécnica del Estado California (CalPoly), los cuales muestran una variación entre -30°C y 20°C (Friedel y McKibbin, 2011). La oscilación de la temperatura es de aproximadamente 90 minutos, lo cual es correspondiente con el periodo estimado anteriormente. El análisis térmico presentado por Erb (2011), muestra una variación de -32°C a 42°C , lo cual es más coherente con los datos reales del CP3.

METODOLOGÍA

El procedimiento desarrollado para la determinación de la potencia suministrada por las celdas fotovoltaicas de un CubeSat es presentado en el diagrama mostrado en la figura 1.

Primero se definió el escenario para el CubeSat, que como se especificó anteriormente tiene una órbita LEO sincrónica solar y un sistema de orientación, de manera que una cara se encuentra siempre orientada hacia la Tierra, como se muestra en la figura 2. Se considera una altura de 710 km y por tanto su periodo orbital es de 99 minutos; aunque la fracción de tiempo que un CubeSat recibe iluminación corresponde al 66,43 %, para este trabajo se considera un caso extremo de solo el 50 %, esto es 49,5 minutos. Debido al efecto de la irradiación y la temperatura sobre la potencia suministrada por las celdas fotovoltaicas a continuación se describe una aproximación de estas dos variables en el escenario especificado.

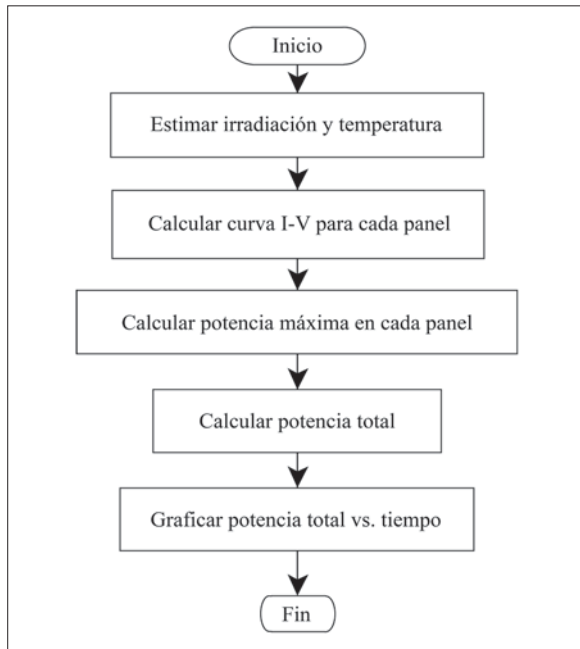


Figura 1. Método para estimar la potencia sobre el CubeSat

Fuente: elaboración propia.

Para este escenario, la cara número 2 del CubeSat siempre está orientada hacia la Tierra, y en el área iluminada las caras 1, 3 y 4 reciben irradiación. En el hemisferio norte se iluminan las caras 1 y 4, mientras que en el hemisferio sur las caras 3 y 4. El ángulo de incidencia cambia en cada punto de la órbita; en el área iluminada este ángulo va desde 0° a 180° . Para la cara 1 el área interceptada por la radiación es proporcional al coseno del ángulo θ entre 0° y 90° (Jackson, Moses, Scottiy Blosser, 1984). Para la cara 4 el área interceptada es proporcional al seno del ángulo θ . Por su parte el área interceptada de la cara 3 es proporcional al seno del ángulo θ entre 90° y 180° . La radiación absorbida por las celdas solares está directamente relacionada con el área interceptada y es mostrada en la figura 3.

En cuanto a la temperatura, un resultado importante derivado de los datos del CubeSat CP3 del Cal Poly es que no hay diferencia significativa entre la temperatura de los distintos lados del Cube-

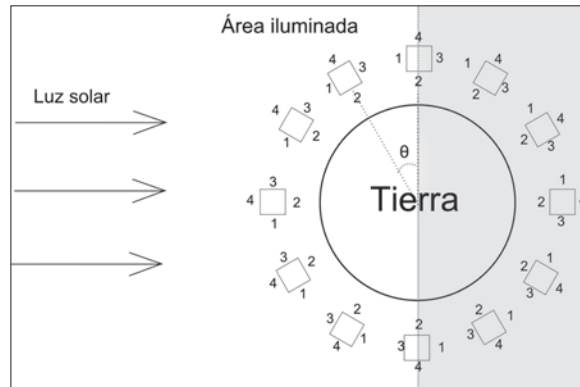


Figura 2. Escenario de un CubeSat 1U con cara No. 2 hacia la Tierra

Fuente elaboración propia.

Sat (Friedel y McKibbon, 2011). Basado en estos datos y el modelo de temperatura presentado Erb (2011), se propone una representación matemática simplificada para representar la variación de temperatura que permita considerar su efecto en los paneles solares. El aumento en la temperatura mientras recibe irradiación solar está descrita por la ecuación (5), la cual describe una variación de -32°C a 42°C mostrada en la figura 4 y similar a la presentada por Erb (2011).

$$T = 74\left(1 - e^{-\frac{t}{0.194}}\right) - 32, 0 \leq t \leq \frac{T}{2} \quad (5)$$

A partir de los modelos de la variación de la irradiación y la temperatura descritos anteriormente, se determina el voltaje de circuito abierto y la corriente de corto circuito de las celdas fotovoltaicas usando las ecuaciones (2) y (3); con estos valores se obtiene la curva corriente-voltaje usando la ecuación (1) y la potencia máxima con el método descrito anteriormente. Esto es calculado durante la parte iluminada de órbita; es decir durante 49,5 minutos ó 0,82 horas. Para la solución de estas ecuaciones se construyó un modelo en Matlab/Simulink®, el cual implementa cada una de las ecuaciones en bloques como lo muestra la figura 5, donde cada uno de los bloques Panel 1, Panel 4 y Panel 3 representa los paneles solares de las caras 1, 4 y 3 respectivamente.

RESULTADOS

Considerando la variación de la temperatura y de la irradiación incidente sobre las caras del CubeSat, la tabla 2 muestra el cambio del voltaje de circuito abierto y de la corriente de corto circuito del panel ubicado en una de las caras, así como también la variación de la potencia máxima. De igual manera la figura 6 muestra la variación de la curva corriente-voltaje para cada uno de las variaciones listadas, mientras que la figura 7 muestra la curva potencia-voltaje para las mismas condiciones.

Para determinar la potencia total obtenida de las tres caras iluminadas del satélite durante la porción iluminada de la órbita se determinó la potencia máxima en cada una de las caras y la suma total es mostrada en la figura 8. Este resultado muestra una potencia máxima de 2,9 W en 0,17 horas; esto es cuando dos caras reciben la misma irradiación y están sobre el hemisferio norte. Cuando dos caras reciben la misma irradiación sobre el hemisferio sur, los paneles suministran una potencia de 2,75 W. Cuando solo una cara recibe irradiación perpendicular a su superficie la potencia obtenida es 2,31 W, 2,06 W o 2,02 W según la cara que es iluminada.

Tabla 2. Variación de las condiciones del panel sobre la cara No. 1

Tiempo(h)	Temperatura(°C)	Irradiación(W/m ²)	V _{oc} (V)	I _{sc} (mA)	Potencia(W)
0,0	-32,00	1367,0	6,02	455,6	2,31
0,1	-2,19	1248,8	5,60	420,0	1,98
0,2	15,60	914,7	5,21	309,3	1,35
0,3	26,23	422,4	4,78	143,3	0,57

Fuente: elaboración propia.

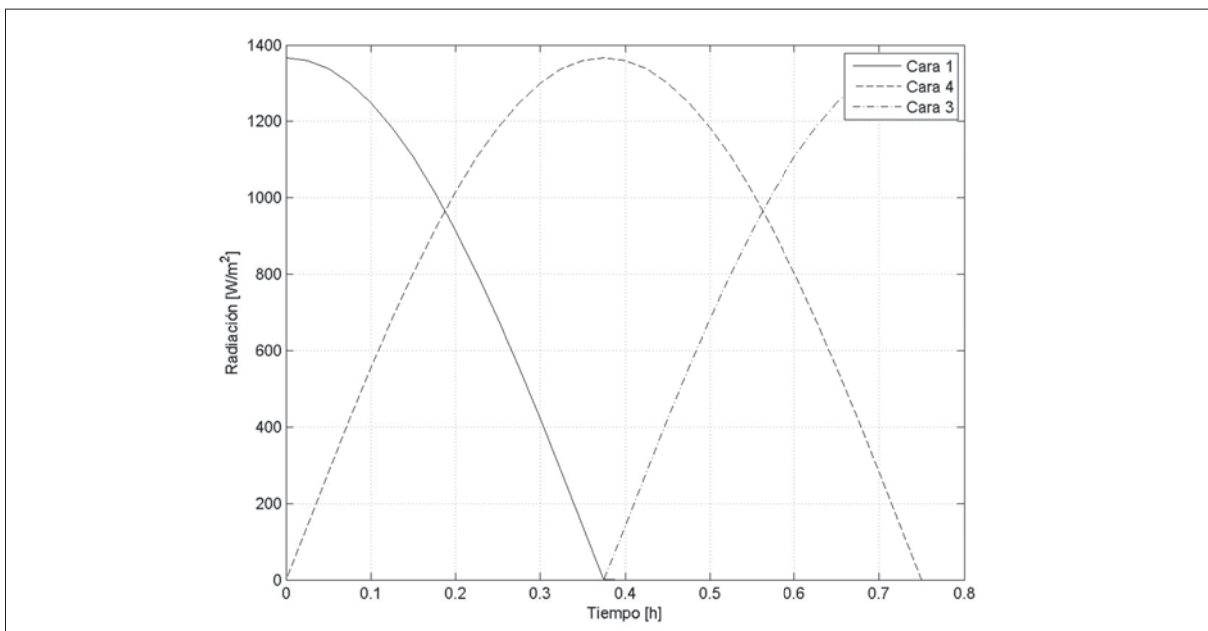


Figura 3. Irradiación solar interceptada por las caras del CubeSat

Fuente: elaboración propia.

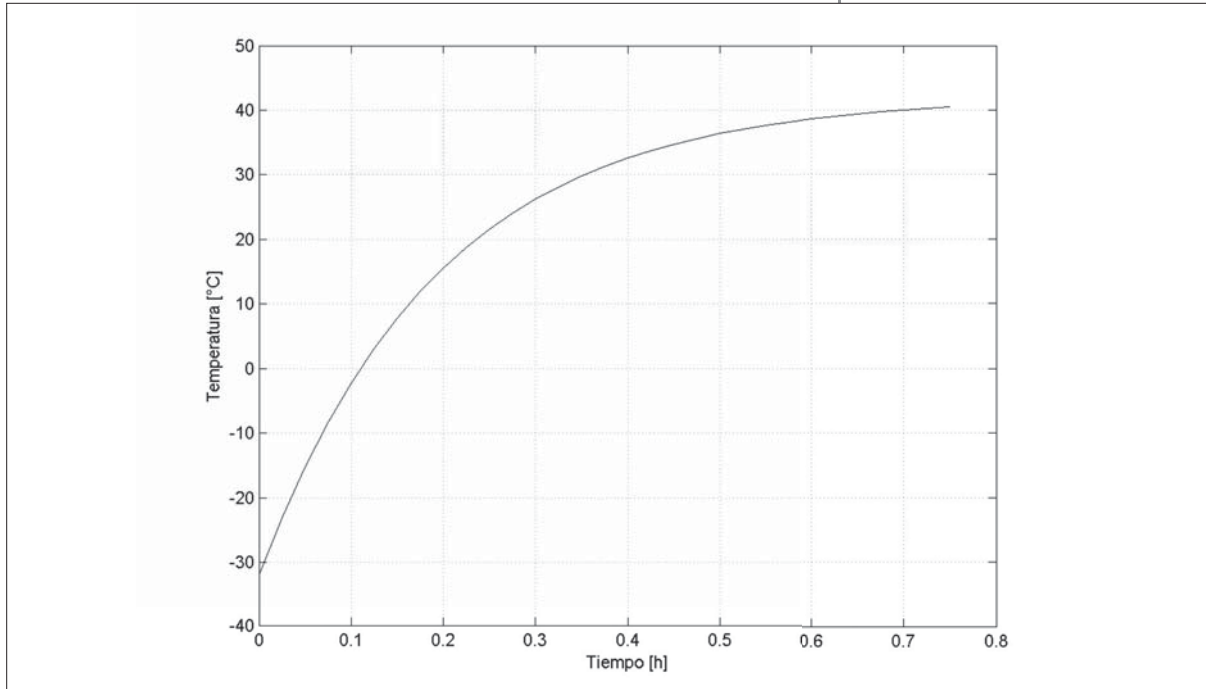


Figura 4. Temperatura del CubeSat durante la parte iluminada de la órbita

Fuente: elaboración propia.

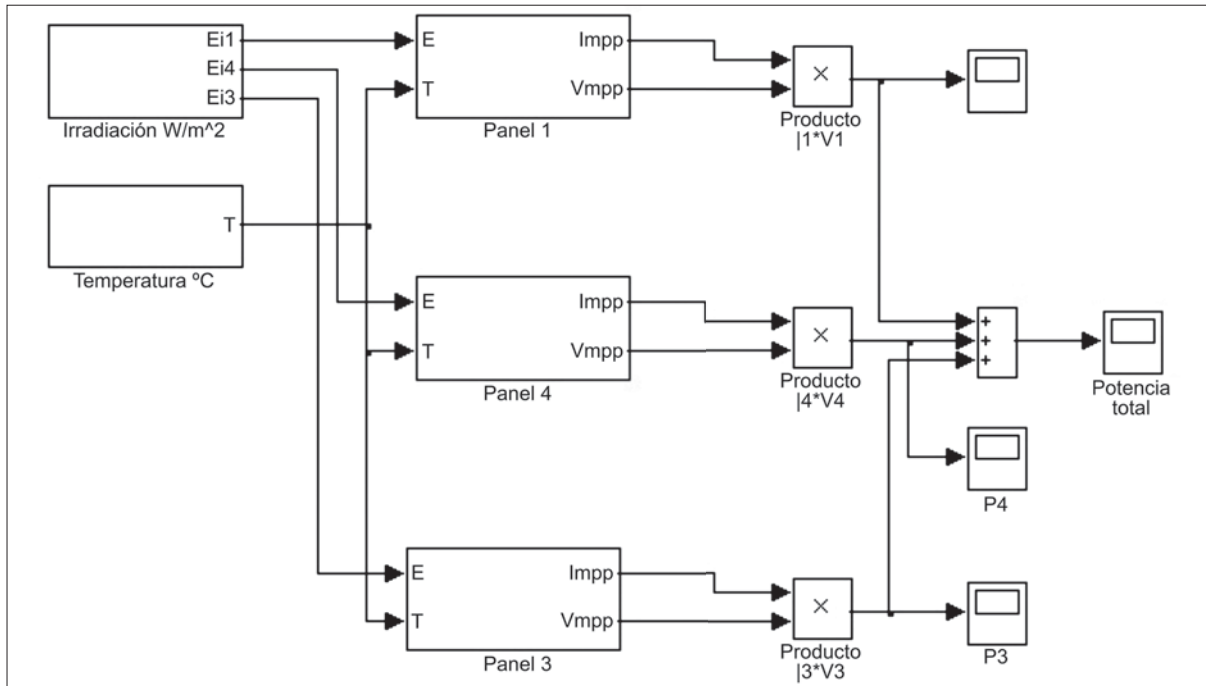


Figura 5. Modelo Matlab/Simulink para estimar la potencia de los paneles de un CubeSat

Fuente: elaboración propia.

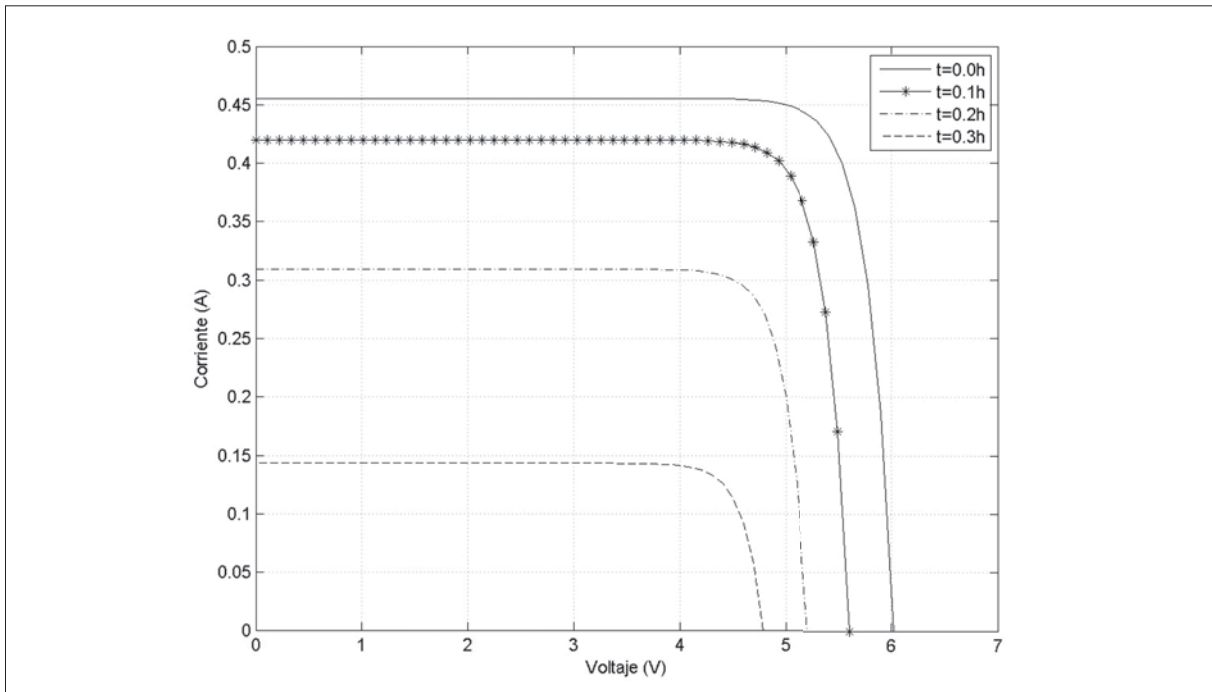


Figura 6. Variación de la curva corriente voltaje sobre el panel de la cara No. 1

Fuente: elaboración propia.

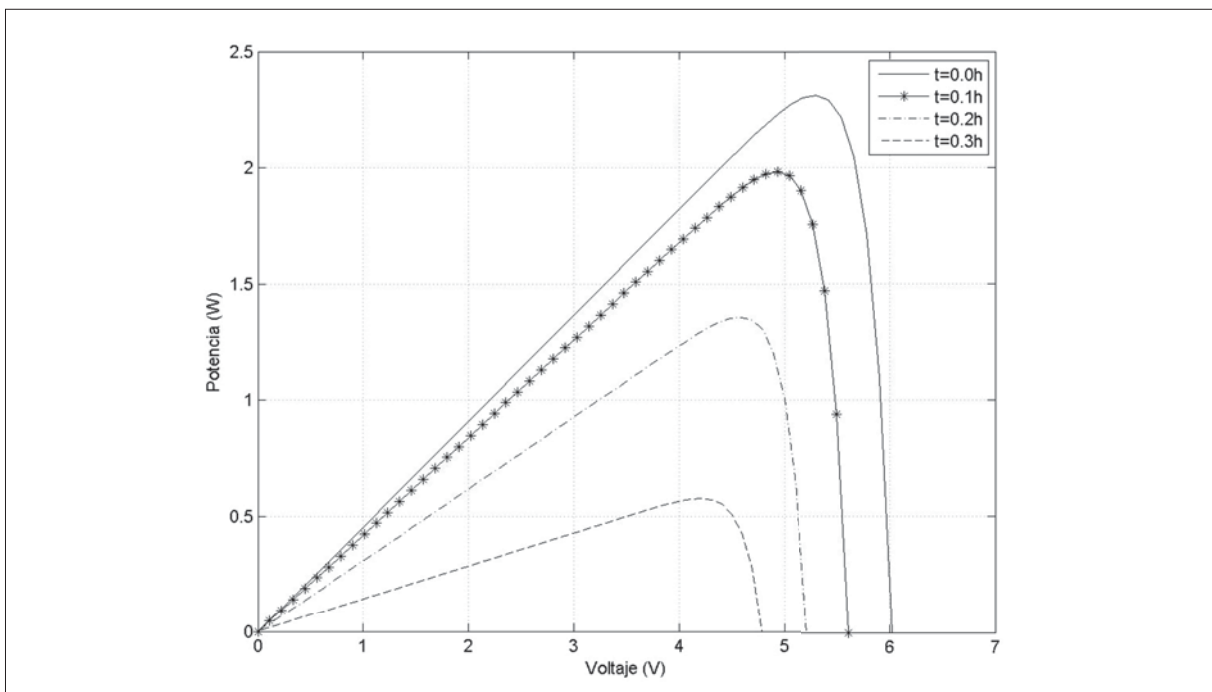


Figura 7. Variación de la curva potencia-voltaje sobre el panel de la cara no.1

Fuente: elaboración propia.

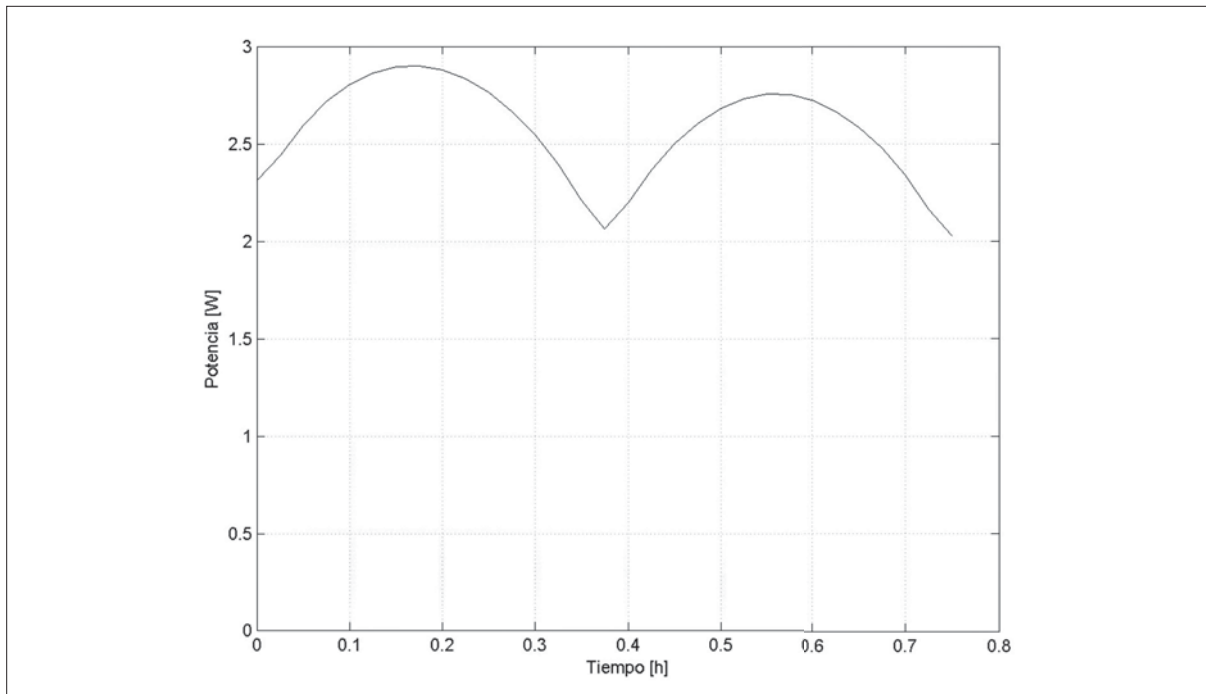


Figura 8. Variación de la potencia máxima sobre la parte iluminada de la órbita del CubeSat

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

En este trabajo se mostró el uso de modelos de comportamiento de las celdas fotovoltaicas para la estimación de la potencia suministrada por los paneles solares de un CubeSat con una cara orientada hacia la tierra. Se consideró el efecto de la irradiación y la temperatura en la variación del comportamiento de las celdas fotovoltaicas, teniendo en cuenta las pérdidas por la variación del ángulo de incidencia de la radiación solar.

El efecto del cambio del ángulo de incidencia de irradiación sobre los paneles solares afecta considerablemente las curvas corriente-voltaje de las celdas fotovoltaicas, disminuyendo la corriente de corto circuito y, por tanto, la potencia máxima. Sin embargo, la variación de la temperatura afecta en menor escala, disminuyendo la potencia de 2,9 W a 2,75 W para el mismo ángulo de incidencia al aumentar la temperatura.

Cuando el CubeSat entra a la región iluminada de su órbita, su temperatura se encuentra aproximadamente en $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$ lo cual provoca que un panel entregue una potencia máxima de 2,31 W. La temperatura aumenta debido al efecto de la radiación solar incidente hasta aproximadamente $40\text{ }^{\circ}\text{C}$; sin embargo, debido a la variación del ángulo de incidencia, la irradiación efectiva absorbida por el CubeSat disminuye desde su valor máximo 1367 W/m^2 hasta cero, lo que provoca la disminución de la potencia máxima que podría suministrar el panel solar. No obstante, el instante en el que dos caras reciben irradiación a un ángulo de 45° es cuando se obtiene mayor potencia de los paneles solares, la cual es aproximadamente 2,8 W.

FINANCIAMIENTO

Este resultado de investigación está en el marco del proyecto Análisis para Optimizar el Sistema de Energía de un CubeSat de 3U, código USA-

2011-0077, perteneciente a la línea de investigación Desarrollo Tecnológico del Grupo de Investigación Esinusa de la Universidad Sergio

Arboleda y financiado con recursos del Fondo de Investigación e Innovación de la Universidad Sergio Arboleda (FIIUSA).

REFERENCIAS

- Angelo, J. (2006). *Satellites*. New York, USA: Facts on File.
- Azur Space (2012). *30% Triple Junction GaAs Solar Cell*. Heilbron: AZUR SPACE Solar Power GmbH. Recuperado de <http://azur-space.de/index.php?mm=162>
- Bailey, S., McNatt, J., Raffaele, R., Hubbard, S., Forbes, D., Fritzenmeier, L. y Maurer, W. (2009). The future of space photovoltaics. *34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)* Philadelphia, Estados Unidos.
- Erb, D. (2011). *Evaluating the Effectiveness of Peak Power Tracking Technologies for solar array on small spacecraft* (Tesis de maestría). Lexington, Estados Unidos: University of Kentucky.
- Fortescue, P., Stark, J. y Swinerd, G. (Eds.). (2011). *Spacecraft Systems Engineering*. Croydon, UK: John Wiley & Sons, Ltd.
- Friedel, J. y McKibbin, S. (2011). *Thermal Analysis of the CubeSat CP3 Satellite. Aerospace Engineering*. San Luis Obispo, Estados Unidos: California Polytechnic State University. Recuperado de <http://digitalcommons.calpoly.edu/aerosp/46/>.
- Gil-Arias, O. (2008). *Modelado y Simulación de Dispositivos Fotovoltaicos*. (Tesis de maestría). Recinto de Mayaguez, Mayagüez, Puerto Rico: Universidad de Puerto Rico.
- Gil-Arias, O. y Ortiz-Rivera, E. I. (2008). A general purpose tool for simulating the behavior of PV solar cells, modules and arrays. *IEEE 11th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics*, pp. 1-5. Recuperado de: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=4634686>
- Gonzalez-Llorente, J. y Hurtado, R. (2012). Comparación de modelos para celdas solares de alta eficiencia usadas en pequeños satélites y CubeSats. *10th Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI)*. Panama.
- Heidt, H., Puig-Suari, J., Moore, A. S., Nakasuka, S. y Twiggs, R. J. (2000). CubeSat: A new Generation of Picosatellite for Education and Industry Low-Cost Space Experimentation. *14th Annual/USU Conference on Small Satellites*, Estados Unidos.
- Hernández, S. R., Gómez Vargas, E. y Rocha, D. F. (2012). Evaluación del desempeño de la radiación emitida por el sol como sistema de suministro de energía a un pico-satélite CUBESAT. *Revista Tecnura*, 16(31), 19-32.
- Hyder, A. K., Wiley, R. L., Halpert, G., Flood, D. J. y Sabripour, S. (2000). *Spacecraft Power Technologies*. London: Imperial College Press.
- Jackson, L. R., Moses, P. L., Scotti, S. J. y Blosser, M. L. (1984). *Operational Modules for Space Station Construction*. Hampton, VA, USA. Recuperado de http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19840013540_1984013540.pdf

- Joya, R. A. (2007). Liberta I. Primer satélite colombiano en el espacio. *Revista Innovación y Ciencia*, 14 (2), 16-23.
- Myers, D. R., Emery, K. y Gueymard, C. (2002). Revising and Validating Spectral Irradiance Reference Standards for Photovoltaic Performance. *ASES/ASME Solar Energy Conference*, Estados Unidos, pp. 367-376.
- Ortiz-Rivera, E. I. y Peng, F. Z. (2005). Analytical Model for a Photovoltaic Module using the Electrical Characteristics provided by the Manufacturer Data Sheet. *IEEE 36th Conference on Power Electronics Specialists*, pp. 2087-2091. Brasil: RECIFE.
- Patel, M. (2005). *Spacecraft Power System*. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press.
- Ropp, M. (2007). Photovoltaic Systems. *Encyclopedia of Energy Engineering and Technology*, Estados Unidos: CRC Press.
- Sintes Arroyo, P. (2009). *Mission and Thermal Analysis of the UPC CubeSat*. (Tesis de maestría) Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Spectrolab. (2010). *28.3% Ultra Triple Junction (UTJ) Solar Cells*. Sylmar. Estados Unidos. Recuperado de <http://www.spectrolab.com/DataSheets/cells/PV UTJ Cell 5-20-10.pdf>
- The CubeSat Program. (2009). *CubeSat Design Specification rev. 12*. Estados Unidos: California Polytechnic State University. Recuperado de http://www.cubesat.org/images/developers/cds_rev12.pdf
- Twiggs, R. y Malphrus, B. (2011). Alternative Spacecraft Designs: CubeSats. *Space Mission Engineering The New SMAD*. Hawthorne, CA, USA: Space Technology Library.

Análisis del procesamiento de los datos de entrada para un localizador de fallas en sistemas de distribución

Analysis of the input data processing for fault location in power distribution systems

WALTER JULIÁN GIL GONZÁLEZ

Ingeniero electricista, candidato a magíster en Ingeniería Eléctrica. Investigador del Grupo de Investigación en Calidad de Energía Eléctrica y Estabilidad de la Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia.

Contacto: wjgil@utp.edu.co

JUAN JOSÉ MORA FLÓREZ

Ingeniero electricista, doctor en Ingeniería Eléctrica. Docente titular de la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP). Pereira, Colombia.

Contacto: jjmora@utp.edu.co

SANDRA MILENA PÉREZ LONDOÑO

Ingeniera electricista, doctora en Ingeniería. Docente titular de la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP). Pereira, Colombia.

Contacto: saperez@utp.edu.co

Fecha de recepción: 15 de mayo de 2013

Clasificación del artículo: investigación

Fecha de aceptación: 23 de noviembre de 2013

Financiamiento: Colciencias, contrato 0977-2012

Palabras clave: atributos, máquinas de soporte vectorial, métodos de normalización, precisión y sistemas de distribución.

Key words: Accuracy and power distribution systems, attribute, normalization methods, support vector machines.

RESUMEN

En este artículo se presenta una comparación de cinco métodos de normalización de datos para un método de clasificación basado en la máquina de

soporte vectorial (SVM), con el objetivo de determinar cuál es la influencia de estos métodos en la precisión y el esfuerzo computacional del localizador de fallas en sistemas de distribución. La metodología propuesta se prueba en un sistema

de distribución estándar de 34 nodos de la IEEE, el cual se subdivide en 11 zonas, de donde se obtiene una base de datos de 6442 registros de falla monofásica a diferentes condiciones de carga. La comparación de estos métodos de normalización muestra que el método *Min-Max* presentó un mejor rendimiento en tiempo computacional y precisión promedio del localizador de fallas, en los casos estudiados.

ABSTRACT

Aimed to determine the effect of data normalization on the accuracy and the computational

effort of a fault locator based on support vector machines (SVM), a comparison of five different data preprocessing strategies are analyzed in this paper. The proposed methodology is tested on an IEEE 34-bus test feeder, which is subdivided in eleven zones, by using a database of 6442 single-phase to ground faults obtained under different load conditions. Considering the testing scenarios, the comparison of the proposed preprocessing methods shows that Min-Max method has the best performance mainly considering computational effort and average accuracy on the fault locator.

* * *

INTRODUCCIÓN

La calidad de la energía eléctrica en sistemas de distribución se ha convertido en un tema de amplia investigación, debido al interés que tienen los operadores de red en mejorar la continuidad del servicio, para cumplir con índices fijados por los entes regulatorios. Una de las causas que más afecta la continuidad del servicio, y por ende los índices de continuidad, son las fallas paralelas en el sistema. Debido a esto es necesario conocer de manera confiable y rápida dónde ocurrió la interrupción del servicio, para la restauración de este en el menor tiempo posible.

Para la solución del problema de localización de fallas en sistemas de distribución se han desarrollado diversas metodologías, como las presentadas en Mora, Carrillo y Meléndez (2008) y en Morales, Mora y Vargas (2009); estas se fundamentan en la estimación de la impedancia. Dichos métodos estiman la distancia en falla a partir de la tensión y corriente en estado de falla y prefalla, y de los parámetros que definen el modelo del sistema de potencia. Sin embargo, el resultado es una distancia que se puede cumplir para varios sitios, debido a la característica radial y ramificada de los

sistemas de distribución, en lo que se denomina como la múltiple estimación de la falla (Morales, *et al.*, 2009). Para la solución de este problema se proponen los métodos basados en el conocimiento (MBC) (Gutiérrez, Moray Pérez, 2010) (Thukaram, Khinchay Vijaynarasimha, 2005).

Los MBC se fundamentan en la extracción de conocimiento oculto en bases de datos. Generalmente, estas bases de datos requieren un procesamiento que comprende diferentes tareas tales como: manejo de ruido, manejo de datos faltantes, detección de datos anómalos, selección de atributos y normalización. La selección de atributos consiste en reconocer las características más significativas en una base de datos para los MBC, con el fin de mejorar el desempeño predictivo del clasificador para obtener el máximo rendimiento con el mínimo esfuerzo (Maldonado, 2007; Maldonado y Weber, 2012). Por otra parte, la normalización de los datos consiste en transformar los valores dentro de la base de datos en un rango, generalmente entre cero y uno, lo cual puede mejorar la precisión, eficiencia y tiempos computacionales de los métodos MBC (Farrús, Anguita, Hernando y Cerdà, 2005; Al Shalabi y Shaaban, 2006; Sola y Sevilla, 1997).

En este artículo se propone realizar una comparación de la influencia de varios métodos de normalización aplicados en el procesamiento de los datos, ante diferentes atributos de entrada, para determinar cuál se adecua mejor al problema de localización de fallas en sistemas de distribución. El MBC que se utilizó es la máquina de soporte vectorial (SVM), el cual ha presentado alto desempeño en este problema, según se reporta en varios documentos (Gutiérrez *et al.*, 2010; Thukaram *et al.*, 2005).

Este artículo está dividido en cinco secciones. La siguiente sección presenta los aspectos teóricos básicos de las técnicas de normalización utilizadas y del método de clasificación. En la sección tres se muestra el desarrollo de la metodología propuesta. En la sección cuatro se discute la aplicación de la metodología, las pruebas y los resultados obtenidos. Finalmente, la sección cinco presenta las conclusiones más importantes de la investigación.

ASPECTOS TEÓRICOS

Máquina de soporte vectorial (SVM)

La SVM es un MBC que se basa en los fundamentos de la teoría de aprendizaje estadístico desarrollada por Vapnik y Chervonenkis (Moguerza y Muñoz, 2006), la cual, a diferencia de otras teorías, tiene la ventaja de que no requieren ningún tipo de conjetura sobre la densidad de probabilidad de los datos. La arquitectura de la SVM solo depende de un parámetro de penalización denotado como C y la función *kernel* (incluyendo sus parámetros). En el caso de la función base radial (RBF) existe solo un parámetro γ , como se presenta en la ecuación (1) (Burges, 1998).

$$k(\vec{x}, \vec{y}) = e^{-\gamma \|\vec{x} - \vec{y}\|^2} \quad (1)$$

Donde, \vec{x} y \vec{y} son los atributos de entrada a los MBC.

Búsqueda tabú

La búsqueda tabú es una técnica metaheurística de optimización que se utiliza para resolver problemas de alta complejidad. Este tipo de técnicas proporcionan soluciones factibles con bajos costos computacionales y, aunque en algunos casos no alcanza el óptimo global del problema, siempre presenta soluciones de gran calidad. La idea básica de la búsqueda tabú es la utilización explícita de un historial de búsqueda (una memoria de corto plazo), tanto para escapar de los óptimos locales como para implementar una estrategia de exploración y evitar la búsqueda repetida en la misma región (Glover y Kochenberger, 2002). Esta memoria de corto plazo se implementa como una lista tabú, donde se mantienen las soluciones visitadas más recientemente para excluirlas de los próximos movimientos. En cada iteración se elige la mejor solución entre las permitidas y esta se añade a la lista tabú.

Métodos de normalización

La normalización de los datos es necesaria para adecuarlos a los problemas de clasificación, debido que estos no están definidos en las mismas escalas numéricas y en algunos casos siguen diferentes distribuciones. Las normalizaciones más utilizadas para los problemas de clasificación son: *Min-Max*, *Z-score*, *Decimal-Scaling*, *Median and median absolute deviation* y *Sigmoid function* (Farrús *et al.*, 2005; Anil, Karthik y Arun, 2005; Snellick, Uludag, Mink, Indovina y Jain, 2005).

Min-Max (MM)

En este método el valor mínimo y máximo de la base de datos se desplaza a los valores 0 y 1, respectivamente, y todos los demás datos se transforman en el rango $\{0,1\}$, utilizando la ecuación (2) (Farrús *et al.*, 2005).

$$s'_{ij} = \frac{s_{ij} - \min_j}{\max_j - \min_j} \quad (2)$$

Donde, s'_{ij} es el dato i transformado del conjunto de datos j ; s_{ij} es el dato i original del conjunto de datos j ; min_j es el valor mínimo del conjunto de datos j ; max_j es el valor máximo del conjunto de datos j .

Z-score (ZS)

Este método transforma los datos a una distribución con media 0 y desviación estándar 1. En la ecuación (3), los operadores $mean()$ y $std()$ denotan la media aritmética y la desviación estándar, respectivamente (Snelick *et al.*, 2005).

$$s'_{ij} = \frac{s_{ij} - mean(S_j)}{std(S_j)} \quad (3)$$

Donde, S_j es el conjunto de datos j ; $mean(S_j)$ es la media aritmética del conjunto de datos j ; $std(S_j)$ es la desviación estándar del conjunto de datos j .

Decimal-scaling (DS)

Este método normaliza los datos en un valor entre -1 y 1, sin incluirlos. Los datos se normalizan según la ecuación (4) (Han y Kamber, 2006).

$$s'_{ij} = \frac{s_{ij}}{10^k} \quad (4)$$

Donde, k es el menor número entero con el cual se cumple que el *maximo* ($|s'_{ij}|$) < 1.

Median and median absolute deviation (MMAD)

Este método es insensible a valores atípicos y puntos en colas de la distribución. Por lo tanto, un esquema de normalización combinando la media y la desviación media absoluta de los datos sería un método más robusto. Los datos se normalizan según la ecuación (5) (Anil *et al.*, 2005).

$$s'_{ij} = \frac{s_{ij} - mean(S_j)}{MAD} \quad (5)$$

Donde MAD se calcula como se muestra en la ecuación (6).

$$MAD = mean(|S_j - mean(S_j)|) \quad (6)$$

Función sigmoial (SF)

Esta función también se conoce como una *squashing function*, porque transforma los datos en un rango de entrada entre 0 a 1. Esta función es no lineal y diferenciable, y permite que las técnicas de clasificación tengan un mejor manejo de los datos en problemas que no son linealmente separables. Los datos se normalizan según la ecuación (7) (Han y Kamber, 2006).

$$s'_{ij} = \frac{1}{1 + e^{-T_{ij}}} \quad (7)$$

Donde T_{ij} se calcula como se muestra en la ecuación (8).

$$T_{ij} = \frac{s_{ij} - mean(S_j)}{std(S_j)} \quad (8)$$

METODOLOGÍA

La metodología general utilizada para observar la influencia del procesamiento de datos de entrada en el problema de la localización de fallas en sistemas de distribución se presenta gráficamente en el esquema mostrado en la figura 1.

En la etapa 1 se obtienen los registros de falla del circuito bajo estudio y se realiza el preprocesamiento de los datos. En este artículo se hace énfasis en dicha etapa, ya que es donde se muestra la estrategia de normalización para cada combinación de atributos en el procesamiento. En la etapa 2 se parametriza el SVM usando la técnica metaheurística búsqueda tabú para el ajuste óptimo del localizador. Finalmente, en la etapa 3 se utilizan los parámetros encontrados (C, γ) en la etapa ante-

rior y los datos procesados, para el entrenamiento y la validación del método y, así, localizar la falla.

Etapa 1

Esta etapa consiste en extraer y preparar la base de datos para el MBC y sigue varios pasos, los cuales se describen a continuación.

Adquisición de datos

Los datos utilizados para el entrenamiento se obtienen de la simulación del sistema de distribución analizado, a partir de un proceso conjunto de la herramienta de simulación *Alternative Transients Program* (ATP) y el software MATLAB. Esta herramienta permite la simulación automática de condiciones de falla monofásica, bifásica y trifásica, con diferentes valores de resistencia de falla (Pérez, Mora y Pérez, 2010).

Zonificación de la red de distribución

Los métodos de clasificación requieren que a cada uno de los datos de entrenamiento se le asigne una clase, con la cual se realizará la cla-

sificación de un nuevo dato. Esta clase corresponde a una zona del sistema de distribución bajo análisis. Una zona no debe tener más de un lateral del circuito, para eliminar el problema de múltiple estimación (Gutiérrez *et al.*, 2010). Además, es posible proponer una zonificación con zonas grandes, si así lo requiere el operador de red, aunque también es posible reducir su tamaño y así dar importancia a aquellas zonas donde la probabilidad de ocurrencia de fallos sea mayor, o donde sea necesario restaurar el servicio de forma más rápida.

Procesamiento de los datos de entrada

El procesamiento de datos es un paso muy importante para los problemas de clasificación, debido a que este proceso incluye extracción de características, depuración, normalización y selección de los datos, lo cual ayuda a mejorar la predicción de los MBC con menores esfuerzos computacionales. Si los datos no son procesados pueden ser inconsistentes, o contener información errónea e irrelevante para los MBC, lo cual puede producir menor precisión en los resultados (Kotsiantis, Kanellopoulos y Pintelas, 2006).

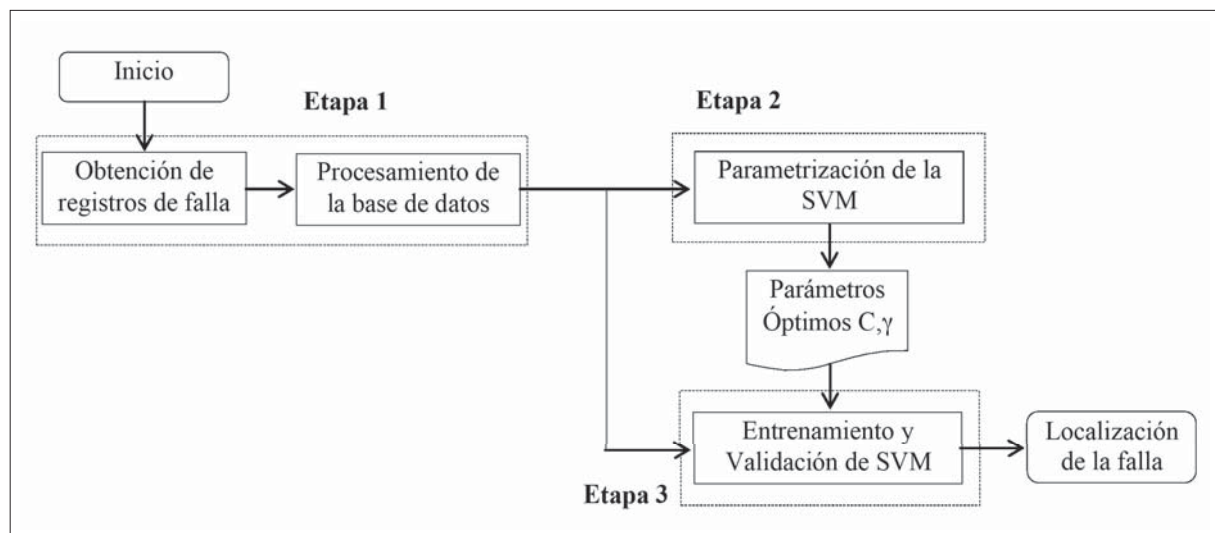


Figura 1. Esquema general del método de clasificación

Fuente: elaboración propia.

El primer paso del procesamiento de los datos de falla está asociado con la extracción de información significativa, denominada atributos. En este artículo, los atributos utilizados corresponden a la variación en magnitud de la tensión (dV) y de la corriente (dI), y la variación angular de la tensión ($d\theta_v$) y de la corriente de fase ($d\theta_f$). Para cada atributo se consideran medidas de fase y de línea.

Se analizan solo las combinaciones que contienen atributos de tensión y corriente ($dV, dI, d\theta_v, d\theta_f$), debido a que estas combinaciones han presentado buenos resultados como se muestra en Gil (2011). Adicionalmente, a cada atributo se le asigna una etiqueta relacionada con la zona en la cual ocurrió la falla (Gutiérrez *et al.*, 2010).

Finalmente, la base de datos se normaliza, debido a que puede existir gran diferencia entre los valores de un mismo atributo (Kotsiantis *et al.*, 2006), o entre los valores de diferentes atributos. Con la normalización se evita que atributos con magnitudes más altas dominen en el cálculo de la zona. Adicionalmente, esta normalización puede disminuir el costo computacional, mejorar el desempeño y la precisión del método de clasificación (Al Shalabi y Shaaban, 2006; Sola y Sevilla, 1997; Snelick *et al.*, 2005).

Otros problemas requieren el manejo de ruido, detección de datos anómalos y estrategias para manejar datos faltantes. Sin embargo, ninguna de dichas tareas se realiza en este caso debido a que las bases de datos obtenidas mediante simulación están completas.

Etapa 2

En esta etapa se determinan los parámetros óptimos para el clasificador (C, γ) y se implementa la búsqueda tabú mediante la técnica de validación cruzada para 10 combinaciones de atributos

que se utilizaron como entradas (Gutiérrez *et al.*, 2010). El error de validación cruzada se utiliza como la función objetivo de la técnica de optimización, y así el algoritmo evoluciona hasta encontrar el menor error de validación.

La validación cruzada es un método que consiste en dividir la base de datos de entrenamiento en n partes iguales. A continuación, el localizador basado en SVM se entrena con los datos contenidos en las $n-1$ partes de la base de datos y la parte restante para hallar el error de validación, calculada como se muestra en la ecuación (9). Este proceso se repite n veces, lo que permite utilizar todas las muestras para hallar un error de validación con esta base de datos. Por último, se promedian los n valores de error encontrados y se obtiene un solo error de validación (Morales *et al.*, 2009).

$$\text{Error de validación} = \frac{\text{Número de datos mal clasificados}}{\text{Número de datos de prueba}} \cdot 100\% \quad (9)$$

Esta etapa se realiza para cada método de normalización propuesto y para cada combinación de atributos de entrada.

Etapa 3

El desarrollo de esta etapa se hace con todos los datos de fallas registrados en la subestación. A partir de esos registros se entrena y se valida la SVM. La validación consiste en evaluar el rendimiento del localizador a partir del cálculo la precisión del método ante datos desconocidos (datos que no fueron considerados en la etapa de parametrización y entrenamiento). La precisión se calcula como se muestra en la ecuación (10).

$$\text{Precisión} = \frac{\text{Número de datos bien clasificados}}{\text{Número de datos de prueba}} \cdot 100\% \quad (10)$$

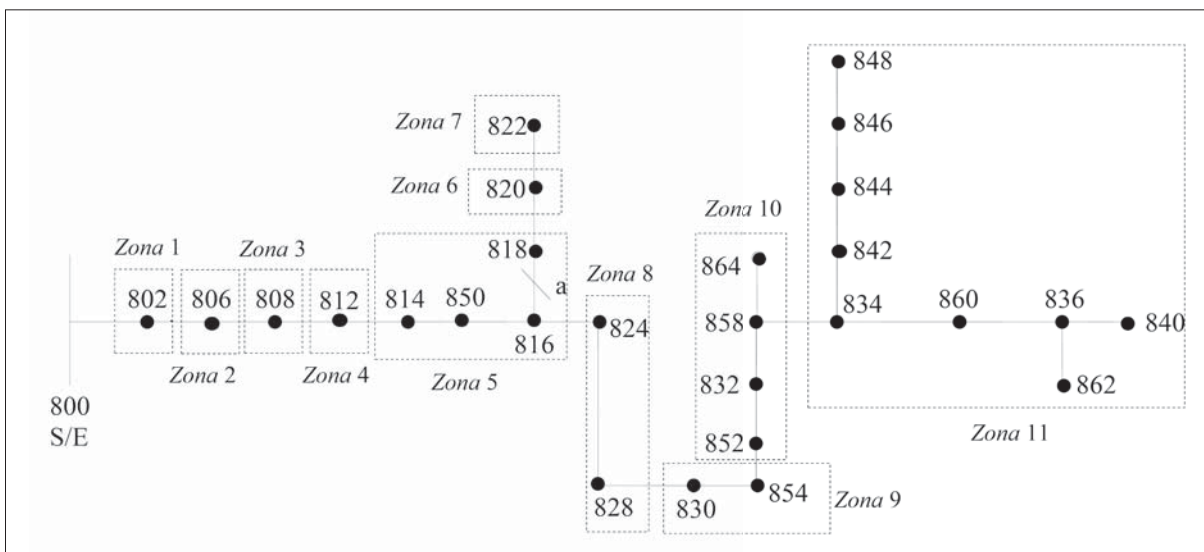


Figura 2. Sistema de pruebas IEEE de 34 nodos y zonificación para localización de fallas

Fuente: tomada de Gil, Mora y Pérez (2013).

RESULTADOS DE APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN PROTOTIPO

La metodología propuesta se prueba en el sistema IEEE de 34 nodos, presentado en IEEE, 2004, el cual es un circuito de distribución real ubicado en Arizona, operado a 26.7 kV. El sistema presenta cargas desbalanceadas, laterales monofásicos y múltiples calibres de conductor. El sistema de potencia de prueba se divide en 11 zonas, tal como se muestra en la figura 2.

Los escenarios considerados para probar la metodología contiene fallas monofásicas en todos los nodos, excepto en la subestación, utilizando diferentes resistencias de falla que varían entre 0,05Ω a 40 Ω, los cuales son valores comúnmente utilizados en este tipo de pruebas (Dagenhart, 2000). Adicionalmente, se simularon cuatro escenarios de carga, además de la nominal; los escenarios simulados fueron: variación de carga 30-60 %, 60-85 %, 85-105 % y 30-105 %. Se obtuvieron en total 6642 datos para parametrización, entrenamiento y validación.

Prueba a condición nominal

Esta prueba se realizó con fallas simuladas a condición nominal del circuito en la parametrización, entrenamiento y validación. En la parametrización se utilizaron los valores de resistencia de 8, 16, 24,32 y 40 Ω, para un total de registros de fallas de 135 datos, para obtener los parámetros óptimos de la SVM (C, γ). La base de datos para entrenamiento contiene 297 datos y está compuesta con valores de resistencia de fallas entre 0,05 Ω a 40 Ω en pasos de 4 Ω.

La base de datos de la validación está conformada por 810 casos simulados con resistencia de falla entre 1 a 39 Ω en pasos de 1 Ω (sin incluir los casos ya utilizados en la parametrización y entrenamiento).

Para cada método de normalización se trabajaron dos casos de normalización por atributo. El primer caso propuesto consiste en utilizar los atributos presentados en la sección "Procesamiento de los datos de entrada" como tres atributos individuales, uno por cada fase del sistema. Por ejemplo, los valores de la variación de la tensión

de la fase a (dV_a) se normalizan si se utilizan únicamente los valores de la tensión de la fase a. En el segundo caso se utilizó el conjunto de medidas de las tres fases como un solo atributo; es decir, la normalización del atributo dV_a tiene en cuenta los valores de las tres fase (dV_a , dV_b , y dV_c).

Las tablas 1 y 2 muestran los tiempos de parametrización para cada método de normalización y combinación de atributos. Solo se muestran estos tiempos debido a que el proceso de parametrizaciones el que consume más tiempo de la metodología propuesta.

Como se puede observar en la tabla 1, el método de normalización escogido afecta el tiempo de parametrización del localizador. Se puede notar que el tiempo es menor cuando se utiliza el método de normalización MM, con un promedio de 2,8 segundos.

La tabla 2 muestra que para cuando se consideran ternas de atributos se consume un tiempo mayor

Tabla 1. Tiempo de parametrización para cuando se consideran atributos individuales

Atributos	Tiempo de Simulación (seg.)				
	MM	ZS	DS	MMAD	SF
$dV, dl, d\theta_v$	0,246	5,707	19,594	3,567	6,068
$dV, dl, d\theta_l$	5,093	5,396	18,070	3,695	4,783
$dV, d\theta_v, d\theta_l$	8,309	4,556	23,411	8,378	6,847
$dl, d\theta_v, d\theta_l$	7,118	3,668	15,454	3,663	6,258
$dV, dl, d\theta_v, d\theta_l$	3,276	2,918	3,836	3,213	4,945
$dV_L, dl_L, d\theta_{VL}$	0,243	3,449	5,107	3,395	4,411
$dV_L, dl_L, d\theta_{LL}$	0,225	3,576	5,981	3,619	5,345
$dV_L, d\theta_{VL}, d\theta_{LL}$	0,230	3,657	6,223	3,538	5,655
$dl_L, d\theta_{VL}, d\theta_{LL}$	0,247	3,655	4,808	7,510	5,266
$dV_L, dl_L, d\theta_{VL}, d\theta_{LL}$	3,206	3,204	5,532	3,607	4,325

Fuente: elaboración propia.

sin importar el método de normalización. Además, en este caso el método de normalización MM fue el más rápido. También, se observa que el método DS en promedio fue el más demorado sin importar cómo se manejen los atributos. Los resultados para la validación a condiciones nominales, para los cinco métodos de normalización y los dos casos se presentan en las tablas 3 y 4.

Tabla 2. Tiempo de parametrización para cuando se consideran ternas de atributos

Atributos	Tiempo de Simulación (seg.)				
	MM	ZS	DS	MMAD	SF
$dV, dl, d\theta_v$	15,868	6,337	9,373	5,514	11,021
$dV, dl, d\theta_l$	21,276	6,876	7,048	5,188	10,028
$dV, d\theta_v, d\theta_l$	15,347	8,556	7,583	4,659	14,372
$dl, d\theta_v, d\theta_l$	13,257	6,384	21,314	5,342	9,737
$dV, dl, d\theta_v, d\theta_l$	26,652	6,113	106,909	4,976	11,270
$dV_L, dl_L, d\theta_{VL}$	15,504	6,146	53,961	6,606	12,854
$dV_L, dl_L, d\theta_{LL}$	30,752	10,179	206,896	6,747	14,322
$dV_L, d\theta_{VL}, d\theta_{LL}$	11,341	8,463	16,590	5,309	14,077
$dl_L, d\theta_{VL}, d\theta_{LL}$	10,050	5,230	145,345	6,871	9,070
$dV_L, dl_L, d\theta_{VL}, d\theta_{LL}$	17,869	7,578	23,224	6,709	20,137

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Validación a carga nominal para cuando se consideran atributos individuales

Atributos	Precisión (%)				
	MM	ZS	DS	MMAD	SF
$dV, dl, d\theta_v$	100,00	97,90	100,00	100,00	99,75
$dV, dl, d\theta_l$	100,00	98,64	100,00	99,63	100,00
$dV, d\theta_v, d\theta_l$	100,00	100,00	99,75	95,19	99,75

Continúa

Atributos	Precisión (%)				
	MM	ZS	DS	MMAD	SF
$dI, d\theta_v, d\theta_l$	100,00	100,00	99,88	99,75	100,00
$dV, dI, d\theta_v, d\theta_l$	100,00	100,00	100,00	100,00	99,75
$dV_L, dI_L, d\theta_{VL}$	100,00	100,00	100,00	100,00	99,88
$dV_L, dI_L, d\theta_{IL}$	100,00	100,00	99,63	100,00	100,00
$dV_L, d\theta_{VL}, d\theta_{IL}$	100,00	100,00	100,00	100,00	99,01
$dI_L, d\theta_{VL}, d\theta_{IL}$	100,00	100,00	99,75	94,94	99,75
$dV_L, dI_L, d\theta_{VL}, d\theta_{IL}$	100,00	100,00	99,01	100,00	100,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Validación a carga nominal para cuando se consideran ternas de atributos

Atributos	Precisión (%)				
	MM	ZS	DS	MMAD	SF
$dV, dI, d\theta_v$	100,00	95,43	100,00	99,14	96,67
$dV, dI, d\theta_l$	100,00	95,19	98,15	98,02	100,00
$dV, d\theta_v, d\theta_l$	100,00	99,88	100,00	98,52	100,00
$dI, d\theta_v, d\theta_l$	99,88	99,75	99,63	99,51	100,00
$dV, dI, d\theta_v, d\theta_l$	100,00	95,93	89,63	99,88	100,00
$dV_L, dI_L, d\theta_{VL}$	100,00	100,00	43,70	99,38	100,00
$dV_L, dI_L, d\theta_{IL}$	99,75	97,28	92,47	95,06	100,00
$dV_L, d\theta_{VL}, d\theta_{IL}$	99,51	95,68	99,63	98,77	99,88
$dI_L, d\theta_{VL}, d\theta_{IL}$	100,00	100,00	91,85	95,06	100,00
$dV_L, dI_L, d\theta_{VL}, d\theta_{IL}$	100,00	95,43	96,30	98,89	100,00

Fuente: elaboración propia.

Prueba a diferentes condiciones de carga

En esta prueba se consideran todas las variaciones de carga propuestas en cuarto apartado. La base de datos para entrenamiento contiene 1485

datos y está compuesta con valores de resistencia de fallas entre $0,05 \Omega$ a 40Ω en pasos de 4Ω . La base de datos de la validación está conformada por 4050 casos simulados con resistencia de falla entre 1 a 39Ω en pasos de 1Ω (sin incluir los casos ya utilizados en el entrenamiento).

Los resultados para la validación de todas las condiciones de carga, los cinco métodos de normalización y para los dos casos propuestos en la sección "Prueba a condición nominal" se presentan en las tablas 5 y 6.

El tiempo requerido en la etapa de entrenamiento cuando se consideran atributos individuales es cerca de 1507 segundos usando un PC Core2Quad @2.66 GHz, 4GB RAM. En la tabla 5 se puede notar que el localizador tiene un buen desempeño con precisiones mayores a 93,23 % para todos los métodos de normalización. Adicionalmente, el método de normalización MM presentó un mejor desempeño en promedio que los otros de métodos de normalización.

En este caso los atributos de línea presentaron en promedio un mejor desempeño que los atributos de fase.

El tiempo requerido en la etapa de entrenamiento cuando se consideran ternas de atributos fue aproximadamente de 7157 segundos. Se observa en la tabla 6 que en promedio el rendimiento de los métodos de normalización bajaron y el tiempo de computacional subió respecto a cuando se consideran atributos individuales. Además, cuando se consideraron atributos individuales tuvo un mejor rendimiento de 1,85 % en promedio, respecto a cuando se consideran ternas de atributos.

Las combinaciones de atributos $dV_L, dI_L, d\theta_{VL}$ y $dV_L, dI_L, d\theta_{VL}, d\theta_{IL}$ para ambos casos presentaron en promedio mejor desempeño, del 0,66 %, que las demás combinaciones analizadas.

Tabla 5. Validación de todas las condiciones de carga para cuando se consideran atributos individuales

Atributos	Precisión (%)				
	MM	ZS	DS	MMAD	SF
dV, dl, dθ _v	99,65	96,84	100,00	99,83	99,88
dV, dl, dθ _i	100,00	98,27	99,83	99,51	100,00
dV, dθ _v , dθ _i	99,75	99,85	99,78	95,14	99,98
dl, dθ _v , dθ _i	99,83	99,98	98,52	99,80	99,01
dV, dl, dθ _v , dθ _i	100,00	100,00	98,72	99,93	99,58
dV _L , dl _L , dθ _{VL}	100,00	100,00	100,00	99,88	100,00
dV _L , dl _L , dθ _{IL}	99,78	100,00	100,00	99,95	99,80
dV _L , dθ _{VL} , dθ _{IL}	100,00	100,00	100,00	100,00	99,36
dl _L , dθ _{VL} , dθ _{IL}	99,85	99,95	93,23	99,83	100,00
dV _L , dl _L , dθ _{VL} , dθ _{IL}	100,00	100,00	96,15	99,95	96,79

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Validación de todas las condiciones de carga para cuando se consideran ternas de atributos

Atributos	Precisión (%)				
	MM	ZS	DS	MMAD	SF
dV, dl, dθ _v	99,73	96,15	98,74	99,01	97,01
dV, dl, dθ _i	100,00	95,85	96,57	97,90	99,33
dV, dθ _v , dθ _i	100,00	99,88	97,36	98,15	99,28
dl, dθ _v , dθ _i	99,93	99,60	99,33	97,21	98,40
dV, dl, dθ _v , dθ _i	99,65	96,07	90,54	99,65	99,60
dV _L , dl _L , dθ _{VL}	100,00	99,98	96,89	98,89	99,58
dV _L , dl _L , dθ _{IL}	99,83	97,46	91,65	90,89	100,00
dV _L , dθ _{VL} , dθ _{IL}	95,51	95,56	96,62	97,80	98,96
dl _L , dθ _{VL} , dθ _{IL}	99,93	99,88	92,59	89,63	99,95
dV _L , dl _L , dθ _{VL} , dθ _{IL}	100,00	97,43	97,06	98,69	99,78

Fuente: elaboración propia.

Finalmente, se puede notar que el método DS en los dos casos propuestos fue inferior en precisión promedio y tiempo a los demás métodos utilizados en este artículo.

CONCLUSIONES

El procesamiento de datos es muy importante para los métodos clasificación, debido a que este afecta directamente su rendimiento y su tiempo de ejecución. En el presente artículo se demuestra la influencia del procesamiento de los datos para un localizador de fallas y se consideran cinco métodos de normalización y diez combinaciones de atributos. En general, el localizador presentó un buen desempeño para todos los métodos de normalización utilizados; sin embargo, el método de normalización MM presentó el más alto desempeño, con una precisión promedio de 99,68 % para los dos casos analizados. Este hecho representa una ventaja, debido a que su formulación es más intuitiva y su cálculo es simplificado.

También se observa que trabajar los atributos, cuando se consideran atributos individuales, tiene una gran ventaja en tiempo computacional y desempeño del clasificador, y es independiente del método de normalización utilizado. Además, cuando se consideran atributos individuales los tiempos de simulación de los atributos de línea son menores, en promedio de 3,82 segundos, que los atributos de fase.

Finalmente, utilizar combinaciones de atributos de línea tiene ventajas sobre los de fase en tiempo y desempeño para el problema de localización de fallas en sistemas de distribución.

FINANCIAMIENTO

Este trabajo se realizó en el Grupo de Investigación en Calidad de Energía Eléctrica y Estabilidad (ICE³) de la Universidad Tecnológica de Pereira

(UTP), por medio del proyecto de investigación “Desarrollo de localizadores robustos de fallas paralelas de baja impedancia para sistemas de dis-

tribución de energía eléctrica -LOFADIS2012-”, contrato 0977-2012, financiado por Colciencias.

REFERENCIAS

- Al Shalabi, L. y Shaaban, Z. (2006). Normalization as a Preprocessing Engine for Data Mining and the Approach of Preference Matrix. *International Conference on Dependability of Computer Systems*, 25-27 May.
- Anil, J., Karthik, N. y Arun, R. (2005). Score Normalization in Multimodal Biometric Systems. *Pattern Recognition*, 38(12), 2270-2285.
- Burges, C. (1998). A Tutorial on Support Vector Machines for Pattern Recognition. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 2(2), 121-127.
- Dagenhart, J. (2000). The 40- Ω Ground-Fault Phenomenon”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 36(1), 30-32.
- Farrús, M., Anguita, J., Hernando, J. y Cerdà, R. (2005). Fusión de sistemas de reconocimiento basados en características de alto y bajo nivel. *Actas del III Congreso de la Sociedad Española de Acústica Forense*, Santiago de Compostela, Spain, Oct.
- Gil, W. (2011). *Utilización de técnicas metaheurísticas en la búsqueda de parámetros óptimos para la calibración de las máquinas de soporte vectorial (MSV), para la localización de fallas en sistemas de distribución*. Tesis de Pregrado no publicada, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.
- Gil, W. Mora, J. y Pérez, S. (2013). Análisis comparativo de metaheurísticas para calibración de localizadores de fallas en sistemas de distribución. *Ingeniería y Competitividad*, 15(1), 103-115.
- Glover, F. y Kochenberger, G. (2002). *Handbook of Metaheuristics*. EEUU: Kluwer Academic Publishers.
- Gutiérrez, J., Mora, J. y Pérez, S. (2010). Strategy Based on Genetic Algorithms for an Optimal Adjust of a Support Vector Machine Used for Locating Faults in Power Distribution Systems. *Revista de la Facultad de Ingeniería*, 53, 174-187.
- Han, J. y Kamber, M. (2006). *Data Mining: Concepts and Techniques*. New York: Morgan Kaufmann Publishers.
- IEEE (2004). Guide for Determining Fault Location on AC Transmission and Distribution Lines. *IEEE Std C37.114-2004*, 1-36.
- Kotsiantis, S., Kanellopoulos, D. y Pintelas, P. (2006). Data Preprocessing for Supervised Learning. *International Journal of Computer Science*, 1(2), 111-117.
- Maldonado, S. (2007). *Utilización de support vector machines no lineal selección de atributos para credits coring*. Tesis de Maestría no publicada, Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile.
- Maldonado, S. y Weber, R. (2012). Modelos de Selección de Atributos para Support Vector Machines. *Revista Ingeniería de Sistemas*, 26, 49-70.

- Moguerza, J. y Muñoz, A. (2006). Support Vector Machines with Applications. *Statistical Science*, 21(4), 322-336.
- Mora, J., Carrillo, G. y Meléndez, J. (2008). Comparison of Impedance Based Fault Location Methods for Power Distribution Systems. *Electric Power Systems Research*, 28(7), 657-666.
- Morales, G., Mora, J. y Vargas, H. (2009). Fault Location Method Based on the Determination of the Minimum Fault Reactance for Uncertainty Loaded and Unbalanced Power Distribution Systems. *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA), 2010 IEEE/PES*, Sao Paulo, Brazil, 8-10 Nov.
- Pérez, L., Mora, J. y Pérez, S. (2010). Diseño de una herramienta eficiente de simulación automática de fallas en sistemas eléctricos de potencia. *Dyna*, 77(164), 178-188.
- Snelick, R., Uludag, U., Mink, U., Indovina, M. y Jain, A. (2005). Large-Scale Evaluation of Multimodal Biometric Authentication Using State-Of-The-Art Systems. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 27(3), 450-455.
- Sola, J. y Sevilla, J. (1997). Importance of Input Data Normalization for the Application of Neural Networks to Complex Industrial Problems. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 44(3), 1464-1468.
- Thukaram, D., Khincha, H. y Vijaynarasimha, H. (2005). Artificial Neural Network and Support Vector Machine Approach for Locating Faults in Radial Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20(2), 710-721.

Inspección de calidad para un sistema de producción industrial basado en el procesamiento de imágenes

Quality inspection based on image processing for an industrial production system

ANDRÉS JARAMILLO ORTIZ

Ingeniero en Mecatrónica. Auxiliar de investigación del grupo GAV en la Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia.

Contacto: *andresjaor@gmail.com*

ROBINSON JIMÉNEZ M.

Ingeniero electrónico, magíster en Automatización Industrial. Docente Investigador grupo GAV, Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia.

Contacto: *robinson.jimenez@unimilitar.edu.co*

OLGA LUCÍA RAMOS

Ingeniero electrónico y magíster en Teleinformática. Docente Investigador grupo GAV, Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia.

Contacto: *olga.ramos@unimilitar.edu.co*

Fecha de recepción: 28 de noviembre de 2012

Clasificación del artículo: investigación

Fecha de aceptación: 23 de noviembre de 2013

Financiamiento: Universidad Militar Nueva Granada

Palabras clave: inspección de calidad, procesamiento digital de imágenes, visión artificial.

Key words: artificial vision, image processing, quality inspection.

RESUMEN

Este trabajo presenta el diseño y construcción de un sistema de visión artificial, basado en el procesamiento digital de imágenes que permita automatizar la inspección de calidad en un proceso de producción. El prototipo desarrollado fue im-

plementado en una banda transportadora que hace parte de una cadena de ensamblaje y su función es medir el diámetro interno y externo, con una sensibilidad de +/- 0,1 mm y una velocidad de procesamiento de 1400 piezas por hora, de dos tipos de piezas que simulan la geometría de una arandela y un tornillo. Lo anterior con el propósito de iden-

tificar cuáles piezas se encuentran dentro de los requerimientos de fábrica para su posterior ensamblaje. Para desarrollar el prototipo de manera oportuna se dividió el trabajo en tres etapas principales: *hardware*, control electrónico y *software*.

ABSTRACT

This paper details implementation of an artificial vision system through digital image processing,

which allows automation of the quality control process. The prototype was implemented in a conveyor belt segment and was designed to discern the quality of two different industrial shapes, with a sensibility of $\pm 0,1$ mm and a speed rate of 1400 shapes per hour, identifying which pieces are within manufacture quality requirements. This work is divided in three main sections: *hardware*, electronic control and software.

* * *

INTRODUCCIÓN

Para la fabricación de productos con altos estándares de calidad, considerando los grandes niveles de producción a gran escala que se presentan en la actualidad, es necesario investigar y desarrollar nuevas tecnologías que permitan aumentar la producción y al mismo tiempo aseguren la calidad y la homogeneidad de un producto. El control de calidad surge como una necesidad global en la industria para desarrollar productos que cumplan altos estándares de precisión y desempeño. Algunas empresas del sector industrial involucran complejos procesos de calidad que demandan gran cantidad de recursos humanos y económicos; estos representan un costo que las empresas tienen que asumir y por lo tanto desempeñan un papel importante en el precio final de un producto (Paez, 2010; Peña, 2007). Por esta razón, actualmente las empresas invierten grandes sumas de dinero en sistemas mecatrónicos que involucran visión de máquina para automatizar diferentes procesos de producción con el propósito de reducir costos (Hoffman, 1999).

Dadas las características de inspección visual propias de la clasificación de productos de calidad, en el campo de la ingeniería se están aplicando diversas técnicas de visión artificial (Aguilar, 2008; Armesto, 2011; Mital, 1998), a fin de automatizar dicho proceso. Tales desarrollos se derivan de que la inspección de procesos industriales, como

el control de calidad realizado por personas, en ocasiones resulta deficiente y subjetivo, sea por factores laborales, motivacionales o personales, entre otros (Aguilar, 2008). Adicionalmente, se han desarrollado aplicaciones, en sectores como la industria de autopartes y la industria de alimentos, en las cuales se logró obtener dispositivos que superan en velocidad y precisión la mano de obra humana, como se puede apreciar en los trabajos realizados en Fernandez (2009), Yizhong (2010), Borsu (2012) y San Miguel (2009). Con la automatización no solo se puede mejorar el proceso, sino que también se recolectan y almacenan datos en tiempo real que permiten identificar fallas en la producción (Xiang-Na, 2011).

Los sistemas de visión artificial son muy sensibles a los cambios de luz que inciden en la superficie de los objetos, por lo que es necesario incluir en el diseño de un sistema de control de calidad un grado de robustez que le permita trabajar bajo perturbaciones de iluminación, sin que estas afecten los resultados de selección. Una alternativa para solucionar el ruido lumínico que pueda generar el ambiente es incluir un medio de iluminación constante y uniforme al sistema, tal y como se presenta en Hocenski (2010). Los diodos LED (Light Emitter Diodo) son una fuente de luz económica, segura y energéticamente eficiente, si se compara con la energía que utiliza un bombillo de filamento. Un bombillo estándar consume alrededor de 100 veces más electricidad

que un LED, por la misma cantidad de *Lumens*; esto se debe a que aproximadamente el 70 % de la energía que consume un bombillo de filamento se disipa en calor. Así mismo, los bombillos convencionales están sujetos a la frecuencia del suministro eléctrico (50-60 hz); estas frecuencias relativamente bajas podrían alterar la calidad de las imágenes (Min Xu, 2010). En algunos procesos, como en la inspección de calidad en soldaduras (Yuan Li, 2008; Usamentiaga, 2011), es necesario utilizar cámaras e iluminación a frecuencias de onda diferentes a la luz visible; en estos casos se utiliza tecnología infrarroja. Este sistema tiene la característica de ser menos susceptible a perturbaciones luminosas del ambiente y se utiliza con regularidad en procesos en los que la temperatura debe ser inspeccionada constantemente (Gholam, 2008).

En un sistema de visión artificial, los datos que obtiene el sensor o dispositivo de adquisición de imágenes son transmitidos a una Unidad de Procesamiento Digital de Imágenes (UPDI); esta se encarga de procesar la imagen obtenida con el objetivo de suprimir la información no necesaria para la aplicación (filtrado) y posterior manipulación para extracción de características y respectiva clasificación. Varios desarrollos como los presentados en Hajimowlana (1997), Hocenski (2009) y Jinhui Cai (2006), utilizan como UPDI tarjetas FPGA, debido a su capacidad de procesamiento en paralelo; esto permite implementar algoritmos de procesamiento de imágenes de alta resolución más rápido que un computador, ya que se tiene un *hardware* dedicado y no se utilizan intérpretes que traduzcan lenguajes de alto nivel. Por otro lado, los ordenadores de cómputo, por su compatibilidad con librerías e implementación de plataformas como OpenCv (Open Source Computer Vision) para el procesamiento digital de imágenes, permiten aprovechar diferentes herramientas para crear soluciones potentes en las que se han conseguido buenos resultados en proyectos de visión artificial, como se aprecia en Jiménez (2012).

En el presente artículo se esboza el diseño de un sistema de control de calidad, el cual discrimina entre dos modelos que simulan la geometría de un tornillo y una arandela, bajo un estándar de fabricación basado en dimensiones. Los modelos fueron realizados con una máquina de prototipado rápido. Se fabricó una muestra de 20 piezas en total, de las cuales la mitad son tornillos y la otra mitad son arandelas; así mismo, la mitad de los tornillos y arandelas tienen dimensiones correctas y la otra mitad dimensiones incorrectas, para un total de 5 piezas por muestra. El modelo CAD de las geometrías utilizadas para simular las piezas mencionadas se muestra en la figura 1.

El sistema implementado se divide en tres etapas, las cuales estructuran las siguientes secciones del artículo de la siguiente forma:

Sección 2: arquitectura de *hardware* (estructura de la banda transportadora, actuadores y sensores).

Sección 3: control electrónico (circuito basado en un micro controlador 18f4550 de Microchip y comunicación USB).

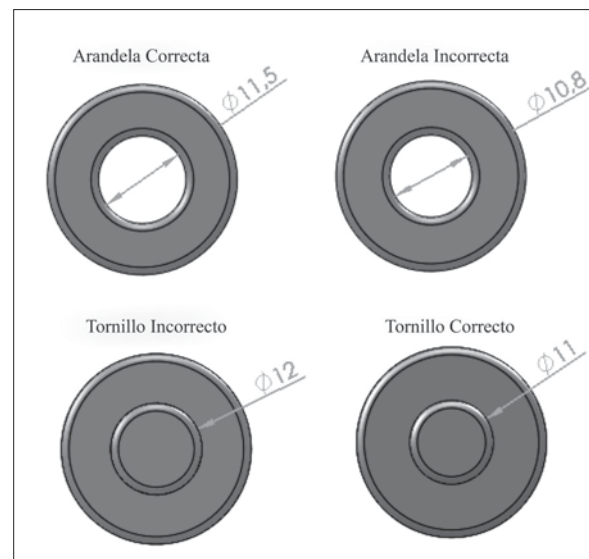


Figura 1. Piezas modelo dimensiones en milímetros

Fuente: elaboración propia.

Sección 4: software (aplicación con interface gráfica programada en Matlab).

Sección 5: se presenta el análisis de resultados y finalmente las conclusiones.

ARQUITECTURA DE HARDWARE

El dispositivo desarrollado busca automatizar el proceso de inspección de calidad en una línea de ensamblaje, como se muestra en la figura 2. La arquitectura implementada contempla tres aspectos básicos en su diseño, los cuales son: a) estructura de la banda, b) iluminación, c) sensores y actuadores. Cada uno de estos parámetros se escogió con elementos que cumplieran las condiciones de operación, diseño y, por último, que se ajusten al presupuesto de un prototipo a escala.

Estructura de la banda

La estructura del prototipo que conforma el sistema se construyó en acrílico, principalmente por ser un material liviano y resistente, y por su facilidad para ser mecanizado utilizando cortadoras láser. El sistema tiene dos ajustes de tensión para la banda, lo que permite tener una tolerancia de desgaste sin necesidad de desmontar el dispositivo para realizar cambios. La banda transportadora fue diseñada como un segmento de una banda matriz que pasa por cuatro ejes de recorrido, cada

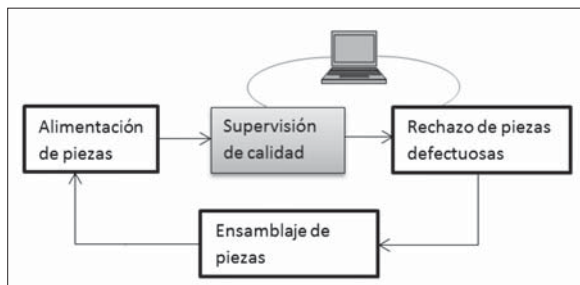


Figura 2. Cadena de proceso

Fuente: elaboración propia.

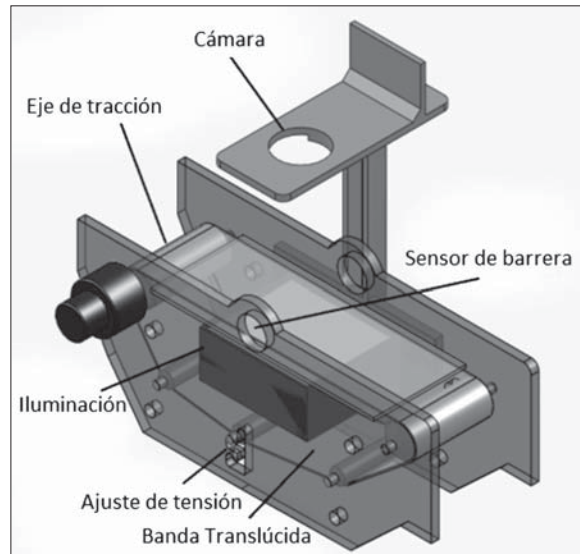


Figura 3. Diseño estructural de la banda transportadora

Fuente: elaboración propia.

uno mecanizado para alcanzar la máxima tracción; de igual manera, el recorrido de la banda proporciona un espacio necesario para la instalación de la iluminación. El diseño se muestra en la figura 3.

Iluminación

Como se mencionó anteriormente, la iluminación es una parte esencial en sistemas de visión artificial; su adecuada implementación permite que el UPDI realice su tarea exitosamente. Para esta aplicación se busca generar el máximo contraste en la geometría de las piezas; ya que el objetivo de este dispositivo es medir el diámetro interior de una arandela y el diámetro de la saliente de un tornillo, no es relevante detallar la textura ni los colores de las piezas; por esta razón se escogió una iluminación denominada *backlight* o contraluz. La fuente de luz que se utilizó para la iluminación del sistema es un panel de LED con un consumo aproximado de 0,3 amperios. En las figuras 4 y 5 se muestran resultados de utilizar esta iluminación. Se observa que en el par de imágenes que compo-

nen la muestra a), existen diferentes tonalidades de grises (sombras) que dificultan la extracción de la información de interés; en cambio en la mues-

tra; b) se homogeniza la tonalidad de grises y se identifica claramente las regiones relevantes para la medición.

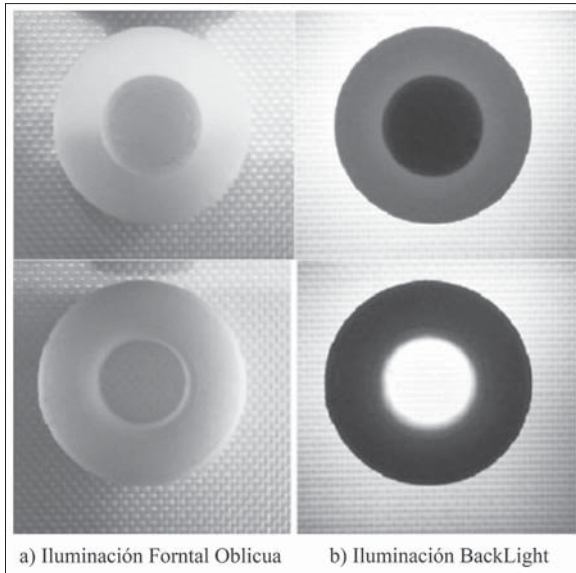


Figura 4. Comparación entre iluminación frontal e iluminación backlight

Fuente: elaboración propia.

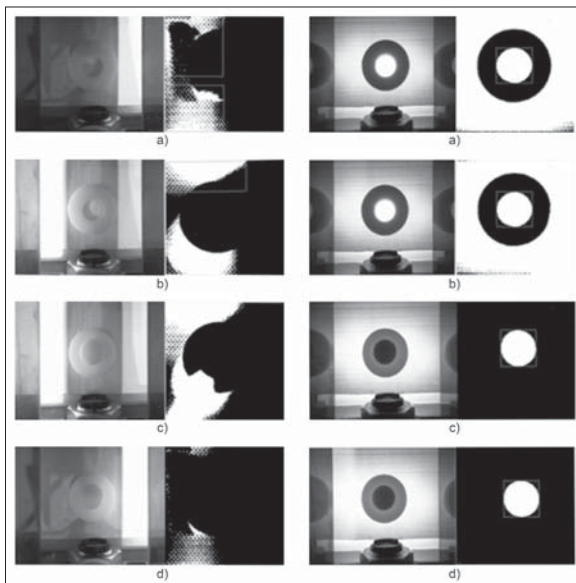


Figura 5. Perturbaciones luminosas con /sin el sistema de iluminación Backlight. a) Luz ambiente (Arandela), b) Luz directa (Arandela), c) Luz directa (Tornillo), d) Luz ambiente (Tornillo)

Fuente: elaboración propia.

En las imágenes con iluminación directa se observan detalles de las texturas, y adicionalmente se generan sombras en diferentes ángulos; estas sombras dificultan el procesamiento de la imagen, ya que los tonos sombreados se mezclan con las piezas. Por otro lado, si observamos las imágenes con iluminación *backlight*, los contornos de las piezas sobresalen en la imagen con alto contraste, resaltando la información de interés. Es importante aclarar que si se desea implementar iluminación a contraluz, la banda transportadora debe ser translúcida, ya que la fuente de luz se debe ubicar detrás de la banda.

Sensores y actuadores

El movimiento de la banda transportadora es generado por un moto-reductor de corriente continua de 6-12 v. El motor a 6 voltios tiene una velocidad de 60 rpm y a 12 voltios genera una velocidad de 70 rpm. En la ecuación (1) se calcula la velocidad tangencial de la banda conociendo el radio del tambor de tracción y la velocidad angular del motor en rpm.

$$V_t = \frac{v_{rpm} \cdot 2\pi \cdot r}{60} \quad (1)$$

De esta manera, la velocidad tangencial de la banda con una tensión de 12 v, es de 10 cm/s.

Para calcular el torque del motor se midió la corriente nominal que consume a una tensión de 12 voltios, esta fue de 110 mA. En la ecuación (2) es posible calcular el torque a partir de la potencia del motor.

$$\begin{aligned} P &= V \cdot I \\ P &= \tau \cdot \omega \\ \tau &= \frac{V \cdot I}{\omega} \end{aligned} \quad (2)$$

Donde:

τ : torque.

V: tensión del motor.

I: corriente nominal del motor.

ω : velocidad angular del motor.

El motor tiene un torque aproximado de 0,18 kgm²/s².

En la figura 6 se muestra el diagrama de fuerzas del eje de tracción en la banda transportadora.

Mediante la ecuación (3) es posible hallar la fuerza que ejerce el motor en la banda transportadora.

$$F = \frac{\tau}{r} \quad (3)$$

$$F = 17,14 \text{ [N]}$$

Para detectar el paso de una pieza por la región de interés se utilizó un sensor fotoeléctrico BR 100-DDT; este sensor tiene incorporadas protecciones de ruido y un sistema externo para calibrar la sensibilidad. Adicionalmente, tiene un tiempo de respuesta de hasta 1 ms, y el área de sensibilidad perpendicular al sensor tiene un alcance máximo de 2 cm. En la figura 7 se muestra una grafica del área de sensibilidad del sensor.

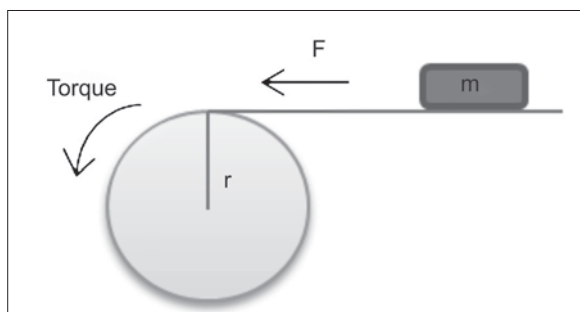


Figura 6. Diagrama de fuerzas eje de tracción de la banda transportadora

Fuente: elaboración propia.

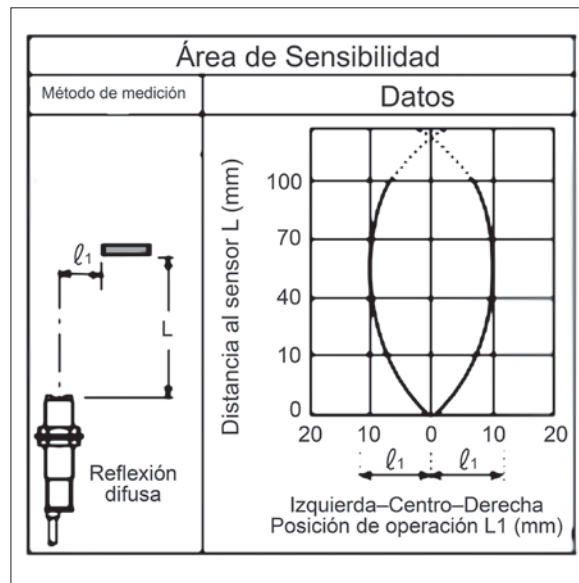


Figura 7. Datos técnicos del sensor

Fuente: elaboración propia.

CONTROL ELECTRÓNICO

El control eléctrico diseñado permite el correcto funcionamiento del *hardware* y la comunicación con el *software*, el cual es ejecutado desde un computador. El circuito está basado en un microcontrolador 18f4550 y la comunicación entre el control y el computador se realizó por medio del protocolo de comunicación USB. En la figura 8 se muestra el diagrama de conexión del sistema.

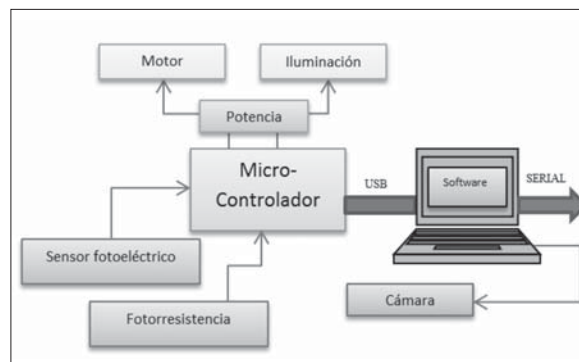


Figura 8. Diagrama general del control electrónico

Fuente: elaboración propia.

investigación

El *software* se ejecuta solo cuando el microcontrolador le comunica al computador que la pieza se encuentra en el área de procesamiento; de la misma manera, el computador le indica al microcontrolador que la pieza actual ya se procesó y este acciona la banda para una nueva iteración. En la figura 9 se muestra el diagrama de flujo del proceso anteriormente mencionado.

La iluminación se calibra automáticamente por medio de una fotorresistencia; esta varía la tensión utilizando un divisor de voltaje, dependiendo de la cantidad de luz incidente. Posteriormente se utiliza el módulo de conversión análogo a digital (A/D) del microcontrolador y se modula el ancho de pulso para obtener la variación de voltaje a la entrada del panel de LED. En la figura 10 se muestra un diagrama del circuito implementado

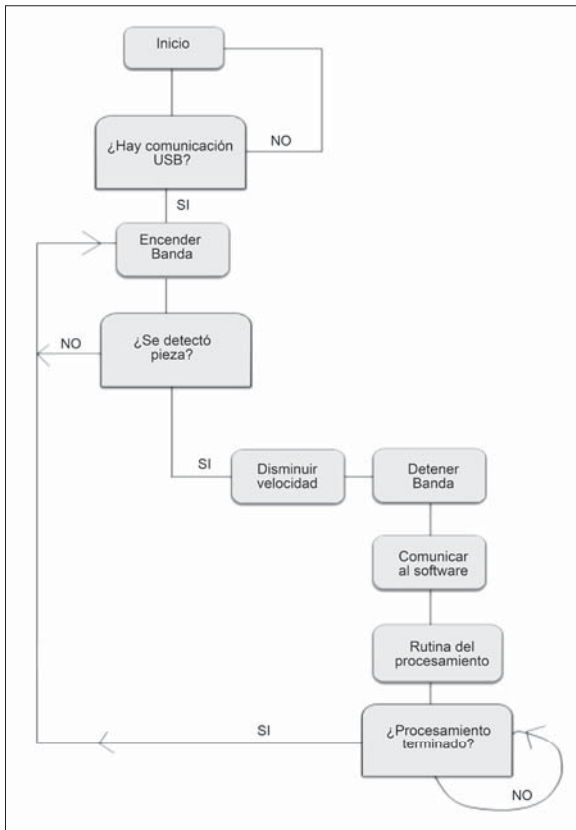


Figura 9. Diagrama de flujo del micro-controlador

Fuente: elaboración propia.

y en la ecuación (4) se muestra la variación del voltaje del panel de LED en función del voltaje de salida del divisor de tensión.

$$VPL = K1 \cdot \frac{Vin \cdot R1}{R1 + FR} + Sp \quad (4)$$

Donde:

VPL: voltaje de salida a el panel de LED.

FR: fotorresistencia.

Vin: voltaje de entrada divisor de tensión.

Sp: Set-Point del VPL.

K1: constante de proporcionalidad entre la intensidad lumínica del ambiente y la intensidad lumínica del panel.

SOFTWARE

El algoritmo fue desarrollado en Matlab® versión 2010. Esta herramienta contiene diferentes funciones que permiten hacer desarrollos con procesamiento de imágenes. El algoritmo reconoce qué tipo de geometría está en la imagen, posteriormente la binariza y con base al resultado se uti-

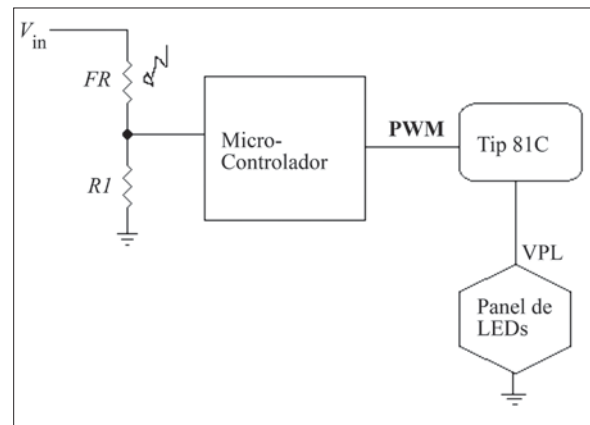


Figura 10. Circuito para calibrar la intensidad de luz

Fuente: elaboración propia.

liza una función de Matlab llamada *regionprops*, la cual reconoce las áreas conectadas por pixeles que contienen la misma información. En la figura 11 se ilustra la secuencia de dicho algoritmo, la cual se centra en tres etapas: pre-procesamiento, filtrado y clasificación.

Preprocesamiento de la imagen

La etapa de preprocesamiento permite reconocer si la pieza es un tornillo o una arandela. Al tener geometrías diferentes, la estrategia para procesar la imagen difiere; por esta razón, la primera acción que ejecuta el algoritmo es decidir a qué geometría pertenece la imagen procesada; para esto se realizó un análisis por histograma de la imagen. Se graficaron cinco muestras que contienen los datos de los histogramas de las dos piezas al azar; al observar los resultados en las gráficas, sobresale una diferencia en el número de saltos que tiene cada una de las gráficas.

Observando la figura 12 (a) y 12 (b) se evidencia que en el caso de las arandelas son pocos los pixeles que tienen valores de gris entre 100 y 130, razón por la cual se puede apreciar un valle en la gráfica; en cambio en los tornillos existen más pixeles y consecuentemente encontramos un pequeño pico (2). Con esta información el *software* diferencia a qué tipo de geometría pertenece la

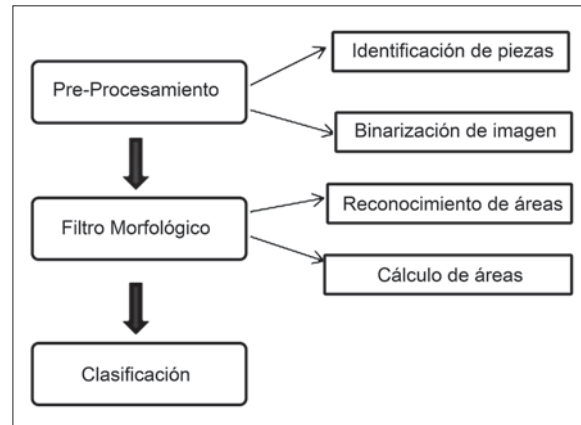


Figura 11. Secuencia del software

Fuente: elaboración propia.

imagen. Posteriormente la imagen se binariza utilizando la siguiente expresión.

$$f_i(m,n) > \text{Umbral de binarización}$$

$$f_i(m,n) = 0$$

$$f_i(m,n) < \text{Umbral de binarización}$$

$$f_i(m,n) = 255$$

El resultado de la imagen binarizada se aprecia en la figura 13. Se puede observar que los contornos de interés son resaltados y se encuentran diferenciados con información lógica.

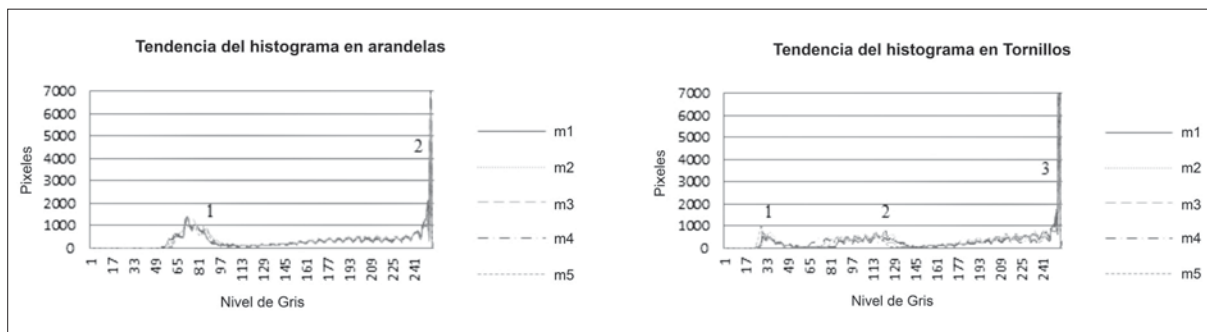


Figura 12. Tendencias del histograma

Fuente: elaboración propia.

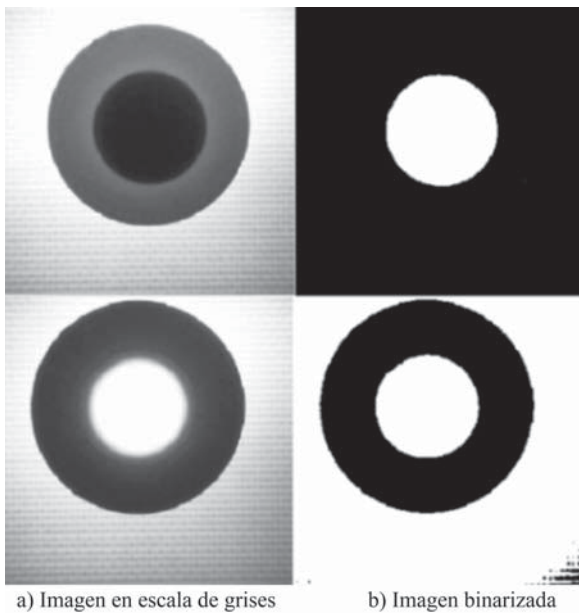


Figura 13. Resultados del algoritmo de binarización

Fuente: elaboración propia.

Filtro morfológico

Así mismo, la función *regionprops* permite obtener parámetros como el centroide, el perímetro y el área de una imagen previamente binarizada; en este caso se utilizó la identificación del área. Básicamente el algoritmo de la función *regionprops* busca regiones en la imagen que estén conectadas entre sí por la información que contengan sus píxeles; posteriormente se agrupan estas regiones y se les asigna una etiqueta, finalmente se cuantifica la cantidad de píxeles que pertenecen a una etiqueta, y con esta información se obtiene el área que abarca la región con respecto a la imagen. En la figura 14 se muestra la identificación del área de interés en las geometrías.

Después de hallar el área de la región de interés (enmarcada en el recuadro verde de la figura 9), se utiliza la ecuación (5), para hallar el diámetro en píxeles.

$$d_{pix} = 2\sqrt{\frac{A_{pix}}{\pi}} \quad (5)$$

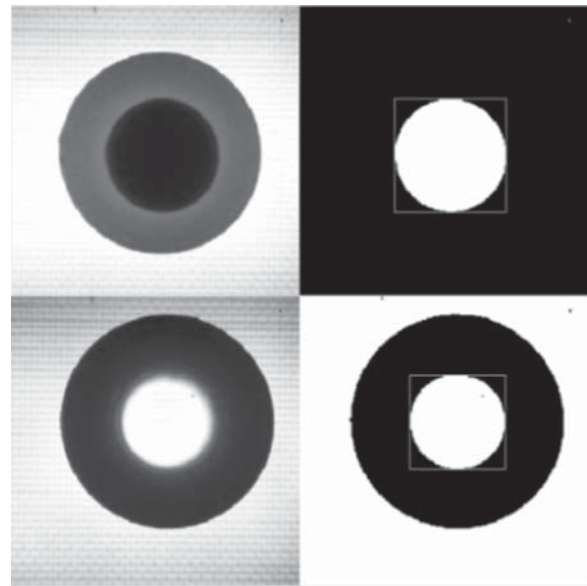


Figura 14. Área de interés resaltada por el software

Fuente: elaboración propia.

Clasificación

En función a la información obtenida del procesamiento de imagen se conformó una base de datos en la cual se encuentra la información de los diámetros calculados por el *software* en los cuatro grupos de piezas, etiquetadas como arandela Ok, arandela X, tornillo Ok y tornillo X. En la figura 15 se muestran los diámetros medidos de las 20 piezas fabricadas. Con base en estos datos se obtiene un criterio para decidir el diámetro en píxeles esperado para cada uno de los grupos de piezas. Según lo anterior, la arandela correcta tiene un diámetro aproximado de 98 píxeles, la arandela incorrecta tiene un diámetro aproximado de 93 píxeles. Así mismo, el tornillo correcto tiene un diámetro aproximado de 100 píxeles y el tornillo incorrecto de 109 píxeles. Esto corresponde una diferencia entre la arandela correcta y la arandela incorrecta de 0,7 mm y para los tornillos una diferencia de 1 mm (figura 15).

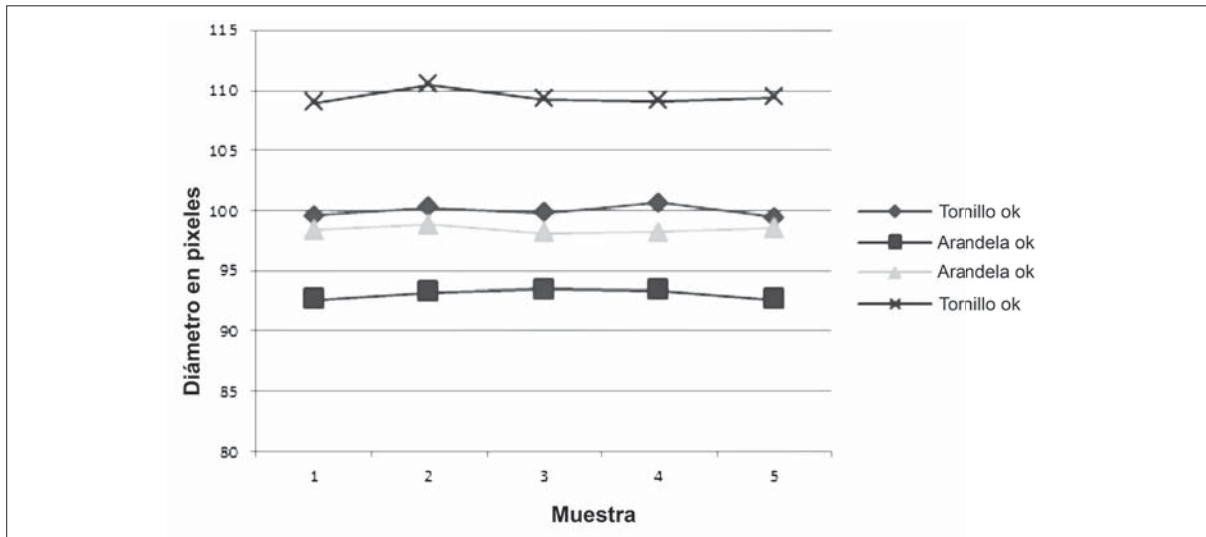


Figura 15. Datos de los diámetros obtenidos

Fuente: elaboración propia.

Al validar varias veces la medida del diámetro de las muestras por medio del algoritmo desarrollado, se pudo observar que existe una variación importante de la medida con respecto a la distancia con el eje de la cámara, en el momento de tomar la imagen. Tal como se presenta en la figura 16.

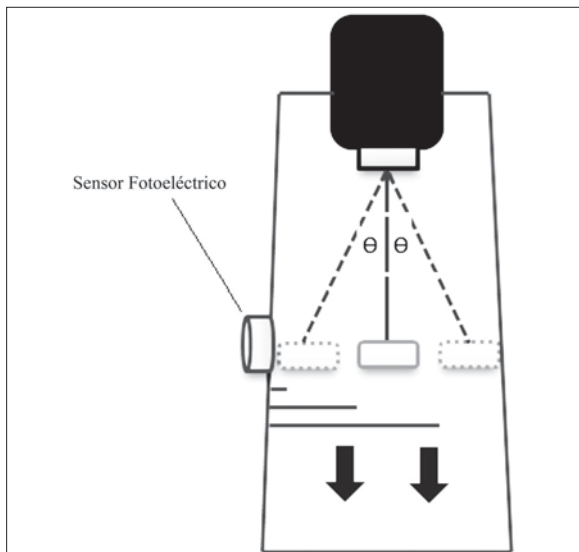


Figura 16. Variación de diámetro según la posición de la pieza

Fuente: elaboración propia.

Las piezas punteadas en la figura 16 se encuentran desplazadas del eje de la cámara; esta variación puede provocar que el *software* identifique piezas defectuosas como piezas correctas y, a su vez, piezas correctas como piezas defectuosas; esto se debe a que la perspectiva capturada en la imagen varía dependiendo del ángulo formado por la línea perpendicular que va desde el centro del lente hasta la banda, y la línea que resulta de unir el centro de la pieza y el centro del lente. Para cuantificar esta variación en la medición, se tomaron muestras de piezas posicionadas desde 1 cm hasta 3 cm del sensor fotoeléctrico, el cual se encuentra a un lado de la banda (figura 16); el sensor fotoeléctrico se menciona como referencia para medir la desviación entre la pieza y el eje de la cámara. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 1.

Observando los resultados se tomó la decisión de ubicar las piezas mecánicamente a 1,5 cm del sensor fotoeléctrico (fila subrayada en la tabla 1); esto se logró instalando unas guías al inicio de la banda que posicionan la pieza mientras avanza hacia la sección de inspección. De esta manera, las piezas se encuentran en el eje de la cámara y

los resultados obtenidos corresponden a las mediciones correctas. Es importante aclarar que la altura entre la cámara y la banda es fija, y por lo tanto el algoritmo de procesamiento de imagen esta parametrizado alrededor de esta distancia.

RESULTADOS

Esta sección se divide en tres subcapítulos: precisión, confiabilidad y velocidad. Cada uno de estos parámetros es analizado y cuantificado, con el fin de obtener una visión general de los resultados alcanzados en este trabajo.

Precisión

Para medir la precisión con la que el *software* identifica el diámetro de las piezas se procesó una muestra de un tornillo y una arandela, cada una fue medida cinco veces; en la tabla 2 se registran los diámetros obtenidos, teniendo como resultado una media aritmética para arandelas de 97,3 píxeles y para los tornillos de 100,93, la desviación estándar es de 0,44 para arandelas y 0,051 para tornillos, correspondiendo esto a 0,051 mm y 0,064 mm respectivamente.

Con estos datos podemos concluir que al procesar cinco veces una misma pieza el algoritmo tuvo

Tabla 1. Datos de las variaciones de diámetros

Distancia al sensor	Arandela X d(mm)	Arandela Ok d(mm)	Tornillo OK d(mm)	Tornillo Xd(mm)
1 cm	90,7	97,7	101,66	109,853
1,5 cm	91,8	97,53	100,92	109,4
2 cm	92,5	98,11	102,7	111,5
2,5 cm	92,25	96,08	N/A	N/A
3 cm	89,37	92	N/A	N/A

Fuente: elaboración propia.

una precisión aproximada a +/- 0,1 mm, es decir que entre cada medición, el promedio de las diferencias entre los diámetros no supera una décima de milímetro.

Confiabilidad

La confiabilidad es un parámetro que nos indica cuál es el porcentaje de error del *software* al identificar el tipo de pieza que se está procesando; de esta manera el *software* reconoce si la pieza es una arandela o un tornillo, o por el contrario no reconoce ninguna; en este caso el *software* indica que no reconoció la pieza. Adicionalmente, la confiabilidad del *software* se puede medir en el porcentaje de error que se genera al calcular el diámetro de las piezas; para esto se debe cuantificar el número de piezas correctas que al ser analizadas resultan incorrectas y viceversa. A continuación se muestran los resultados de procesar varias piezas al azar, obteniendo el porcentaje de confiabilidad para la identificación de las piezas.

Según los resultados de las cuatro pruebas realizadas, los cuales se ilustran en la tabla 3 y para los cuales se procesaron 226 piezas al azar, el algoritmo de reconocimiento de piezas tiene en promedio un 90,4 % de confiabilidad.

Tabla 2. Prueba de precisión para el algoritmo de medición de diámetros

Pieza	Diámetro	Concepto
Arandela ok	96,96	Pieza Aceptada
Arandela ok	97,106	Pieza Aceptada
Arandela ok	98,04	Pieza Aceptada
Arandela ok	97,08	Pieza Aceptada
Arandela ok	97,50	Pieza Aceptada
Tornillo ok	101,077	Pieza Aceptada
Tornillo ok	101,911	Pieza Aceptada
Tornillo ok	100,445	Pieza Aceptada

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Tabla de confiabilidad para la identificación de piezas

Prueba	Numero de piezas	Tornillos Aprobados	Tornillos Rechazados	Arandelas Aprobadas	Arandelas Rechazadas	Piezas no identificadas	% de piezas no identificadas
1	50	7	11	11	13	8	16
2	56	15	12	12	11	6	10,71
3	60	15	14	16	13	2	3,3
4	60	9	14	13	19	5	8,3

Fuente: elaboración propia.

El porcentaje de piezas no identificadas en algunas pruebas resultó considerablemente alto; esto se debe a que dicho proceso de identificación está basado en el análisis del histograma, y este puede resultar muy sensible a cambios leves de luminosidad y diferencias milimétricas en el posicionamiento de la pieza. Para futuras investigaciones se recomienda explorar otras alternativas como lo pueden ser algoritmos de inteligencia artificial, los cuales se caracterizan por ser adaptativos y optimizables.

Ahora bien, para cuantificar el porcentaje de confiabilidad que tiene el algoritmo de medición respecto a los diámetros, se realizó una prueba que consiste en procesar en primera instancia solo las piezas correctas, seguidamente se procesan las piezas incorrectas. En la tabla 4 se observan los resultados obtenidos.

Para tener otro parámetro con el objetivo de hallar el porcentaje de confiabilidad en la medición de los diámetros, se analizaron las piezas nuevamente, pero al azar, donde es posible concluir que en las 30 iteraciones realizadas no se produjo ningún falso rechazo ni ninguna falsa aprobación; por lo

Tabla 4. Tabla de confiabilidad para la medición de piezas prueba 1

Prueba	Número de piezas	Tipo de pieza	Falso-Rechazo	Falsa-Aprobación
1	5	Arandela Correcta	0	No aplica
2	5	Arandela incorrecta	No aplica	0
3	5	Tornillo Correcto	0	No aplica
4	5	Tornillo Incorrecto	No aplica	0

Fuente: elaboración propia.

tanto, para esta prueba el algoritmo de medición presenta una confiabilidad del 100 %.

Velocidad

Para medir la velocidad y así obtener la tasa de trabajo máxima por hora, se cronometró el tiempo en que tarda en analizar tres grupos con diferentes cantidades de piezas.

Según la tabla 5, se concluye que el tiempo mínimo en el que una pieza es analizada, desde el momento en que se ubica al inicio de la banda transportadora hasta que el *software* determina si dicha pieza es aprobada o no, es de 1,84 s por pieza. Lo anterior equivale a aproximadamente a una tasa de trabajo de 1950 piezas/h.

Sin embargo, la confiabilidad en la correcta identificación de piezas que ejecuta el *software* reduce esta velocidad aproximadamente en un 15%; esto se debe a limitaciones del *hardware* implementado, ya que la cámara utilizada tiene una tasa baja de capturas por segundo y esto limita la cantidad de piezas procesadas. Por esta razón se recomienda utilizar una tasa de trabajo de una pieza cada 2,5 s, lo cual equivale a 1400 piezas/h.

Tabla 5. Tasa de velocidad en el procesamiento de piezas

Grupo	Cantidad de piezas	Tiempo
1	10	20,26 s
2	20	35,03 s
3	30	52,74 s

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

La estructura del prototipo construido fue diseñada con el propósito de incluir estabilidad y firmeza al dispositivo, los resultados fueron satisfactorios y se logró construir un modelo a escala de un sistema de inspección de calidad que no supera los 500 g. Adicionalmente, el dispositivo tiene un diseño estético y funcional que permite entre otras cosas ajustar la tensión de la banda sin necesidad de desarmarla; además, asegura que la cámara siempre se encuentre en una misma posición lo cual evita la descalibración del sistema, es de fácil ensamblaje y no se requiere ninguna herramienta para armarla y en general permite realizar un proceso de visión artificial adecuado.

La iluminación *backlight* implementada produjo excelentes resultados, ya que se logró un contraste alto entre la pieza y el fondo de la imagen, facilitando así el correcto procesamiento de imagen y por lo tanto la extracción de la información relevante para el sistema. La iluminación fue realizada con un panel de LED que se diseñó y construyó para la aplicación; el resultado fue una iluminación estable ante perturbaciones externas, funcional y con un bajo consumo de energía que no supera los 250 mA.

El circuito implementado para el control electrónico está basado en un microcontrolador 18f4550,

cuya principal función es integrar los sensores y actuadores con el *software* de procesamiento; adicionalmente comunica por medio del protocolo USB el *software* con el dispositivo. Se presentaron problemas a causa del ruido que produce el motor de la banda, esto produjo errores en la lectura del sensor fotoeléctrico e interrupciones en la comunicación USB. Para solucionar este problema se adicionaron filtros y diodos rectificadores en el circuito que redujeron el ruido y la retroalimentación de corrientes considerablemente; sin embargo, aunque se presenta con muy poca frecuencia se observan desconexiones repentinas en la comunicación y las lecturas erróneas del sensor fotoeléctrico, producidas por ruidos que no se han podido filtrar. No obstante, en general el circuito es estable y los inconvenientes mencionados con anterioridad no representan un obstáculo de magnitud considerable para el buen funcionamiento del dispositivo.

En el *software* implementado, tanto en el algoritmo de reconocimiento de piezas como en el de medición de diámetros, se observan porcentajes de confiabilidad del 90%, permitiendo considerar al sistema –dada una tasa de velocidad de 1400 piezas/h, una sensibilidad de 0,1 mm y un porcentaje de confiabilidad en la medición de los diámetros de aproximadamente un 99%– como robusto.

En general el trabajo presentado pretende dar una solución mantenible, adaptable y de bajo costo a las diferentes industrias que requieren inspeccionar la calidad de los productos que fabrican. Aunque el dispositivo construido representa meramente un prototipo académico, este puede ser utilizado como base técnica para la construcción de sistemas de inspección que permiten automatizar un proceso calidad.

REFERENCIAS

- Aguilar-Torres, Michel A., Amadeo J. Argüelles-Cruz, Cornelio Yáñez-Márquez. (2008). "A Real Time Artificial Vision Implementation for Quality Inspection of Industrial Products", *Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference, 2008. CERMA '08*, pp. 277-282, Sept. 30 2008-Oct. 3
- Armesto, L., Tornero, J., Herraez, A., Asensio, J. (2011) Inspection System Based on Artificial Vision for Paint Defects Detection on Cars Bodies. *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference*, pp. 1-4, 9-13 May, DOI: 10.1109/ICRA.2011.5980570
- Borsu, V. y Payeur, P. (2012). Dual Supervisory Architecture for Drift Correction and Accurate Visual Servoing in Industrial Manufacturing. *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2012 IEEE International*, pp.177-182, 13-16 May.
- Fernandez, Y. E. y Sariana, A., S. R. (2009). Development of a Prototype for Classification of Potato Mini-tubers Based on Artificial Vision. *Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control, CCE, 2009 6th International Conference*, 10-13 Jan, pp. 1-6.
- Gholam Hosseini, H. Shuying Hu. (2008). A High Speed Vision System for Robots Using FPGA Technology. *Mechatronics and Machine Vision in Practice, 2008. M2VIP 2008. 15th International Conference*, pp. 81- 84, DOI: 10.1109/MMVIP.2008.4749511
- Hajimowlana, S. H., Jullien, G. A., Muscedere, R., Roberts, J. W. (1997). Efficient Pre-processing Algorithms for an FPGA Based In-camera Video-stream Processing System for Industry Inspection, *Electrical and Computer Engineering, 1997. Engineering Innovation: Voyage of Discovery. IEEE 1997 Canadian Conference*, 2 pp. 835- 838, DOI: 10.1109/CCECE.1997.608373
- Hocenski, Z. Fac. of Electr. Eng., Univ. J. J. Strossmayer, Osijek, Croatia. (2009). Ceramic tiles failure detection based on FPGA image processing. *Industrial Electronics, 2009. ISIE 2009. IEEE International Symposium*, pp. 2169-2174, 5-8 July, DOI: 10.1109/ISIE.2009.5219911
- Hocenski, Z. Fac. of Electr. Eng., JosipJuraj. Strossmayer Univ. of Osijek, Osijek, Croatia. (2010). LED panel illumination design of a control system for visual inspection of ceramic tiles, *Industrial Electronics (ISIE), 2010 IEEE International Symposium*, pp. 1663-1667, 4-7 July.
- Hoffman, D. (1999). *Cost Benefits Analysis of Test Automation*. Recuperado de <http://www.softwarequalitymethods.com/papers/star99%20model%20paper.pdf>.
- Jinhui Cai Dept. of Control Sci. y Eng., Zhejiang Univ., Hangzhou. (2006). The Application of AreaReconstruction Operator in Automatic Visual Inspection of Quality Control. *Intelligent Control and Automation. WCI-CA 2006. The Sixth World Congress*, pp. 10111-10115.
- Jiménez Moreno, R., S. A. Orjuela, P. Van Hese, F. A. Prieto, V. H. Grisales and W. Philips. (2012). *Video surveillance for monitoring driver's fatigue and distraction*. Proc. SPIE 8436, 84360T; Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1117/12.922085>
- Min Xu, Mingyang Zhao, Yuanyuan Zou. (2010). On-Line Visual Inspection System for

- Backside Weld of Tailored Blanks Laser Welding. *Advanced Computer Control (ICACC), 2010 2nd International Conference, 1*, pp. 525-529, DOI: 10.1109/ICACC.2010.5487160
- Mital A., Subramani B. y M. Govindaraju. (1998). *A comparison between manual and hybrid methods in parts inspection*. Integrated Manufacturing Systems 9, MCB UP Ltd., pp. 334-340.
- Pérez Fernández, J. A. (2010). *Gestión por procesos (4ª ed.)*. Editorial ESIC, septiembre.
- Peña Cañas, L. A. (2007). *Estudio para la reducción de los costos de producción mediante la automatización de los finales de línea de la planta dressing en la empresa Unilever andina Colombia Ltda.* M.ScTesis, Universidad del Valle, Facultad de Ciencias Económicas, septiembre.
- San Miguel, P. Alcalde. (2009). *Técnicas básicas para la gestión de calidad*. Recuperado de <http://www.inqualitas.net/articulos/477-tecnicas-basicas-para-la-gestion-de-la-calidad>.
- Usamentiaga, R. Dept. of Comput. Sci., Univ. of Oviedo, Gijón, Spain Perez, L., Molleda, J., Garcia, D. F., Huerta, S. (2011). Temperature measurement of streams of molten pig iron during pouring using infrared computer vision. *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2011 IEEE*, pp 1-6, 10-12 May DOI: 10.1109/IMTC.2011.5944030
- Xiang-Na Tang Coll. of Electr. y Inf. Eng., Hunan Univ., Changsha, China. (2011). “Visual inspection of workpiece quality”, *Image Analysis and Signal Processing (IASP), 2011 International Conference on*, pp 434-438, 21-23 Oct., dpi: 10.1109/IASP.2011.6109078.
- Yizhong Wang, Yanhua Cui, George Q. Hung, Ping Zhang, Shaohui Chen (2010). Study on Fruit Inspection Based on Its Surface Color in Produce Logistics. *2010 International Conference on Manufacturing Automation*. 13-15 Dec, pp. 107-111, DOI: 10.1109/ICMA.2010.47
- Yuan Li, Qing Lin Wang, You Fu Li, De Xu, Min Tan. (2008). On-line Visual Measurement and Inspection of Weld Bead Using Structured Light. *Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings. IMTC 2008. IEEE*, pp 2038-, 2008, DOI: 10.1109/IMTC.2008.4547383

Relaciones de aprendizaje significativo entre dos paradigmas de programación a partir de dos lenguajes de programación

Meaningful learning strategy between two programming paradigms using two programming languages

OMAR IVÁN TREJOS BURITICÁ

Ingeniero de Sistemas. Doctor en Ciencias de la Educación. Docente de planta, Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia.

Contacto: omartrejos@utp.edu.co

Fecha de recepción: 19 de marzo de 2013

Clasificación del artículo: investigación

Fecha de aceptación: 23 de noviembre de 2013

Financiamiento: Universidad Tecnológica de Pereira

Palabras clave: aprendizaje significativo, lenguajes de programación, paradigmas de programación.

Key words: Meaningful learning, programming languages, programming paradigms.

RESUMEN

Una de las dificultades que, con frecuencia, se presenta en los currículos de Ingeniería de Sistemas es el hecho de que se establecen pocas relaciones entre lo que los estudiantes han aprendido en una asignatura de programación y lo que van a aprender en otra. Este artículo plantea una propuesta para que se puedan establecer, desde la primera sesión, relaciones entre el paradigma de programación funcional (utilizando DrScheme como instancia tecnológica) y el paradigma de programación estructurada (utilizando DevC++ en su arista estructurada) como lenguaje de programación. Se plantean las experiencias recogidas al respecto de la aplicación de esta estrategia y, sobre los resultados se presentan algunas re-

flexiones que pueden enriquecer el desarrollo de la línea de programación en los programas de Ingeniería a partir de las relaciones que se pueden establecer tanto entre paradigmas de programación como entre los lenguajes de programación con miras a que el camino de aprendizaje de estos sea mucho más simple.

ABSTRACT

One of the difficulties you can find often in the Computer Engineering curricula is the poor relations between the knowledge coming from a specific subject in a semester and the knowledge is coming from the next semester in a specific area. This article presents a proposal in the establishment of the relations between the functional

paradigm (using DrScheme as a programming language) and the structured paradigm (using DevC++ in its structured profile). We present some experiences and, due the results, we com-

ment the possible way to enrich the programming line in a Computer Engineer program from the relations between programming paradigms and programming languages.

* * *

INTRODUCCIÓN

El proceso de formación de ingenieros de sistemas y su currículo asociado incluye dentro de sus ejes temáticos una línea que pareciera ser infaltable dentro de su concepción epistemológica y que corresponde a la Línea de Programación de Computadores. Esta línea tendrá, por razones temáticas naturales, dos aristas que permanentemente se entrecruzan para dar origen a los respectivos contenidos: los paradigmas de programación y los lenguajes de programación.

Los paradigmas corresponden a los modelos matemáticos que subyacen a una determinada forma de resolver un problema y que, en la actualidad, involucra en gran medida la participación de tecnología informática, computadores y herramientas de desarrollo sin que estos elementos sean absolutamente imprescindibles. Los lenguajes de programación corresponden a conjuntos de instrucciones que permiten construir programas a la luz de determinados paradigmas de programación e, incluso, como combinación de algunos de ellos. Estos conjuntos de instrucciones llamados Lenguajes de Programación son aceptados por la comunidad tecnológica internacional y cuentan con recursos como compiladores, ejecutores, editores y ambientes integrados de desarrollo que, en algunos casos, están disponibles libremente y se puede acceder a ellos a través de la web y, en otros casos, corresponden a la línea del *software* privativo.

Este artículo es producto del proyecto de investigación “Análisis pedagógico, instrumental y conceptual de algunos paradigmas de programación como contenido de la asignatura Programación I del Programa Ingeniería de Sistemas y Com-

putación de la UTP”, registrado bajo el código 6-12-14 de la Vicerrectoría de Investigaciones, Innovación y Extensión de la Universidad Tecnológica de Pereira y aprobado por el Consejo de Facultad de Ingeniería en octubre de 2012.

Como se ha planteado, una de las dificultades que manifiestan los mismos estudiantes respecto de los contenidos de las asignaturas es la desconexión que experimentan bien cuando se cambia de paradigma o bien cuando se cambia de lenguaje de programación; sabiendo que no son tan inconexos, los estudiantes se preguntan las razones por las cuales no se acude a lo que ya saben para desarrollar nuevos temas en el mundo de la programación de computadores que, por ser tan cambiante, sería de gran utilidad en el rendimiento del avance temático (Mackay, 2005).

Este artículo, por tanto, se justifica dada la gran importancia que tiene la línea de programación en el desarrollo de la base conceptual de la Ingeniería de Sistemas como programa de formación profesional de pregrado, tanto como las posibles relaciones que se pueden establecer entre los paradigmas y los lenguajes de programación a favor del proceso de aprendizaje que los involucra. Durante muchos años de experiencia, el autor ha interactuado con una gran cantidad de cursos que se han movido básicamente entre el paradigma funcional declarativo, el paradigma estructurado y el paradigma orientado a objetos, y en todos ellos ha encontrado la leve relación que los mismos docentes establecen entre unos y otros, reiniciando cada vez los cursos de programación desde el principio cuando se podrían “conectar” de forma que se pudiera avanzar más en las 16 semanas que constituyen un semestre.

No debe descartarse tampoco que la visión que se presenta en este artículo es la visión del autor y que, si bien estas reflexiones se fundamentan no solo en la experiencia obtenida durante más de veinte años de ejercicio docente en el mundo de la ingeniería, sino en la interacción permanente tanto con estudiantes como con docentes del área de programación, corresponde solo a una propuesta tendiente a mejorar los procesos de aprendizaje asociados de forma que se hagan más efectivos los esfuerzos que, para ello, realizan los docentes.

Por esta razón es posible que algunas de estas reflexiones puedan ser compartidas con otros colegas, pero también que puedan ser controvertidas y, por ello, es interés del autor invitar a que, por algunos de los medios de divulgación científica, se manifiesten las opiniones y las reflexiones que enriquezcan una discusión que va en pro del mejoramiento de los procesos de formación en los programas de ingeniería. El objetivo de este artículo consiste en plantear una propuesta para establecer relaciones posibles entre el aprendizaje de la programación funcional (bien desde su paradigma o bien desde uno de sus lenguajes de aplicación) y la programación estructurada (Mackay, 2005) y someterlo a la mirada crítica de la comunidad que investiga procesos de aprendizaje en ingeniería.

Para el desarrollo de este artículo se acudió tanto a las bases tecnológicas, como corresponde a los paradigmas funcional y estructurado y a sus expresiones tecnológicas, lenguaje DrScheme y lenguaje c respectivamente, como a los fundamentos del aprendizaje significativo formulado por David Paul Ausubel y del aprendizaje por descubrimiento formulado por Jerome Seymour Bruner (1969). De la misma manera se monitorearon experiencias en el aula con cursos en paralelo, unos siguiendo la metodología tradicional de no establecer relaciones entre un paradigma y otro, y otros siguiendo la metodología que se propone en este artículo. Se hicieron las respectivas comparaciones y se plantearon algunas inferencias al

respecto de dicha experiencia. Estas experiencias se hicieron con cursos paralelos de programación del programa Ingeniería de Sistemas y Computación de la Universidad Tecnológica de Pereira desde el primer semestre de 2011 hasta el primer semestre de 2013.

Sobre todo lo planteado anteriormente, el presente artículo comienza con una presentación de las teorías que lo fundamentan en lo conceptual (teoría del aprendizaje significativo y teoría del aprendizaje por descubrimiento) y continúa con lo puramente técnico que corresponde a los paradigmas de programación (funcional y estructurada) enunciadas desde la óptica de fundamentación matemática y asociada con un lenguaje de programación: DrScheme y C, respectivamente. Seguidamente se presenta la metodología que se utilizó dentro del proyecto de investigación tanto en su descripción como en su aplicación, se presentan los resultados, se abre el espacio para la discusión y finalmente se plantean unas conclusiones terminando el artículo con las respectivas referencias bibliográficas.

TEORÍA

Se presentan a continuación, y de manera sucinta, las teorías que se han tomado como base para el desarrollo del proyecto de investigación y que corresponden al ámbito de lo pedagógico, así como los paradigmas que se intentan relacionar en el contexto del presente artículo.

Aprendizaje significativo

Como “aprendizaje significativo” se conoce la teoría formulada por David Paul Ausubel quien planteó la gran importancia que tiene el significado de lo que se aprende dentro de un proceso de aprendizaje. Se llama aprendizaje significativo porque su fundamento es el concepto de significado, es decir, para qué sirve determinado conoci-

miento. La búsqueda de significado es una de las habilidades cognitivas de alto nivel innatas para el cerebro; es decir, cualquier evento, símbolo o situación que no sea claro para el cerebro, inmediatamente genera una reacción de este en la búsqueda de lo que significa, bien por medio de los patrones que tenga almacenados, bien mediante la información útil que haya recibido a través de los sentidos, o bien mediante la información simple (de uso poco frecuente) que haya guardado en la memoria a corto plazo.

El significado se convierte en el norte que permite que la información que llega al cerebro a través de los sentidos adopte una condición de patrón, información útil o información latente. Un patrón es un modelo informacional (o de conocimiento) que se usa con frecuencia y que llega a orientar ciertas decisiones del comportamiento humano basado en su significado. La información útil constituye ese conjunto de conocimientos que se usan con alta frecuencia y que, normalmente, tiende a ser un patrón sin serlo. La información latente es la información que ha llegado por medio de los sentidos y que el cerebro aún no ha clasificado como información útil, ya porque no le haya encontrado significado o porque no es de uso frecuente.

Ausubel formula en su teoría que el aprendizaje se basa en tres fundamentos: el conocimiento previo, el nuevo conocimiento y la actitud del estudiante. El conocimiento previo es el conjunto de saberes que el estudiante tiene cuando se inicia un nuevo proceso formal de aprendizaje, como cuando se inicia un curso. La teoría del aprendizaje significativo establece que siempre que el ser humano se enfrenta a un proceso de aprendizaje, existe un conjunto de conocimientos que pueden considerarse como conocimiento previo, o sea, lo que el ser humano ya sabe antes de empezar a aprender. De acuerdo con esto, Ausubel establece que “si me preguntaran qué es lo más importante en el aprendizaje yo diría que es lo que el alumno ya sabe” (Ausubel, 1986) y con esto le está dando

alta prioridad al conocimiento adquirido previo al inicio de un proceso de aprendizaje.

El nuevo conocimiento lo constituye el conjunto de saberes al que el alumno aún no había tenido oportunidad de acceder, que aún no se había formalizado desde alguna de las ciencias o que aún no se había difundido; lo que para el alumno pueda considerarse como nuevo e innovador, es decir, todo aquello que a un determinado alumno no haya llegado por ninguno de los medios o por ninguno de los sentidos. Es de aclarar que lo nuevo solo es nuevo para determinada persona, así no sea necesariamente nuevo.

La actitud del estudiante se define desde dos fronteras: la motivación y la capacidad que tenga el estudiante para relacionar conocimiento previo y nuevo conocimiento. En cuanto a la motivación, esta puede definirse como el ánimo y la voluntad que el estudiante pone para acceder a nuevos saberes y nuevos conocimientos y para incorporarse, de manera voluntaria, en un determinado proceso de aprendizaje. La motivación es la clave para que el cerebro busque todos los caminos posibles para establecer relaciones entre el conocimiento previo y el nuevo conocimiento. La capacidad para desarrollar estas relaciones se da cuando la motivación es lo suficientemente sólida como para que el mismo cerebro busque todos los caminos posibles que las posibiliten. Así, el modelo que estableció Ausubel para fundamentar su teoría del aprendizaje significativo determina que “el ser humano aprende mucho más fácil todo aquello que tiene significado para él” y parte del significado como esencia de dicha teoría basado en el conocimiento previo, el nuevo conocimiento y la actitud del estudiante.

Aprendizaje por descubrimiento

Otra teoría aceptada por el mundo, y que ha posibilitado caminos más expeditos para el aprendizaje, se conoce como la teoría del “aprendizaje por

descubrimiento”, formulada por Jerome Seymour Bruner quien, a diferencia de Ausubel, propone que “el ser humano aprende mucho más fácil todo aquello que descubre” (Bruner, 1963). Con lo anterior propone un panorama que prioriza la fascinación y lo insólito como fundamento para que el proceso de aprendizaje ocupe el espacio de la memoria a largo plazo.

Según Bruner, actualmente profesor emérito de la Universidad de Nueva York, como descubrimiento se puede calificar a la “fascinación” que se traduce simplemente en la motivación que puede tener uno mismo para intentar explicarse lo insólito. En el proceso de aprendizaje, como se plantea en la teoría del aprendizaje por descubrimiento, se involucran tres procesos casi simultáneos: por una parte se tiene la adquisición de nueva información que se ha llamado como “adquisición”. En segundo nivel, y casi al tiempo del primero, se presenta el proceso de manipular el conocimiento para hacerlo adecuado a nuevas tareas que el autor calificó como “transformación” y finalmente está el proceso que permite comprobar si la manera como hemos manipulado la información es adecuada a la tarea; etapa que el autor de la teoría calificó como “evaluación” (Bruner, 1991).

En relación con la teoría de aprendizaje significativo se puede decir que el concepto de “descubrimiento” corresponde a la chispa que abre el camino para encontrar el significado, ubicando el conocimiento en el nivel de un patrón que permite que la memoria a largo plazo asimile, apropie y, eventualmente, aplique cierto conjunto de conocimientos. Con esto se puede establecer una relación íntima entre el concepto de “significado” de la teoría de aprendizaje significativo y el concepto de “descubrimiento” de la teoría del aprendizaje por descubrimiento.

Finalmente, vale la pena incluir en esta fundamentación teórica sobre el aprendizaje que “todo conocimiento puede ser objeto de aprendizaje, es decir, todo se puede aprender” (Piaget, 1986), y

que, por tanto, siempre existirán caminos expeditos para encontrar significado a lo nuevo y propiciar su descubrimiento por parte de las personas que se involucran en un proceso de aprendizaje (Piaget, 2001).

Programación funcional

La programación funcional se deriva del paradigma funcional, un modelo matemático basado en el cálculo *Lambda* que posibilita la construcción de soluciones simples basadas en funciones como núcleo básico de la programación. La función constituye el elemento principal a partir del cual se construye una solución que luego se revierte en un programa y que cuenta con características como paso de argumentos, nominación única, recursión, omisión de declaraciones y retornos automáticos (Schildt, 2000).

El paradigma de programación funcional aborda la construcción de soluciones a partir de tres conceptos básicos: simplificar el objetivo por alcanzar, facilitar las pruebas de escritorio y reusar lo construido. Dado que el objetivo resulta ser lo más importante en la construcción de un programa, el paradigma de programación funcional posibilita no solo la clarificación del mismo, sino también la simplificación en los frecuentes casos en los cuales el objetivo resulta tener un cierto nivel de complejidad (Trejos, 2002).

Reusar lo construido es una tendencia que se ha fortalecido con la irrupción del paradigma funcional, dado que cuando se vuelve a utilizar lo que ya se tiene hecho se logra acudir a fragmentos de código (funciones) que no solo han funcionado apropiadamente, sino que también han sido probadas en tiempo de ejecución (Trejos, 2005). Por otra parte, la reutilización del código (a nivel de funciones) permite hacer un óptimo uso del tiempo y, por tanto, hace que la labor de programar se vuelva mucho más eficiente en el uso del único recurso que no tiene repuesto, como es el tiempo.

A partir de la aparición del concepto de librerías y bibliotecas (tanto estándares como de usuarios), la reutilización del código se convirtió en una estrategia usada con frecuencia, de forma que se pueda acudir a funciones eficientes y que, así mismo, pueda ser la programación basada en este paradigma.

Los tiempos modernos exigen que el desarrollo de *software* y la construcción de programas incluya un ingrediente de alta importancia como el buen uso del tiempo; para ello, la programación funcional con su filosofía de construcción de soluciones a partir de funciones proporciona el camino preciso y perfecto para que así se cumpla, sin desconocer que otros paradigmas brindan herramientas que también posibilitan caminos eficientes de solución. En la actualidad, la tendencia a construir soluciones basadas en funciones eficientes ha posibilitado no solo que se fortalezca la programación funcional, sino también la programación estructurada y la programación orientada a objetos, que son las tendencias modernas que marcan el avance tecnológico en la actualidad (Van Santen, 2010).

Programación estructurada

El primer paradigma formal de programación de computadores se conoció como la programación estructurada, dado que es un modelo de programación que se basa en la máquina de estados de Von Neumann y se fundamenta en tres estructuras básicas. Antes de la programación estructurada se acudía a una técnica conocida como “programación libre”, en la cual cada programador hacía sus programas como a bien tuviera.

Sin embargo, el estudio exhaustivo de los programas realizados a partir de la llamada programación libre permitió ir encontrando que todos los programas se encontraban y hacían uso de tres estructuras específicas. A partir de allí, tomando los conceptos matemáticos de la máquina

de estados de von Neumann y de la máquina de Turing, se configuró un paradigma que, luego de más de sesenta años de haber sido formulado, sigue teniendo alguna vigencia; dado el tiempo de refinamiento, no solo perdura en algunas expresiones tecnológicas, sino que ha abierto la puerta para que otros paradigmas irrumpieran en el mundo de la programación de computadores solucionando apropiadamente lo que el paradigma estructurado no había podido solucionar, o para lo cual sus soluciones eran altamente ineficientes o sus conceptos profundamente escasos (Van Roy, 2003).

Como su nombre lo indica, la programación estructurada se basa en unas estructuras básicas que en cantidad son tres y en definición corresponden a la secuencia de instrucciones, los condicionales y los ciclos. Este tipo de programación también se conoce como programación imperativa, aunque algo de este concepto es compartido con otros paradigmas. La estructura de secuencia establece que una instrucción se ejecuta completamente luego de la anterior y antes de la siguiente, y con ello determina la precedencia de ejecución de las instrucciones, lo cual le hace merecedor, a este paradigma estructurado, de lo puramente imperativo. La determinación de esta estructura permitió que muchas tareas se pudieran hacer de manera específica utilizando completamente la capacidad del computador y sus sistemas de procesamiento electrónico, de manera que las tareas capitalizaran las altas velocidades que para tal fin se involucran. Con el avance de la tecnología y la aparición de técnicas de programación como los *threads* (hilos) se ha podido entender que esta estructura en un ambiente puramente imperativo puede llegar a tener utilidad; sin embargo, en otros ambientes (tal vez distribuidos o multiprocesados) posibilitan e impiden la realización de varias tareas al tiempo, como sucede modernamente con los procesos multihilos que son los que permiten, por ejemplo, la ejecución simultánea de varias ventanas en el sistema operativo Windows.

Por su lado, la estructura de decisión (o condicional) permite que se pueda escoger uno entre dos caminos lógicos dependiendo de una condición. Dicha condición se escribe en términos de operadores relacionales y booleanos, y se evalúa a partir de los valores “verdadero” o “falso” que se pueden originar como respuesta de su revisión. Aunque no es necesario que todo condicional tenga de manera explícita los dos caminos, la estructura de decisión posibilita que siempre se puedan tener dos posibles opciones frente a una misma situación que pueda ser escrita en términos de los operadores mencionados. La estructura de decisión es, posiblemente, la única que se ha mantenido vigente desde que fue planteada como estructura básica, y se ha extrapolado hacia otros paradigmas como el caso de la programación funcional y la programación orientada a objetos con las mismas características que la han hecho útil en la programación estructurada.

Finalmente, la estructura cíclica o iterativa permite que se pueda ejecutar un conjunto de varias instrucciones tantas veces como una condición lo permita, de manera que su evaluación consienta, tal como sucede en la estructura de condición, que se realicen las tareas iterativas que se hayan propuesto. La estructura cíclica es la que más ha evolucionado en cuanto a su concepción y características desde que fue formulada como una de las estructuras básicas. Actualmente se puede hablar de dos formas de procesos cíclicos: los ciclos formales de la programación estructurada (hacer hasta, repetir mientras, hacer para, etc.) y los ciclos llamados recursivos que, si bien no corresponden a las características de los ciclos estructurados, de todas formas mantienen el espíritu de ser formas de lograr que un conjunto de instrucciones se repitan de manera finita dependiendo de una condición. Otra forma de construir ciclos son los ciclos no estructurados, heredados de la programación libre, pero estos ciclos se salen del contexto del presente artículo.

METODOLOGÍA

Descripción

En lo cualitativo, para el desarrollo del proyecto de investigación, se acudió a la teoría de aprendizaje significativo y la teoría del aprendizaje por descubrimiento. Sobre la primera se tomó la necesidad de definir los conocimientos previos y el nuevo conocimiento de manera taxativa, de forma que se pudieran establecer relaciones entre ambos, esencia misma de este artículo y se pudiera posibilitar un tránsito simple entre el aprendizaje de uno y otro paradigma, como se ha especificado en párrafos anteriores. Adicionalmente se hizo hincapié en la definición del significado de la programación funcional y la programación estructurada para poder establecer posibles relaciones que las vincularan.

En cuanto a la teoría de aprendizaje por descubrimiento se acudió a la definición misma de esta teoría, según la cual se invita al mismo estudiante a que encuentre algunas de esas relaciones y, a partir de un paradigma, encuentre las características que distinguen y diferencian el otro paradigma bajo el marco de la fascinación como alta motivación para encontrar explicación a lo que pareciera insólito, o mejor aún, lo que pareciera nuevo.

Se ha capitalizado la relación entre el concepto de descubrimiento de la teoría de aprendizaje por descubrimiento y su íntimo nexo con el conocimiento nuevo de la teoría del aprendizaje significativo, de manera que el mismo estudiante busque y encuentre conexiones lógicas entre uno y otro paradigma; de esta forma, que él mismo encuentre elementos que faciliten y hagan mucho más expedito su propio aprendizaje.

Durante todo el proceso de levantamiento de la información se llevaron cursos paralelos de manera que en uno de ellos se explicaran las características de los paradigmas de programación tal

como tradicionalmente se conciben y, en el otro, se plantearan todos los conceptos de la programación estructurada a partir de los fundamentos que podían relacionarse de la programación funcional. Las pruebas de evaluación que se hicieron fueron las mismas en ambos cursos paralelos y se confrontaron resultados de forma que se pudieran hacer unos francos intentos de establecer relaciones de rendimiento entre un curso y otro. En lo cuantitativo se levantó una información y se cuantificó de acuerdo con los resultados obtenidos y, a partir de ellos, se hicieron algunas inferencias que son las que inspiran este artículo.

Se trató de mantener gran rigor metodológico para la aplicación tanto de la metodología como de las pruebas que las evaluaban, pero no se descarta que se puedan realizar procesos que refinan dichos procesos investigativos y que permitan brindar aún mayor confiabilidad a las inferencias que de este tipo de proyectos se deriven.

Aplicación

Primeramente debe tenerse en cuenta que, en el currículo del programa Ingeniería de Sistemas y Computación de la Universidad Tecnológica de Pereira, durante los semestres de desarrollo del proyecto de investigación (I semestre de 2011 hasta el I semestre de 2013), la estructura de la línea de programación de computadores inicia con la asignatura Programación I de primer semestre, cuyo contenido corresponde al paradigma funcional y el lenguaje que lo hace efectivo se llama DrScheme. En el 2° semestre se sirve la asignatura Programación II cuyo contenido se basa en el paradigma estructurado y su lenguaje de programación es el lenguaje C.

El proceso realizado a partir de la aplicación de la metodología que se planteó en el numeral anterior involucró los siguientes elementos: una definición del significado de cada uno de los conceptos que se querían abordar, tanto para el

paradigma funcional como para el paradigma estructurado, en el caso de aquellos conceptos que son plenamente compartidos en lo conceptual. Ahora bien, para aquellos conceptos que no se comparten conceptualmente en ambos paradigmas se estableció el significado acorde con su sentido dentro del paradigma al cual correspondiera, y se propusieron relaciones de analogía que permitiera derivar uno del otro.

También se realizó una definición clara y concreta de los conceptos que constituían el conocimiento previo en cada uno de los temas que se abordó con dicha metodología; el conocimiento previo se basó en el paradigma funcional y en su aplicación en lenguaje DrScheme, así como una definición clara y concreta de los conceptos que constituían el nuevo conocimiento en cada uno de los temas que se abordó con la metodología expuesta. Además, el nuevo conocimiento se basó en el paradigma estructurado y en su aplicación en Lenguaje C.

De la misma manera se precisó una definición de los criterios que permiten que se relacione el conocimiento previo definido (paradigma funcional) con los conceptos que constituyen el nuevo conocimiento (paradigma estructurado), y una definición clara de los conceptos nuevos que podrían constituirse en lo insólito o en lo innovador, acorde con la teoría del aprendizaje por descubrimiento.

Se hizo un desarrollo permanente de actividades de motivación frente al nuevo conocimiento, a la clarificación de los conocimientos previos mediante estrategias lúdicas, tecnológicas y conceptuales utilizando juegos como crucigramas, sopas de letras, sudokus y kakuros al inicio de cada sesión; se fijaron metas en cada sesión en las cuales se iban a abordar nuevos conceptos como parte del proceso de adquisición; se establecieron criterios para la aplicación del conocimiento nuevo en diferentes ámbitos de programación como parte del proceso de transformación y se

Tabla 1. Conceptos relacionados de programación

No	Tema	Conocimiento Previo (Paradigma Funcional)	Nuevo Conocimiento (Paradigma Estructurado)
1	Tipos de datos	Se refuerza el concepto de argumento y almacenamiento	Se explican los tipos de datos formales y el concepto de variable a partir del concepto de argumento
2	Concepto de función	Se retoman las características de una función en DrScheme	Se presenta la estructura de una función en Lenguaje C y se asocia con lo presentado en DrScheme
3	Estructura de un programa	Se refuerza el concepto de programa a partir de funciones	Se presenta la función principal y las funciones auxiliares como una derivación del concepto de funciones en programación funcional
4	Construcción de librerías	Se plantea el concepto de librerías a partir de los módulos gráficos, GUI y matemáticos en DrScheme	Se acude a las librerías estándar .h y se formula la manera de construirlas e incluirlas en los programas a partir del concepto funcional
5	Recursividad	Se retoman las tres partes de una función recursiva dentro del paradigma funcional	Se aplican las mismas partes a las funciones estructuradas
6	Funciones de biblioteca	Se acude a las librerías gráficas, GUI y matemáticas	Se acude a las librerías estándar (stdio.h, conio.h, dos.h, process.h, iostream.h y graphics.h)
7	Sintaxis del lenguaje	Se plantean las características principales del lenguaje DrScheme	Se amplían las características del lenguaje DrScheme para llegar a la sintaxis del Lenguaje C
8	Pensamiento funcional	Se formulan los tres principios básicos del pensamiento funcional	Se formulan las estructuras y se aplican a partir de los tres principios básicos del pensamiento funcional
9	Pensamiento estructurado	Se plantean soluciones a nivel de programación funcional a partir de una aproximación a las estructuras básicas	Se retoman las soluciones con programación funcional y se reescriben con programación estructurada

Fuente: elaboración propia.

asociaron los conceptos con aplicaciones y situaciones de la vida cotidiana de los estudiantes; se diseñaron evaluaciones que servían de retroalimentación de los objetivos de aprendizaje presentados a los estudiantes y en consonancia con dichos objetivos previamente definidos; y se compartió con los estudiantes cada uno de los conceptos, significados y conocimientos que se plantearon como parte de la metodología, así como los fundamentos de la teoría de aprendizaje significativo y aprendizaje por descubrimiento para que en todo momento el mismo estudiante fuera consciente de sus propias metas y del avance que fuera teniendo frente a ellas.

A partir de estos principios, la estrategia metodológica aplicada permitió que diferentes temas fue-

ran desarrollados tal como se plantea en la tabla 1 en la que se relacionan algunos de ellos.

RESULTADOS

En el desarrollo de los cursos paralelos de programación de computadores (uno con la metodología planteada y otro sin dicha metodología), a lo largo de los semestres de prueba se obtuvieron los resultados cuantitativos que se presentan en la tabla 2.

Es de anotar que los resultados presentados en la tabla 2 corresponden al promedio de las notas de cada prueba en cada uno de los cursos donde se realizaron las pruebas de este proyecto de investi-

Tabla 2. Resultados cuantitativos

Prueba	%	Promedio cursos aplicando metodología					Promedio cursos sin aplicar metodología				
		I 2011	II 2011	I 2012	II 2012	I 2013	I 2011	II 2011	I 2012	II 2012	I 2013
I Parcial	30	4,2	4,3	4,3	4,4	4,3	3,8	3,6	3,9	4,3	3,9
II Parcial	30	3,4	3,4	3,6	3,6	3,7	3,2	3,2	3,1	2,9	3,5
Ex. Final	40	4,0	4,1	4,1	4,2	4,2	4,0	4,1	3,7	3,6	4,0
Definitiva	100	4,9	4,0	4,0	4,1	4,1	3,7	3,7	3,6	3,6	3,8

Fuente: elaboración propia.

gación. Se puede destacar que el avance numérico en el promedio de las notas no es muy notorio dado que, en un mismo semestre, en algunos cursos el promedio fue aumentando mientras que en otro no tuvo un comportamiento distinguible. Sin embargo, se nota que la aplicación de esta metodología, con el paso del tiempo, va generando un refinamiento que posibilita que las notas equivalentes (por ejemplo, promedio de notas del I Parcial) vaya mejorando en el caso de los cursos donde se aplicó la metodología. No se nota un comportamiento caracterizable en los cursos en donde esta no se aplicó.

Si se compara uno a uno el promedio de las notas en cada semestre, se encuentra que en algunos fueron mejor las notas en los cursos donde la metodología se aplicó y en otros fue mejor el promedio de las notas de los otros cursos; sin embargo, la tendencia a mejorar las notas con el paso del tiempo es un hecho notorio en los cursos del primer grupo (o sea donde se aplicó la metodología). Las notas definitivas fueron mejores cuantitativamente en los cursos del primer grupo, en comparación con los cursos del segundo grupo. Aunque no se nota un comportamiento incremental con el paso del tiempo, se puede notar que si se compara uno a uno dichos promedios, son mejores los que se obtuvieron con la metodología propuesta.

En cuanto al análisis cualitativo se debe acotar que este análisis se hizo teniendo en cuenta la claridad de los conceptos por parte de los alumnos y el rendimiento académico independiente de

las notas que obtenían en sus pruebas. Este rendimiento académico se basó en la manera como ellos avanzaban en el desarrollo de los temas, en la calidad de las preguntas que hacían, en la forma como apropiaban y aplicaban los nuevos conceptos, y en las relaciones que establecían, *motu proprio*, entre el paradigma funcional y el paradigma estructurado. La tabla 3 nos muestra los resultados que se obtuvieron, teniendo en cuenta que este promedio se logró considerando como significativo el concepto que se derivara de la mayoría de los estudiantes. Si bien los análisis cualitativos fueron mucho más amplios, debe anotarse que por razones propias de la estructura de este artículo solo se citan los resultados resúmenes que compilan toda la experiencia en su arista puramente cualitativa.

El concepto definitivo cualitativo se obtiene observando la valoración cualitativa mayoritaria entre los conceptos obtenidos a lo largo del semestre. De esta manera, si de los tres conceptos dos de ellos son iguales, entonces este pasa a ser el concepto definitivo. En caso de que se encuentren tres conceptos diferentes se acude a la escala y se busca cuál se ubica en el centro de los tres conceptos, y ese pasa a ser el concepto definitivo. En caso de que los tres conceptos sean iguales, entonces ese mismo pasa a ser el concepto definitivo.

Vale la pena destacar que los conceptos cualitativos de rendimiento académico de todos los cursos son notoriamente mejores en los cursos donde se aplicó la metodología que en los cursos en

Tabla 3. Resultados cualitativos

Prueba	%	Promedio cursos aplicando metodología					Promedio cursos sin aplicar metodología				
		I 2011	II 2011	I 2012	II 2012	I 2013	I 2011	II 2011	I 2012	II 2012	I 2013
I Parcial	30	B	B	E	B	E	R	R	B	R	B
II Parcial	30	B	MB	MB	E	B	B	B	B	B	R
Ex. Final	40	MB	B	B	MB	B	R	B	B	R	R
Definitiva	100	B	B	MB	MB	B	R	B	B	R	R

E=Excelente; MB=Muy bueno; B=Bueno; R=Regular; M=Malo
Fuente: elaboración propia.

los que no se aplicó. Por la rigurosidad de los análisis realizados desde el punto de vista cualitativo, puede decirse que los cursos en los que se aplicó la metodología establecieron relaciones más sólidas entre el conocimiento previo (paradigma de programación funcional) y el nuevo conocimiento (paradigma de programación estructurada); esto se notó de manera evidente en el desarrollo de los talleres, actividades y dinámicas tendientes a la asimilación, la apropiación, la aplicación y el cuestionamiento de los conceptos fundamentales de cada paradigma.

DISCUSIÓN

Una de las ventajas de establecer criterios tanto cualitativos como cuantitativos es que se posibilita la evaluación de este tipo de propuestas metodológicas desde dos aristas: una que revisa los resultados cuantitativos que no se deben descuidar, dado que el sistema de valoración de la evaluación en la educación superior así lo exige y teniendo en cuenta que, si se aplica apropiadamente, puede arrojar resultados valiosos y confiables. Por otra parte, la revisión de los resultados cualitativos basados mucho más en el comportamiento de los estudiantes, en la manera como apropian los conceptos, en el nivel de las inquietudes que formulan, en la manera como aplican y cuestionan lo visto y en las relaciones que establecen entre el paradigma de programación funcional con el paradigma de programación

estructurada, lo cual permite tener un panorama mucho más objetivo de cada curso en comparación con lo que arrojan las notas.

Si el objetivo es que los estudiantes alcancen un nivel de suficiencia tanto en la comprensión del paradigma de programación funcional como del paradigma de programación estructurada y de las relaciones que entre los dos pueden establecerse, entonces puede decirse que los cursos en los cuales la metodología se aplicó los estudiantes aprendieron más que aquellos en donde no se aplicó dicha metodología. No se puede cerrar la posibilidad de refinar los procesos que se adoptaron en cuanto a estrategias, actividades, talleres, evaluaciones, quices y pruebas en general, pero debe destacarse que se tuvo particular cuidado en aplicarlos de manera idéntica en ambos cursos paralelos, de hacerlo en los mismos horarios y, prácticamente, en las mismas condiciones tanto ambientales como circunstanciales, así como en los mismos días, de manera que se pudieran obtener resultados de alta confiabilidad.

Puede decirse, con los resultados cuantitativos y cualitativos de este proyecto, que se confirmó que el estudiante aprende mucho más cuando se relaciona el nuevo conocimiento que se le quiere compartir con el conocimiento previo que ya trae, que para el caso de este proyecto de investigación corresponde al paradigma de programación funcional y al paradigma de programación estructurada respectivamente. Puede pensarse en

diferentes variantes que se podrían adoptar con el ánimo de verificar la validez de los datos que se han recogido y las valoraciones cualitativas que se han asignado; sin embargo, debe destacarse que la rigurosidad investigativa realizada y la experiencia directa con los mismos estudiantes ha permitido confirmar, *in situ* y en tiempo real, las conclusiones que se obtuvieron desde la óptica cualitativa y cuantitativa.

CONCLUSIONES

Según los hallazgos encontrados se puede asegurar que es posible establecer relaciones entre el paradigma de programación funcional y el paradigma de programación estructurada, y que mediante dichas relaciones es mucho más asimilable el paradigma de programación estructurada y su metodología es mucho más digerible si se parte de conceptos fundamentales, como el concepto de función. Toda vez que se establecen relaciones

entre el nuevo conocimiento y el conocimiento previo se develan a los estudiantes y se utilizan en la apropiación de conocimiento, los resultados van en el sentido de los objetivos del aprendizaje y el concepto de significado se fortalece cada vez que podemos establecer relaciones entre el conocimiento previo y el nuevo conocimiento.

Siempre es posible establecer relaciones entre conocimientos previos y nuevos conocimientos y entre paradigmas de programación, cualquiera que sea el orden en que estos se vean, con el ánimo de potencializar el proceso de aprendizaje. Todo proceso investigativo debe validarse desde lo cuantitativo para analizar los formalismos que se involucran, y desde lo cualitativo, para analizar las relaciones que se derivan de dichos formalismos. Si el docente lo quiere, siempre podrá encontrar caminos por donde los objetivos de aprendizaje se pueden lograr de manera más expedita, más comprensible y más digerible por parte de los estudiantes.

REFERENCIAS

- Ausubel P. (1986). *Sicología Educativa: un punto de vista cognoscitivo*. México: Editorial Trillas.
- Bruner J. (1991). *Actos de significado*. Madrid: Alianza Editorial.
- Bruner J. (1963). *El proceso de la Educación*. México: Editorial Hispanoamericana.
- Bruner J. (1969). *Hacia una teoría de la instrucción*. México: Editorial Hispanoamericana.
- Mackay D. (2005). *Information Theory, Inference and Learning Algorithms*. Cambridge: University Press.
- Piaget J. (1986). *Inteligencia y afectividad*. Buenos Aires: Aique.
- Piaget J. (2001). *Psicología y Pedagogía*. México: Crítica.
- Schildt H. (2000). *The Complete Reference C*. USA: McGraw Hill.
- Trejos O. (2005). *Fundamentos de Programación*. Pereira, Editorial Papiro.
- Trejos O. (2002). *La esencia de la lógica de programación*. Manizales: Centro Editorial Universidad de Caldas.
- Van Roy P. (2003). *Concepts, Techniques and Models of Computer Programming*. Estocolmo: Swedish Institute of Computer Science.
- Van Santen R. (2010). *2030 Technology that Will Change the World*. Oxford: Oxford University Press.

Comportamiento de mezclas asfálticas densas a partir del ensayo de viga semicircular simplemente apoyada

Behavior of dense asphalt mixtures by the simply supported semicircular beam

LUIS ALBERTO PAREDES CHÉRREZ

Ingeniero Civil. Auxiliar de Investigación, Programa de Ingeniería Civil, Grupo Geotecnia, Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia.

Contacto: u1100719@unimilitar.edu.co

ÓSCAR JAVIER REYES ORTIZ

Ingeniero Civil, Doctor. Profesor Titular, Programa de Ingeniería Civil, Líder Grupo Geotecnia, Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia.

Contacto: oscar.reyes@unimilitar.edu.co

JAVIER FERNANDO CAMACHO TAUTA

Ingeniero Civil, Doctor. Profesor Asociado, Programa de Ingeniería Civil, Investigador Grupo Geotecnia, Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia.

Contacto: javier.camacho@unimilitar.edu.co

Fecha de recepción: 1 de mayo de 2013

Clasificación del artículo: investigación

Fecha de aceptación: 23 de noviembre de 2013

Financiamiento: Universidad Militar Nueva Granada

Palabras clave: asfaltitas, asfalto reciclado, energía disipada ensayo Fénix, ensayo SCB.

Key words: Asphaltite, asphalt, energy dissipation, Fénix test, SCB test, RAP.

RESUMEN

La caracterización mecánica y dinámica de mezclas asfálticas es costosa y demorada por la complejidad y el número de ensayos necesarios para su ejecución. Sin embargo, algunas investigacio-

nes han tratado de establecer correlaciones con ensayos más sencillos, rápidos y económicos. Por esta razón, el objetivo principal de esta investigación fue establecer la viabilidad del uso del ensayo de Viga Semicircular Simplemente Apoyada (SCB) en la caracterización de mezclas asfálticas

cerradas con granulometrías del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) y del Instituto Nacional de Vías (Invias), con diferentes propiedades. El estudio inició con la fabricación de probetas SCB con diferentes materiales (agregados, asfaltos, asphaltita, asfalto reciclado y cal) y procesos de compactación (vibrocompactación y con prensa giratoria). Los ensayos se realizaron a una velocidad de 1 mm/min, una temperatura de 15°C y con la medición de los parámetros carga máxima, desplazamiento a carga máxima, energía liberada durante el proceso de fisuración, índice de rigidez a tracción e índice de tenacidad y variables definidas en el ensayo Fénix. De los resultados obtenidos, se pudo establecer que irrelevantemente del material empleado, el periodo de envejecimiento, el nivel de compactación y el reemplazo de *filler*, el ensayo SCB y los parámetros calculados evidencian el comportamiento de las mezclas asfálticas estudiadas y plantear su uso como herramienta.

ABSTRACT

Mechanic characterization of asphalt mixtures uses to be expensive and time consuming. How-

* * *

INTRODUCCIÓN

La mezcla asfáltica es el material más utilizado en la ingeniería de pavimentos; está constituido por asfalto, agregados pétreos y aditivos en diferentes proporciones. Los porcentajes de los materiales en la mezcla afectan el comportamiento mecánico y dinámico de esta y por ende su vida útil (Papagiannakis y Masad, 2008). Existen en el estado del arte múltiples ensayos de laboratorio que brindan la posibilidad de cuantificar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas, tales como módulo dinámico (MD), resistencia a la tracción indirecta (RTI), fatiga y ahuellamiento, entre otros (AENOR, 2007). Sin embargo, su ejecución, análisis y costo es elevado, lo que hace en muchos casos la búsqueda de nuevos procedi-

ever, some researches try to correlate such properties by simple, fast and less expensive tests. The main goal of this investigation consisted into establish the viability of use the simply supported semicircular beam (SCB) to characterize dense asphalt mixtures designed under specifications of the Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) and the Instituto Nacional de Vías (Invias). The study started with the production of SCB specimens using different materials (soil aggregate, asphalt, asphaltite, reclaimed asphalt pavement and lime) and compaction techniques (vibration and gyratory compaction). The SCB tests were carried at a velocity of 1mm/min and 15°C of temperature. From these tests, different parameters were obtained based on the definition in the Fénix test (maximum load, displacement at maximum loading, energy released during the cracking process, traction stiffness index and tenacity index). From the results, it was found that the SCB tests were useful as a tool to characterize the mechanical properties of the asphalt mixtures. This conclusion is applicable for all kind of mixtures tested, ageing periods, compaction level and *filler* content.

mientos y ensayos más económicos y en menor tiempo, pero igual de eficaces y eficientes que los enunciados anteriormente (Molenaar *et al.*, 2002; Valdes *et al.*, 2009; Pérez *et al.*, 2001).

El ensayo de viga semicircular simplemente apoyada (SCB, acrónimo en inglés de Semi-Circular Bending) fue desarrollado en Australia por Lim, I. L., Johnston, I. W. y Choi, S. K. para estudiar las fracturas en la mecánica de rocas (1993). Posteriormente, las técnicas del SCB se emplearon para estudiar la resistencia al agrietamiento y la fractura de mezclas asfálticas en Estados Unidos por Molenaar, J., Lui, X. y Molenaar, A. (2003). Con base en los resultados obtenidos y la simplicidad de la metodología del ensayo, se ha generado y proporcionado una plataforma adecuada

para que múltiples investigadores caractericen las propiedades de fractura y fatiga de mezclas asfálticas con diferentes condiciones (Papagiannakis y Masad, 2008; Prapoorna *et al.*, 2012; Li y Marasteanu, 2010; Arabandi y Ferdowsi, 2009).

El ensayo SCB es un procedimiento rápido, preciso y confiable, el cual permite conocer la carga máxima (F_{max}) y el desplazamiento a la carga máxima (ΔF_{max}), que podrá ser capaz de resistir una mezcla asfáltica en la capa de pavimento antes de llegar a la falla. Así mismo, Valdés, Pérez y Botella (2011), en el desarrollo del ensayo Fénix, plantearon los parámetros de la curva carga-desplazamiento, donde muestran el comportamiento frente a la fatiga y la fractura de las mezclas asfálticas, como el índice de rigidez a la tracción (IRT), el índice de tenacidad (IT), la energía elástica ($W F_{max}$) y de fluencia (Ws), y carga máxima (F_{max}), entre otras.

El procedimiento del ensayo SCB consiste en fabricar muestras cilíndricas mediante el compactador Marshall o el compactador de prensa giratorio para, posteriormente, cortarlos en dos partes iguales, de esta manera se obtienen dos semicírculos (figura 1). A continuación se realiza una entalladura de aproximadamente 3 mm en la mitad de la muestra, cuyo



Figura 1. Muestras para ensayo SCB

Fuente: elaboración propia.

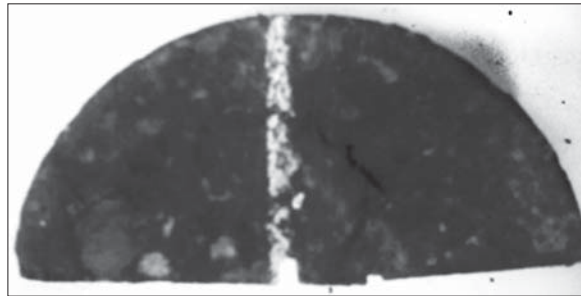


Figura 2. Muestra con entalladura

Fuente: elaboración propia.

objetivo es inducir el plano de falla durante el ensayo (figura 2) (Arabandi y Ferdowsi, 2009).

Acto seguido, se coloca la muestra centrada y simplemente apoyada en el dispositivo para el ensayo, el cual establece que exista una distancia entre apoyos igual al 80 % de la longitud del diámetro (figura 3) (Arabandi y Ferdowsi, 2009). Finalmente, se aplica una carga constante en el centro de la luz de la muestra hasta llegar a la falla, a una velocidad de 50 mm/min y a una temperatura preestablecida (figura 4) (Molenaar *et al.*, 2003).

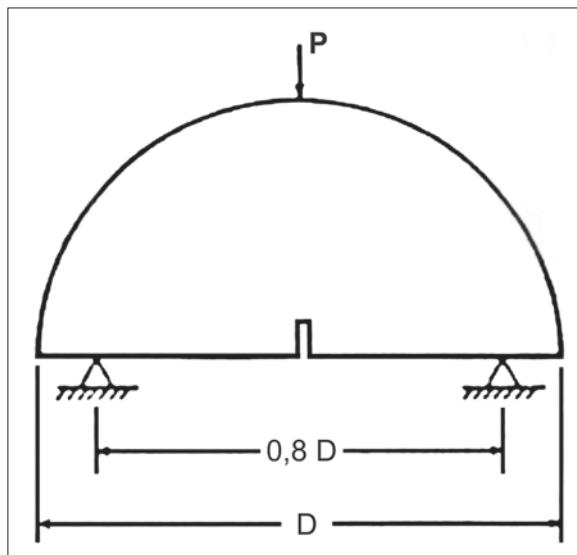


Figura 3. Esquema del dispositivo y la muestra para ensayo SCB

Fuente: elaboración propia.

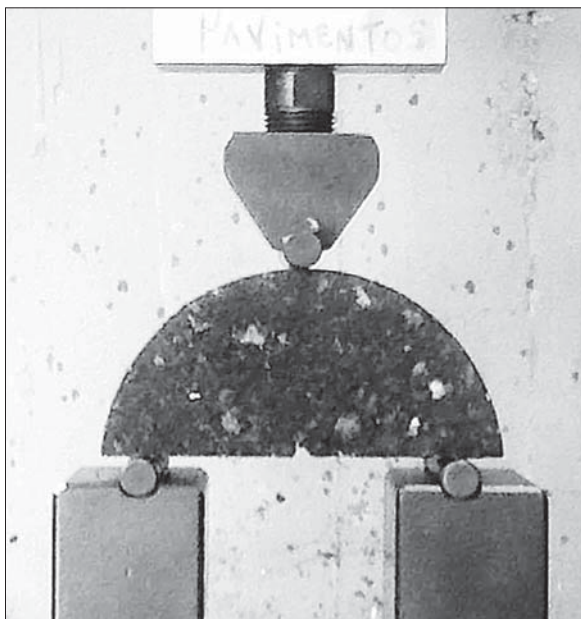


Figura 4. Muestra y dispositivo utilizado en el ensayo SCB

Fuente: elaboración propia.

El resultado final del ensayo consiste en establecer la curva carga-desplazamiento, de la cual se obtiene la carga máxima y el desplazamiento a carga máxima, variables para estudiar el comportamiento mecánico y dinámico de las mezclas asfálticas ensayadas.

Estudios realizados por Molenaar, Scarpas, y Liu (2002) concluyen que el ensayo SCB puede ser usado para caracterizar las fracturas y esfuerzos sufridos en mezclas asfálticas con buena repetitividad. Además, encontraron que los valores de la resistencia a la tensión obtenida por diferentes métodos (RTI, UniaxialTensile Test, y SCB) no varía significativamente, haciendo posible el uso del ensayo SCB para cuantificar esta propiedad y correlacionarla con los demás ensayos.

Por otro lado, investigaciones realizadas en Irán por M. Arabandi y B. Ferdowsi (2008), concluyeron que el ensayo SCB puede ser usado para caracterizar los esfuerzos a tracción de mezclas

asfálticas en caliente con buena repetitividad. Además, manifiestan que la forma de la falla desarrollada en el ensayo es de gran utilidad, pues es similar al Modo I de fallo de la mecánica de fracturas y que es aplicable incluso a temperaturas elevadas cuando el material se comporta de manera visco-elástica, haciendo viable establecer el comportamiento de las mezclas asfálticas con la teoría de la mecánica de fracturas.

Por otra parte, el ensayo Fénix desarrollado por la Universidad Politécnica de Cataluña utiliza igualmente probetas semicirculares para establecer las propiedades mecánicas y dinámicas de mezclas asfálticas; sin embargo, este ejecuta la carga a tensión. El resultado del ensayo consiste en obtener la curva carga-desplazamiento (figura 5) y, de esta, determinar los parámetros que definen el comportamiento de una mezcla asfáltica y que se definen a continuación (Valdes, 2011):

Carga máxima (F_{max}) [kN]: se define como la carga máxima registrada en el ensayo.

Desplazamiento a carga máxima (ΔF_{max}) [mm]: se define como el desplazamiento registrado desde el inicio de la carga hasta que alcanza la carga máxima.

Desplazamiento al 50% F_{max} prepico (Δ_m) [mm]: se define como el desplazamiento correspondiente a la mitad de la carga máxima alcanzada, antes del pico.

Desplazamiento al 50% F_{max} postpico (Δ_{mdp}) [mm]: se define como el desplazamiento registrado por la muestra una vez que la carga ha caído a la mitad del valor de su carga máxima. Este parámetro indica la capacidad que tiene la mezcla evaluada de admitir desplazamientos, puesto que a medida que las mezclas son más dúctiles, y por ende más deformables, se obtienen mayores valores de Δ_{mdp} , mientras que para mezclas más frágiles se obtienen menores valores de Δ_{mdp} .

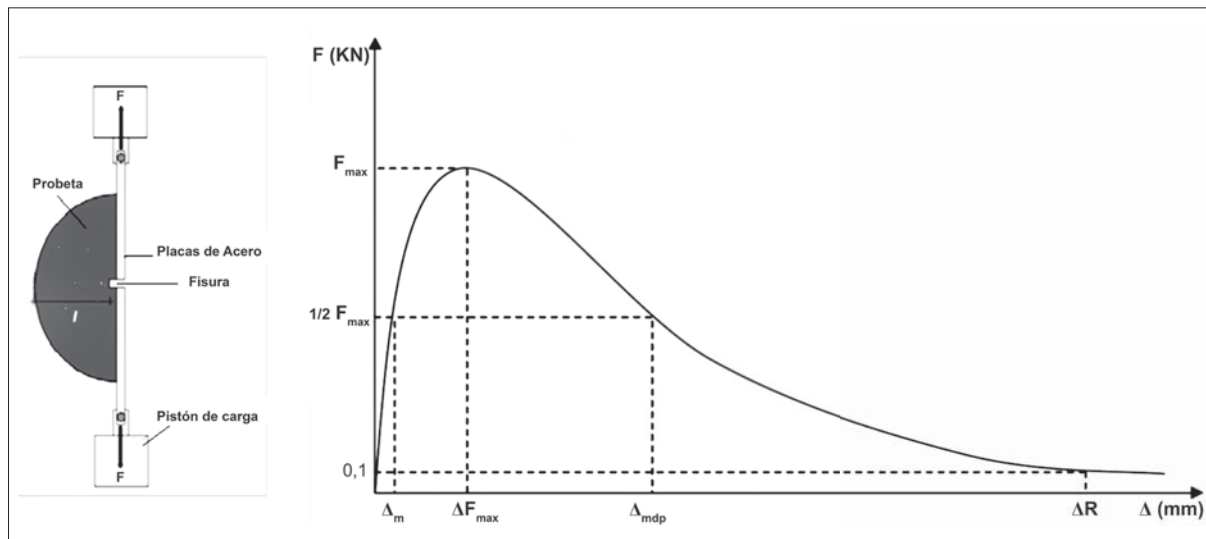


Figura 5. Curva Carga-Deformación del ensayo SCB

Fuente: Valdés (2011).

Energía total (W_D) [kN-mm]: trabajo realizado en el proceso de fisuración, área bajo la curva F- Δ .

Energía Elástica ($W_{F_{max}}$) [kN-mm]: trabajo realizado hasta la carga máxima, área prepico.

Energía de Fluencia (W_S) [kN-mm]: trabajo realizado en la zona de ablandamiento, área postpico.

Índice de rigidez a la tracción (I_{RT}) [kN/mm]: se define como la relación entre la mitad de la carga máxima, $1/2 F_{max}$, y el desplazamiento a la carga máxima, Δ_m . Este índice muestra una pseudo-rigidez del material, mostrando qué tan flexible o rígida es la mezcla asfáltica evaluada. El índice de rigidez de tracción se calcula de acuerdo con la ecuación (1).

$$I_{RT} = \frac{1/2 \cdot F_{max}}{\Delta_m} \quad (1)$$

Donde,

I_{RT} : índice de rigidez a la tracción [kN/mm].

F_{max} : carga máxima registrada [kN].

Δ_m : desplazamiento antes a la carga máxima a $1/2 F_{max}$ [mm].

Índice de tenacidad (I_T) [(J/m²)·mm]: se define como la energía disipada en el proceso de ablandamiento multiplicada por un factor de fragilidad, el cual corresponde al desplazamiento realizado desde la carga máxima F_{max} hasta que la carga ha caído a la mitad de su valor máximo. Este índice tiene la finalidad de evaluar la tenacidad de la mezcla asfáltica, considerándose esta como la capacidad de la mezcla de mantener unidos sus componentes una vez que ha alcanzado su resistencia máxima. Por tanto, a medida que este parámetro aumenta, la mezcla es más tenaz, y por otra parte, a medida que este factor disminuye, la mezcla tiene un comportamiento más frágil. Su expresión de cálculo se observa en la ecuación (2).

$$I_T = \frac{W_D - W_{F_{max}}}{h \cdot l} \cdot (\Delta_{mdp} - \Delta_{F_{max}}) \quad (2)$$

Donde,

I_T : índice de tenacidad [(J/m²)·mm].

investigación

W_D : trabajo realizado en el proceso de fisuración, área bajo la curva carga-desplazamiento [kN-mm].

WF_{max} : trabajo realizado hasta la carga máxima [kN-mm].

ΔF_{max} : desplazamiento a F_{max} [mm].

Δ_{mdp} : desplazamiento a $\frac{1}{2} F_{max}$ postpico [mm].

h : espesor de la probeta [m].

l : ancho de la probeta [m].

Con base en las investigaciones desarrolladas con el ensayo SCB a una velocidad de 1mm/min y a una temperatura de 15 °C, y en cuanto a lo económico, rápido, repetible, eficaz y eficiente del ensayo, sumado a los parámetros que se pueden obtener de la curva carga-desplazamiento establecidos en el ensayo Fénix y la posible correlación de estos con los ensayos de MD, RTI, fatiga, ahuellamiento, entre otros, se inició esta investigación con el objeto de establecer la viabilidad de su uso en mezclas asfálticas cerradas con granulometrías colombianas de Invias y del IDU. Esto con la finalidad de evidenciar su comportamiento mecánico y dinámico, pero de una forma más sencilla, eficaz, veloz y económica.

METODOLOGÍA

La metodología usada en la investigación aparece en la figura 6 y comienza con la caracterización de los materiales (asfalto, agregados, pavimento reciclado (RAP), asfaltita y cal). Posteriormente, se fabricaron las muestras de las mezclas asfálticas con diferentes granulometrías del IDU, md-10, md-12 y md-20 (IDU, 2011) y del Invias, mdc-2 (Invias, 2007). Estas fueron compactadas en diferentes niveles de energía, con diferentes materiales (asfaltita, RAP, modificado y convencional) y con reemplazos de relleno mineral por cal. Las probetas fabricadas se procedió a cortar-

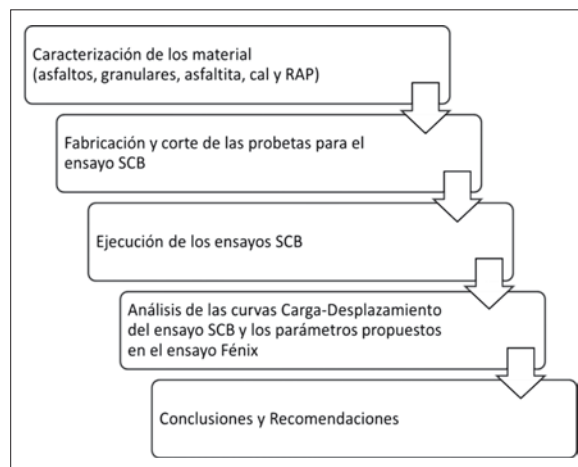


Figura 6. Diagrama de la metodología usada en la investigación

Fuente: elaboración propia.

las y acondicionarlas para hacer el ensayo SCB. A continuación se ejecutaron los ensayos a una velocidad de carga de 1mm/min y a una temperatura de 15 °C. Finalmente, se establecieron las curvas de carga-desplazamiento y los parámetros (F_{max} , ΔF_{max} , WF_{max} , Ws , IRT e IT), con el objeto de determinar el comportamiento mecánico y dinámico de las mezclas asfálticas estudiadas y establecer la viabilidad del uso del ensayo SCB para caracterizar las mezclas asfálticas colombianas.

Caracterización de los materiales

Para la fabricación de las probetas de mezclas asfálticas del estudio se usaron granulares provenientes de la cantera del río Tunjuelito (tabla 1) (Londoño, 2012), asfaltitas de las minas de Boyacá (tabla 2) (Castillay Martínez, 2011), asfaltos de diferente penetración (tabla 3) (Ostos *et al.*, 2011) reemplazos de *filler* por cal (tabla 4) y RAP (tabla 5).

Fabricación de las probetas

Para el desarrollo de la investigación se fabricaron probetas cilíndricas de mezclas asfálticas

Tabla 1. Características de los agregados utilizados

Ensayo	Norma	Resultado Tunjuelito
Equivalente de arena [%]	INV. E-133	57,00
Resistencia al desgaste [%]	INV. E-218	29,90
Peso específico aparente agregado fino [%]	INV. E-222	2,60
Absorción agregado fino [%]	INV. E-222	1,10
Peso específico aparente agregado grueso [%]	INV. E-223	2,59
Absorción agregado grueso [%]	INV. E-133	1,60

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Características de las asfaltas de las minas de Boyacá

Muestra	Peso inicial (g)	Peso centrifugado (g)	Diferencia (g)	% Asfalto	Promedio (%)
1	1500,17	1392,38	107,79	7,74	7,50
2	1500,34	1396,00	104,34	7,47	
3	1500,09	1399,96	100,13	7,15	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Características de los asfaltos

Ensayo	Norma	Asfalto (60/70)	Asfalto (80/100)
Penetración (1/10 mm)	INV. E-706	63	89
Ductilidad (cm)	INV. E-702	120	133
Viscosidad (poise)	INV. E-716	1500	1250
Punto de ablandamiento (°C)	INV. E-712	47°C	52°C
Punto de llama e ignición (°C)	INV. E-709	235°C y 245°C	220°C y 225°C

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Características de la cal

Ensayo	Norma	Resultado
Densidad	INV. E-225	2980 kg/m ³

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Contenido de asfalto del pavimento reciclado

Peso	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Inicial (g)	1200,03	1201,01	1200,13	1202,23	1200,52
Final (g)	1126,86	1127,32	1125,98	1129,20	1123,80
% Asfalto	6,10	6,14	6,18	6,07	6,39
Promedio	6,18 %				

Fuente: elaboración propia.

cerradas con granulometrías del IDU (md-10, md-12, md-20) y del Invias (mdc-2), utilizando asfaltos de penetración 60/70 y 80/100, agregados vírgenes y de recuperación (RAP), reemplazos de *filler* mineral por cal en diferentes porcentajes (100 %, 75 % y 50 %), y probetas compactadas a diferentes niveles de energía en el compactador giratorio (50, 100, 200 y 300 giros), y con diferentes tiempos de vibro-compactación (70, 90 y 120 s). Posteriormente, las probetas fabricadas se acondicionaron para el ensayo SCB, se cortaron en dos partes iguales y se entallaron. Por último, se coloca la muestra centrada y simplemente apoyada en el dispositivo para el ensayo y se aplica una carga constante en el centro de la luz de la muestra hasta llegar a la falla, a una velocidad de 1 mm/min y a una temperatura de 15 °C.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir de la ejecución de los ensayos SCB para las diferentes mezclas asfálticas fabricadas con diferentes características, y de haber establecido los parámetros de las curvas carga-desplazamiento, se obtuvieron los siguientes resultados en la investigación:

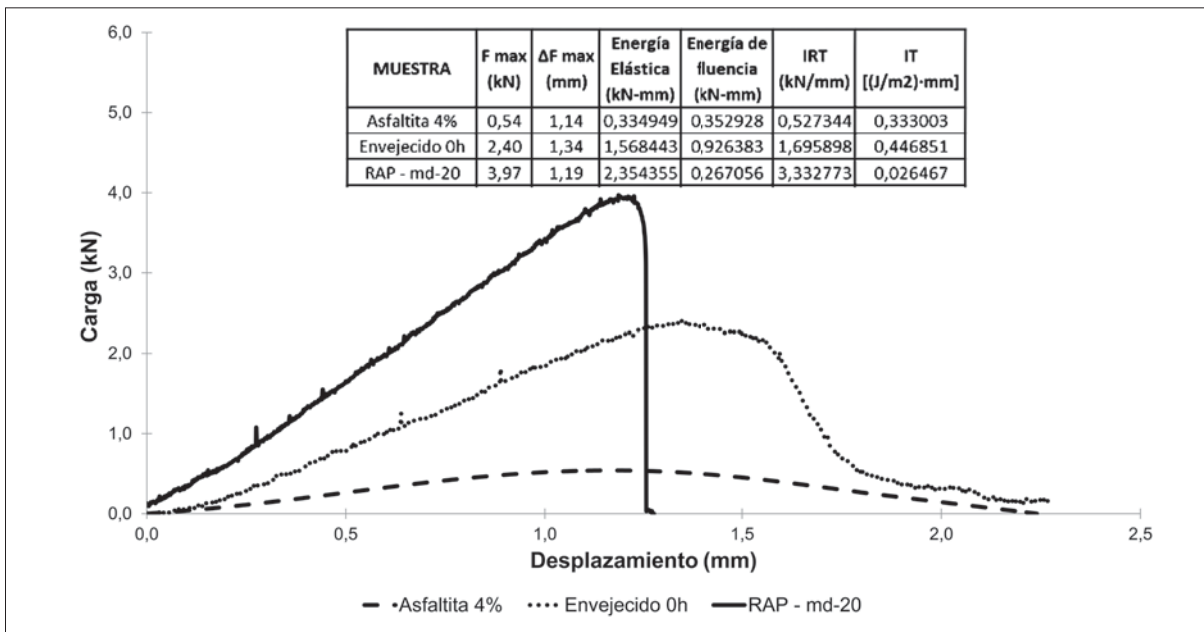


Figura 7. Curvas carga-desplazamiento ensayo SCB con RAP, asfaltita y asfalto 60/70

Fuente: elaboración propia.

En la figura 7 se observan los resultados del ensayo SCB para tres mezclas asfálticas fabricadas con tres diferentes materiales: RAP, asfaltita y asfalto 60/70. En el análisis de las curvas de carga-desplazamiento se evidencia claramente el comportamiento de fragilidad de la mezcla con RAP, la cual consiste en soportar cargas elevadas, pero desplazamientos pequeños. Adicionalmente, se aprecia que al alcanzar su resistencia máxima falla en forma súbita, comportamiento característico de materiales rígidos o frágiles. Por otra parte, la curva de la mezcla asfáltica fabricada con asfaltita presenta un comportamiento totalmente contrario (dúctil), el cual muestra poca carga pero niveles de deformación altos. Para el caso de la mezcla fabricada con asfalto convencional (60/70) se observa una curva con resistencias y desplazamientos intermedios. Estos resultados permiten distinguir claramente el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas entre estados frágiles y dúctiles, dando la posibilidad de utilizar el ensayo como una herramienta de caracterización de mezclas asfálticas.

En la figura 8 se aprecian las curvas de carga-desplazamiento de tres mezclas asfálticas fabricadas con RAP al 100%, pero con granulometrías diferentes del IDU (md-10, md-12 y md-20). El comportamiento de las mezclas es similar, alcanzando altas resistencias y desplazamientos pequeños, lo cual indica que son extremadamente rígidas. Al comparar las curvas, el ensayo SCB diferencia la resistencia en función de la granulometría, siendo más resistente la granulometría md-20 y la menos resistente la md-10. Adicionalmente, el ensayo muestra el comportamiento frágil de estos materiales que consiste en tener cargas elevadas, deformaciones pequeñas y fallas súbitas.

Otro tema estudiado en la investigación consistió en la fabricación de mezclas asfálticas con asfaltita a las cuales se les adicionó asfalto 60/70 en diferentes porcentajes (0, 3 y 4%). En la figura 9 se observan los resultados de las curvas carga-desplazamiento, donde se evidencia que dadas las características de los materiales, su comportamiento es totalmente dúctil. Por otra parte, la sensibilidad del ensayo permite establecer dife-

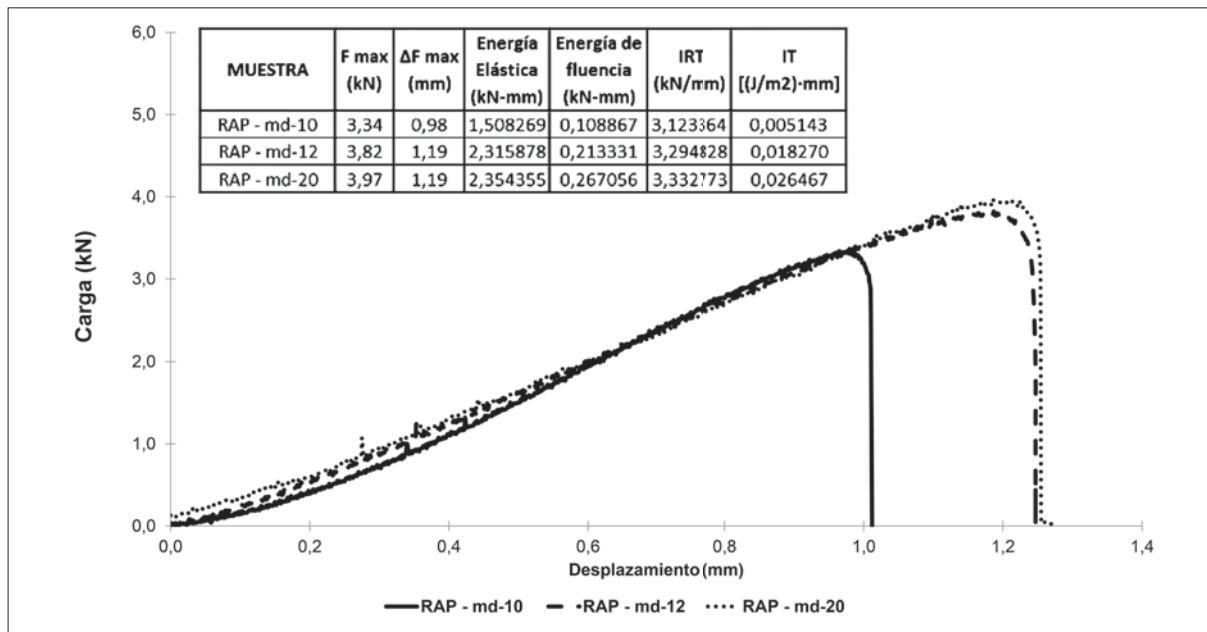


Figura 8. Curvas carga-desplazamiento ensayo SCB con RAP y diferentes granulometrías

Fuente: elaboración propia.

rencias de resistencia, desplazamiento, energías liberadas, índices de tenacidad e índices de rigidez a la tracción, al variar levemente el porcentaje de adición de asfalto. De los parámetros evaluados, se aprecia que la resistencia máxima se presenta en la mezcla con 4% de adición de asfalto, y la mínima en la mezcla con 0% de adición de asfalto. A medida que varían los porcentajes de asfalto se hacen presentes cambios elevados en la resistencia; esto indica que el ensayo es muy sensible a este tipo de variaciones, haciéndolo útil en la caracterización de mezclas asfálticas dúctiles.

En la figura 10 se pudo establecer que por las curvas carga-desplazamiento de mezclas asfálticas fabricadas con granulometría md-10 del IDU y asfalto 60/70, pero con diferentes reemplazos de *filler* mineral por cal (100%, 75%, 50%), se obtienen valores de resistencia directamente proporcionales al contenido de cal; esto evidencia el cambio de los parámetros del ensayo SCB en función del porcentaje de cal. En el caso del 100%, la resistencia fue de 3,24 kN y el desplazamiento fue de

1,11 mm, mientras que en las probetas con 75% de cal, la resistencia disminuyó a un valor de 2,90 kN y el desplazamiento se incrementó a 1,35 mm. Para la mezcla con 50% de cal, el valor de la carga máxima cayó a 2,60 kN y a un desplazamiento de 1,1 mm. Estos resultados muestran la bondad del ensayo al percibir cambios en las propiedades de una mezcla asfáltica al reemplazar el *filler* mineral por cal, lo cual pone de manifiesto su posible uso en la caracterización de estas mezclas asfálticas.

En la figura 11 se aprecian los resultados de las curvas carga-desplazamiento de muestras fabricadas con granulometría mdc-2 del Invias, las cuales fueron envejecidas a diferentes tiempos (0, 24 y 48 h) en horno con circulación de aire a 80 °C. Los resultados muestran que a mayor tiempo de envejecimiento la muestra se rigidiza, por lo tanto, alcanza mayores cargas y reduce su desplazamiento a carga máxima. Así mismo, se observa que en la medida que aumenta el periodo de envejecimiento, la muestra presenta una curva característica de materiales frágiles, cargas elevadas y ruptura súbita.

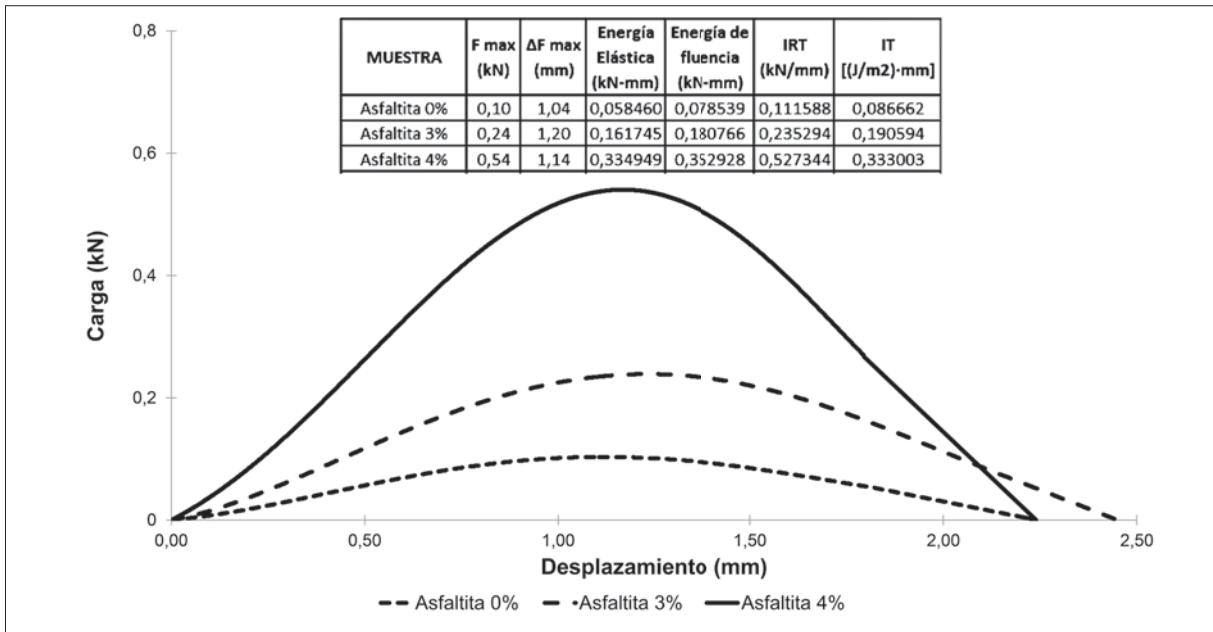


Figura 9. Curvas carga-desplazamiento ensayo SCB de asfaltita con adición de asfalto en diferentes porcentajes (0, 3, 4 %)

Fuente: elaboración propia.

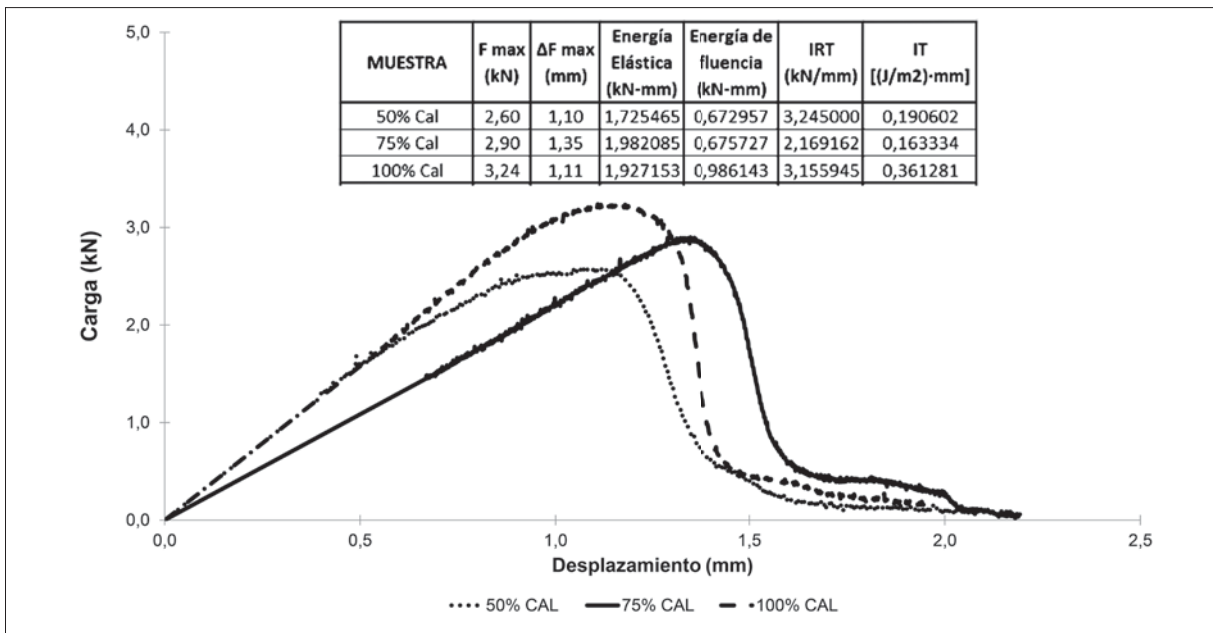


Figura 10. Curvas carga-desplazamiento ensayo SCB de asfaltos con diferentes porcentajes de reemplazo de filler por cal (50, 75 y 100 %)

Fuente: elaboración propia.

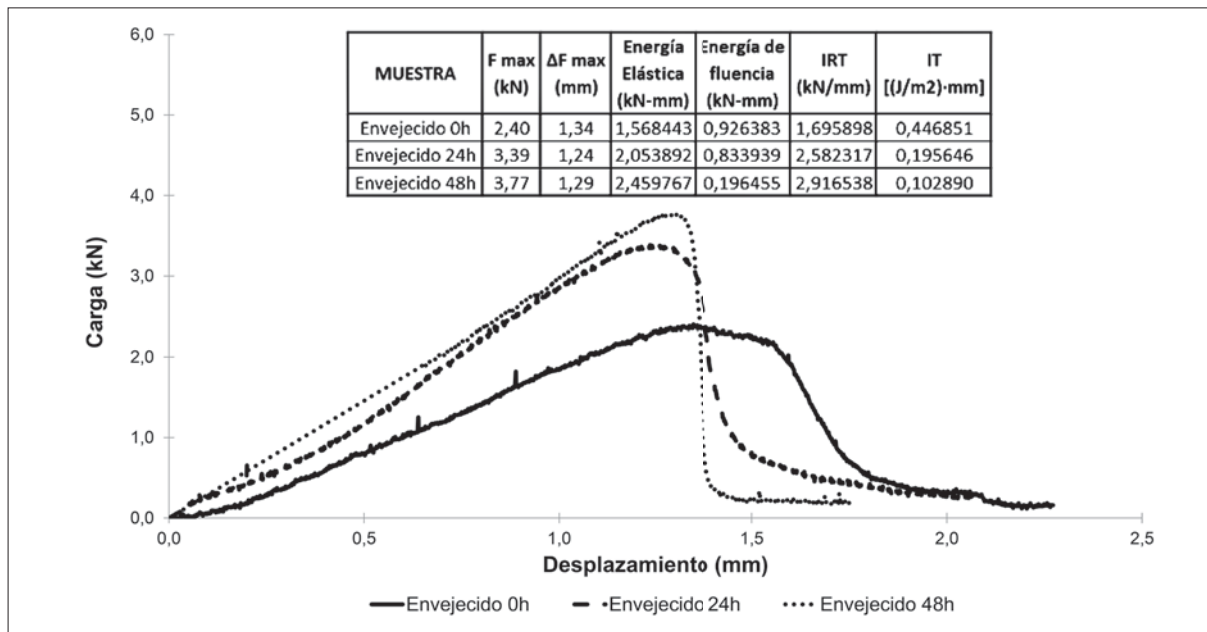


Figura 11. Curvas carga-desplazamiento ensayo SCB de asfaltos con diferentes periodos de envejecimiento (0, 24 y 48h)

Fuente: elaboración propia.

Estos resultados ponen de manifiesto que el ensayo puede evidenciar cambios de comportamiento en función del envejecimiento de las mezclas.

En la figura 12 se presentan los resultados de las curvas carga-desplazamiento de muestras fabricadas con asfalto 80/100 y granulometría md-10 del IDU, compactadas con diferentes niveles de vibrocompactación (75, 90 y 120 s). Del análisis de los resultados se puede observar la pérdida de elasticidad de las mezclas, rigidizándose como efecto directo de la densificación sufrida por el incremento del tiempo de vibrocompactación, siendo así la mezcla con menor desplazamiento la compactada durante mayor tiempo (120 s), y la de mayor desplazamiento la compactada durante menor tiempo (75 s). Se aprecia que la resistencia obtenida de las muestras no presentó cambios significativos; sin embargo, el ensayo muestra cambios en sus niveles de desplazamiento a carga máxima, lo que evidencia cambios en las propiedades de mezclas asfálticas a partir del tiempo de vibrocompactación.

Por otra parte, en la figura 13 se muestran las curvas carga-desplazamiento de muestras con el mismo asfalto y granulometría, pero fabricadas con diferentes niveles de compactación en la prensa giratoria (50, 100, 200 y 300 giros). De las curvas se observa el aumento de la carga máxima en función de la cantidad de giros de compactación, siendo así la mezcla con mayor carga máxima la compactada a mayor cantidad de giros (300 giros) y la de menor carga máxima la compactada a menor cantidad de giros (50 giros). De los resultados encontrados en las probetas compactadas por diferentes medios, los cambios sufridos se evidencian por medio del ensayo SCB, nuevamente mostrando las bondades del ensayo a la hora de caracterizar las mezclas asfálticas estudiadas.

Del estudio y el análisis de los parámetros establecidos en el ensayo Fénix y obtenidas de las diferentes mezclas asfálticas estudiadas, se puede observar en la figura 14 la energía liberada (elástica y de fluencia) durante el proceso de fisuración. Del análisis de los valores de energía (elástica y

de fluencia), se observa que las muestras con RAP irrelevantemente su granulometría, presentan valores máximos de energía elástica y mínimos de energía de fluencia, comportamiento característico de mezclas asfálticas rígidas. Así mismo, las muestras fabricadas con asfaltitas, con y sin adición de asfalto (0, 3 y 4%), presentan un comportamiento totalmente contrario: energías elásticas y de fluencia muy bajas, característica de mezclas asfálticas dúctiles y de baja resistencia. Por otra parte, las mezclas asfálticas fabricadas con diferentes reemplazos de *filler* por cal (50, 75 y 100%) muestran que en la medida que aumenta el porcentaje de reemplazo, aumenta la energía elástica y de fluencia, mostrando que la cal rigidiza la mezcla, pero también aumenta su carga máxima. En el caso de las muestras compactadas a diferentes cantidad de giros (50, 100, 200 y 300 giros), se muestra que a mayor cantidad de giros se obtiene mayor energía (elástica y fluencia). Así mismo, en el proceso de vibro-compactación (75, 90 y 120 s) se observa que las energías (elástica y de fluencia) son relativamente homogéneas para los diferentes tiempos

de vibro-compactación. Finalmente, en las muestras envejecidas se observa que la energía elástica aumenta con el periodo de envejecimiento, comportamiento coherente por el proceso de rigidización que sufren las mezclas asfálticas.

En la figura 15 se tienen los resultados del IRT de las muestras fabricadas con diferentes materiales y procesos de compactación; este índice muestra qué tan flexible o rígida es una mezcla asfáltica: A mayor IRT la mezcla tiende a ser más rígida.

De los resultados se evidencia que las mezclas más rígidas son las fabricadas con RAP irrelevantemente de su granulometría, seguidas por las fabricadas con reemplazo de *filler* mineral por cal en diferentes proporciones (50, 75 y 100%). Para las muestras fabricadas con asfaltita, con y sin adición de asfalto (0, 3 y 4%), se obtuvieron los menores valores, lo cual era lo esperado, puesto que por la naturaleza de las muestras se afirma que tienen un comportamiento netamente dúctil, resistiendo poca carga y logrando grandes desplazamientos.

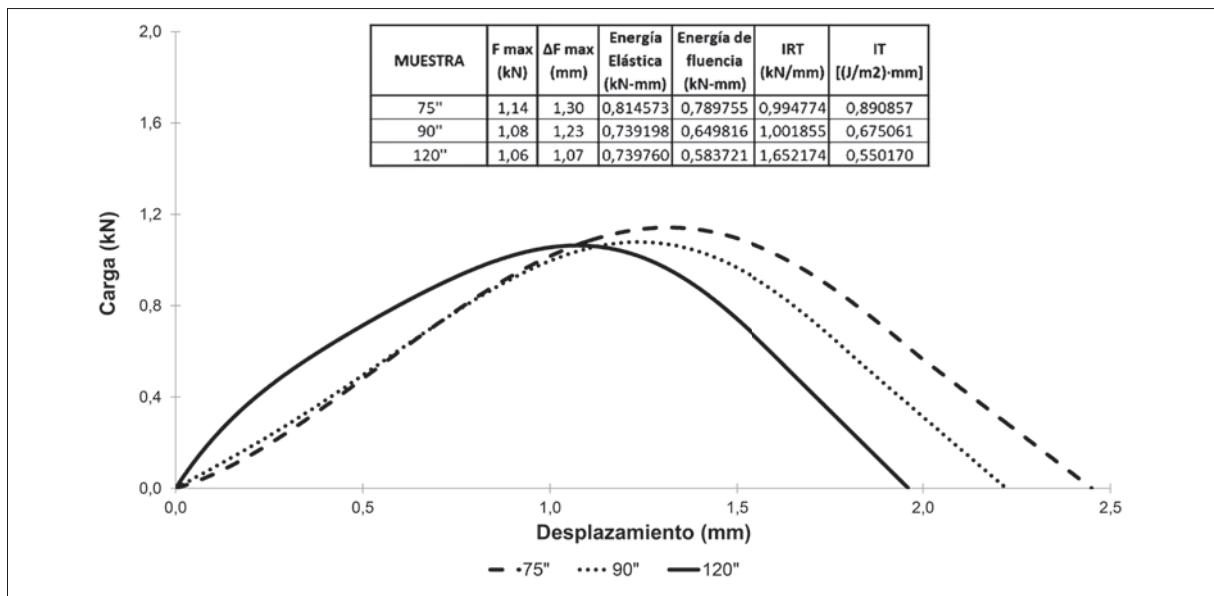


Figura 12. Curvas carga-desplazamiento ensayo SCB de asfaltos con diferentes niveles de compactación (75, 90 y 120s)

Fuente: elaboración propia.

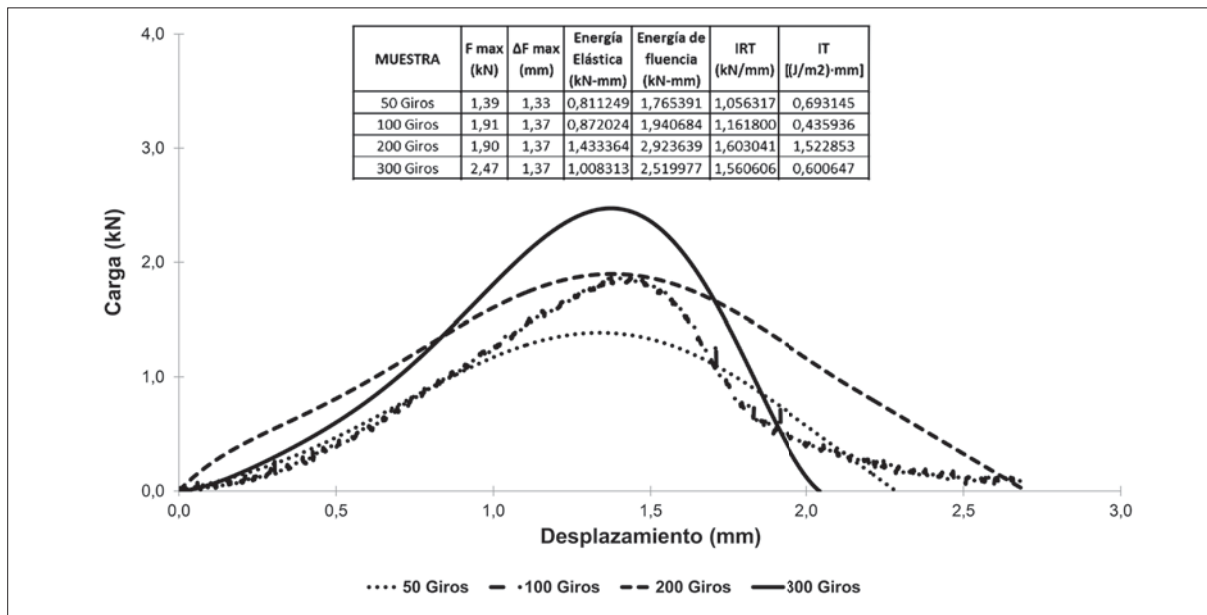


Figura 13. Curvas carga-desplazamiento ensayo SCB de asfaltos con diferentes niveles de compactación (50, 100, 200, 300 giros)

Fuente: elaboración propia.

Para el caso de las muestras fabricadas con diferentes periodos de envejecimiento (0, 24 y 48 h), el IRT aumenta directamente con el periodo de envejecimiento, lo cual está relacionado con su proceso de rigidización. Así mismo, en las muestras fabricadas en diferentes niveles de compactación (50, 100, 200 y 300 giros), el IRT aumenta directamente con la cantidad de giros. Por otro lado, en las muestras fabricadas a diferentes tiempos de vibrocompactación (75, 90 y 120 s), se evidencia que para tiempos cortos (75 y 90 s), la densificación y la rigidización del material no es notoria, mientras que para mayores tiempos (120 s) la muestra gana rigidez, evidentemente en un incremento del IRT.

Finalmente, se calculó el IT de las muestras fabricadas con diferentes materiales y procesos de compactación, como se aprecia en la figura 16. Este índice mide la tenacidad de la mezcla asfáltica, considerándose esta como la capacidad de la mezcla de mantener unidos sus componentes una vez que ha alcanzado su resistencia máxima. Para el caso de las mezclas asfálticas fabricadas con RAP, se apre-

cian los menores valores de este índice al ser este muy rígido y fallar de forma súbita. Para las muestras fabricadas con asfaltita, con y sin adición de asfalto (0, 3 y 4 %), se observa que este índice tiende a aumentar a mayor porcentaje de asfalto adicionado, hecho que se debe a la capacidad de mantener unidos sus componentes al aumentarlos porcentajes de asfalto. En las mezclas fabricadas con reemplazo de *filler* mineral por cal en diferentes proporciones (50, 75 y 100 %), este índice aumenta a mayor contenido de cal: esto indica que el comportamiento de las muestras tiende a ser tenaz como efecto de la rigidización del material. Por otro lado, para las muestras envejecidas a diferentes tiempos (0, 24 y 48 h), este índice tiende a disminuir a medida que aumenta el tiempo de envejecimiento, presentándose en las muestras un comportamiento frágil a tiempos mayores. Así mismo, para las muestras fabricadas a diferentes tiempos de vibrocompactación (75, 90 y 120 s), se puede afirmar que el índice disminuye a medida que aumenta el tiempo de vibrocompactación, evidenciándose nuevamente un comportamiento frágil. Por último, se puede manifestar que

el ensayo SCB y los parámetros calculados de las curvas carga-desplazamiento evidencian el comportamiento de mezclas asfálticas fabricadas con diferentes materiales y procesos de compactación; adicionalmente, es capaz de distinguir cambios en su rigidez, ductilidad, envejecimiento y reemplazo de materiales.

CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos de los diferentes ensayos SCB realizados a 15 °C, a una velocidad de aplicación de carga de 1mm/min y la definición de los parámetros de carga máxima, desplazamiento a carga máxima, desplazamiento al 50 % F_{max} prepico, desplazamiento al 50 % F_{max} postpico, energía elástica, energía de fluencia, índice de rigidez a la tracción e índice de energía de los diferentes materiales (Asfaltita, RAP, asfalto convencional), reemplazo de *filler* por cal en diferentes porcentajes y con diferentes niveles de compactación, se pudo concluir:

El ensayo SCB es sencillo, rápido, veloz y eficaz; puede establecer el comportamiento de mezclas

asfálticas con diferentes materiales y procesos de compactación, ahorrando recursos económicos y de capital.

La sensibilidad del ensayo permite distinguir comportamientos de materiales desde frágiles a dúctiles, compactados a niveles de energía, altos o bajos, envejecidos o sin envejecer y con diferentes reemplazos de *filler* por cal.

Los parámetros del ensayo Fénix (carga máxima, desplazamiento a carga máxima, energía liberada durante el proceso de fisuración, índice de rigidez a tracción e índice de tenacidad), fueron posibles de calcular con las curvas carga-desplazamiento obtenidas en el ensayo SCB, y estos permiten definir las características y propiedades de las mezclas asfálticas estudiadas.

Finalmente, el ensayo SCB puede ser correlacionado con los ensayos de módulo dinámico, resistencia a la tracción indirecta, fatiga y ahuecamiento, entre otros, alcances que no están incluidos en esta investigación, pero serían de gran aporte al comportamiento de las mezclas asfálticas estudiadas.

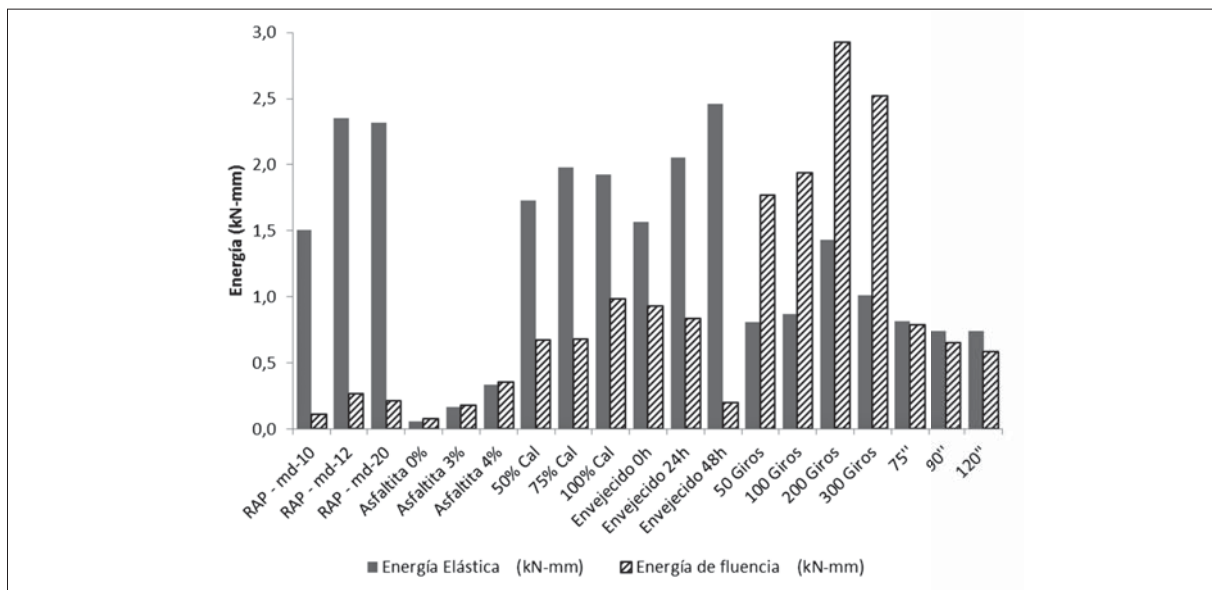


Figura 14. Energía elástica y de fluencia de diferentes mezclas asfálticas

Fuente: elaboración propia.

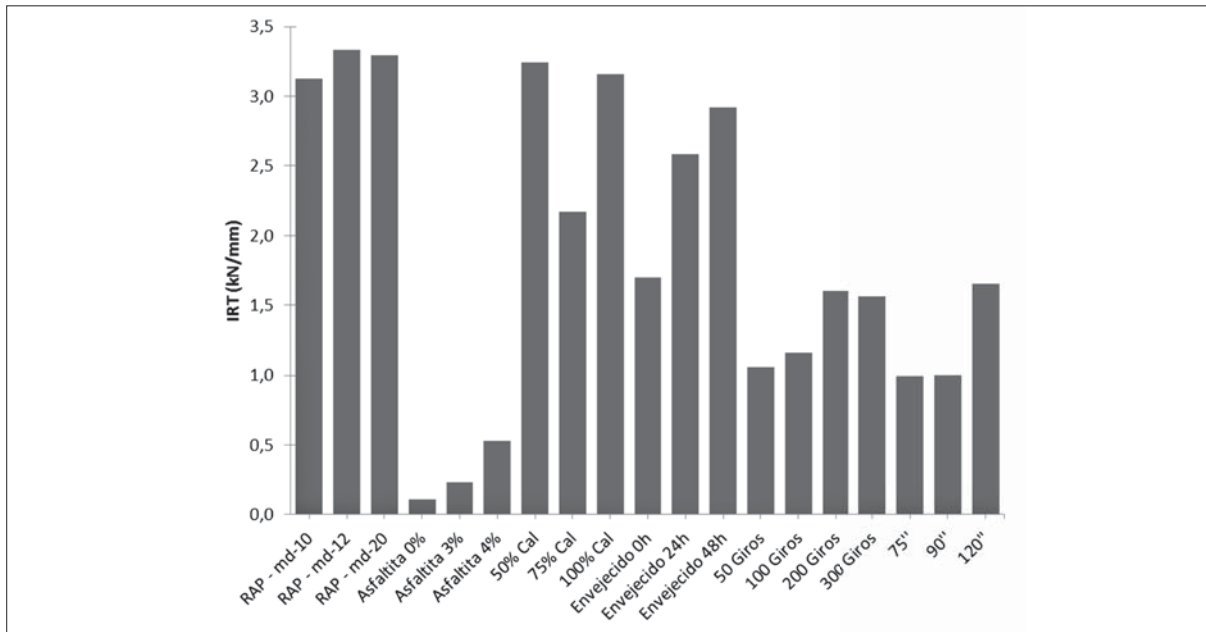


Figura 15. Índice de rigidez a la tracción de diferentes mezclas asfálticas

Fuente: elaboración propia.

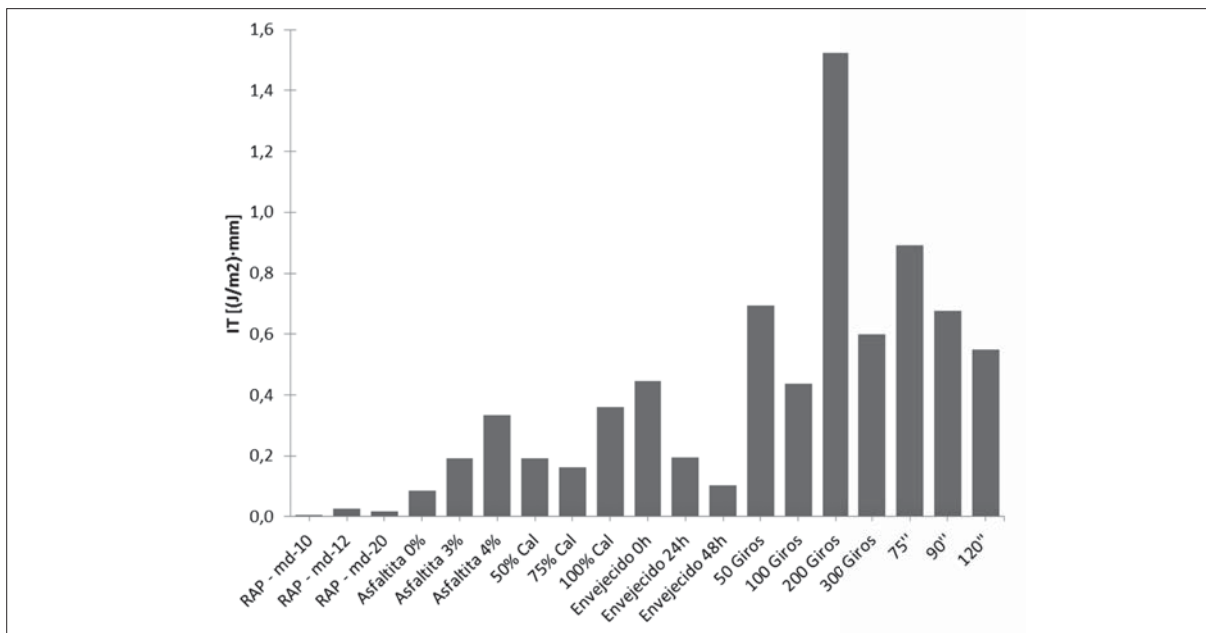


Figura 16. Índice de tenacidad de diferentes mezclas asfálticas

Fuente: elaboración propia.

REFERENCIAS

- AENOR-Asociación Española de Normalización y Certificación. (2007). *Normativa UNE-EN, Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras*. Madrid: AENOR.
- Arabandi, M. y Ferdowsi, B. (2009). Evaluating the Semi-Circular Bending test for HMA Mixtures. *Journal IJE Transactions A: Basics*, 22(1), pp. 47-58.
- Castillo, J. y Martínez, C. (2011). *Factibilidad del empleo de asfaltita proveniente del departamento de Boyacá en la fabricación de mezclas asfálticas*. Proyecto de grado, Univ. Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.
- IDU-Instituto de Desarrollo Urbano. (2011). *Especificaciones generales de materiales y construcción para proyectos de infraestructura vial y de espacio público de Bogotá*, Bogotá D.C., Colombia, (IDU).
- Invias- Instituto Nacional de Vías. (2007). *Especificaciones generales de construcción para carreteras*. Bogotá D.C., Colombia: Ed. Escuela colombiana de Ingeniería, (Invias).
- Lim, I., Jonston, W. y Choi, S. (1993). Stress Intensity Factors for Semi-Circular Specimens under Three-Point Bending. *Journal Engineering Fracture Mechanics*, 44(3), 363-382.
- Liu, X. y Marasteanu, M. (2010). Using Semi Circular Bending Test to Evaluate Low Temperature Fracture Resistance for Asphalt Concrete. *Journal Society for Experimental Mechanics, Minneapolis*, 50(7), 867-876.
- Londoño, A. (2012). *Incidencia de los agregados de la granulometría y del tipo de asfalto en las propiedades mecánicas y dinámicas de las mezclas asfálticas*. Proyecto de grado, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.
- Molenaar, A., Scarpas, A., Liu, X. y Erkens, S. (2002). Semi-Circular Bending Test; Simple but Useful? *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 71, 795-815.
- Molenaar, J., Liu, X. y Molenaar, A. (2003). *Resistance to crack-growth and fracture of asphalt mixture*, Sixth International RILEM Symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials, Zurich, pp. 618-625.
- Ostos, L., Duarte, J. y Reyes-Ortiz, O. (2011). Comportamiento de mezclas asfálticas de Instituto de Desarrollo Urbano con adición de pavimento reciclado. (RAP). *SCIVI Jornadas de Pavimentos y Mantenimiento Vial*, Bogotá D.C. Colombia.
- Papagiannakis, A. y Masad, E. (2008). *Pavement Design and Materials*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Pérez, F., Cepeda, J. y Miró, R. (2001). *Análisis del Comportamiento a Fatiga de las Mezclas Bituminosas. Relación entre Tenacidad y Resistencia a la Fatiga*. Laboratorio de Caminos, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Prapoorna, K., Said, S. and Hakim, H. (2012). Asphalt Mixtures' Crack Propagation Assessment using Semi-Circular Bending Tests. *International Journal of pavement research and technology, Jhongli*, 5(4), 209-217.

Valdés, G. (2011). *Evaluación del proceso de fisuración mezclas bituminosas mediante el desarrollo de un nuevo ensayo experimental: Ensayo Fénix*. Tesis Doctoral. Prog. ITT. Univ. Cataluña, Barcelona, Cataluña.

Valdés, G., Pérez, F. y Botella, R. (2009). Ensayo fénix, una nueva metodología para medir la resistencia a la fisuración en mezclas asfálticas. *Revista de la construcción*. Pontificia Universidad Católica de Chile, 8(1), 114-125.

Análisis de la influencia de El Niño y La Niña en la oferta hídrica mensual de la cuenca del río Cali

El niño and la niña analysis influence in the monthly water supply at Cali River basin

ÁLVARO JAVIER ÁVILA DÍAZ

Ingeniero Agrícola, Universidad del Valle. Investigador del Grupo de Investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos y Suelos, IREHISA. Cali, Colombia.

Contacto: alvaro.avila@correounivalle.edu.co

YESID CARVAJAL ESCOBAR

Ingeniero Agrícola. Doctor en Ingeniería. Profesor Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente. Universidad del Valle. Director del Grupo de Investigación Ingeniería de Recursos Hídricos y Suelos, IREHISA. Cali, Colombia.

Contacto: yesid.carvajal@correounivalle.edu.co

SERGIO ENRIQUE GUTIÉRREZ SERNA

Ingeniero Agrícola, Universidad del Valle. Investigador del Grupo de Investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos y Suelos, IREHISA. Cali, Colombia.

Contacto: serguti@univalle.edu.co

Fecha de recepción: 7 de marzo de 2013

Clasificación del artículo: investigación

Fecha de aceptación: 23 de noviembre de 2013

Financiamiento: Universidad del Valle

Palabras clave: cambio climático, cuenca río Cali, fenómeno ENOS, oferta hídrica, variabilidad climática.

Key words: Cali river basin, climate change, climate variability, ENSO Phenomenon, offer water.

RESUMEN

El aumento en la frecuencia de eventos hidrometeorológicos extremos, asociados a la varia-

bilidad climática o al cambio climático, se ha convertido en el principal problema ambiental del siglo XXI al hacer más vulnerables las sociedades humanas. En el trópico, la variabilidad

climática interactúa con el cambio climático, haciendo difícil distinguir entre sus respectivos impactos dada la fuerte influencia de la primera en las condiciones normales del clima. El objetivo de la investigación consistió en analizar la oferta hídrica mensual en la cuenca del río Cali durante la ocurrencia de eventos extremos asociados al ENOS (El Niño Oscilación del Sur), donde se estudiaron los efectos de este fenómeno en la oferta hídrica de la cuenca, y se establecieron correlaciones significativas de variables asociadas a ENOS (MEI, ONI, SOI, T NIÑO 3-4) con las precipitaciones mensuales y el caudal de sus principales afluentes. Se concluye que la oferta hídrica decrece en un 40 % en épocas del fenómeno El Niño y aumenta su disponibilidad hasta un 65 % en épocas del fenómeno La Niña. Los resultados obtenidos aportan adelantos en los estudios hidrometeorológicos, con el fin de reducir la incertidumbre al riesgo de sequías e inundaciones que generalmente ocurren durante las fases extremas del ENOS.

* * *

INTRODUCCIÓN

Según Bedoya *et al.* (2010), es posible que en algunas regiones, sobre todo en países ecuatoriales, los efectos relacionados a la variabilidad climática (VC) predominan sobre los del cambio climático (CC). Los países situados en la zona ecuatorial, como Colombia, están bajo la influencia de la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT), franja donde se encuentran los vientos alisios procedentes del norte y noreste del hemisferio norte y los vientos del sur y sureste del hemisferio sur, que afectan las condiciones climáticas del país (Hurtado, 2010). Estas alteraciones afectan directamente las actividades agrícolas, pecuarias y pesqueras, así como la producción y sustentabilidad económica de la región (Bernal, 2010).

ABSTRACT

The frequency of hydrometeorological extreme events associated with Climate Variability and / or climate change is increasing, making human societies more vulnerable, so is becoming a critical environmental issue of the 21st century. In tropics, climate variability interacts with climate change, making especially difficult to distinguish among their respective impacts, due to the strong influence of the first in the current climate conditions. The impacts of ENSO (El Niño Southern Oscillation) on water availability of the Cali River Basin were analyzed. Significant correlations among variables associated with ENSO (MEI, ONI, SOI, T NIÑO 3-4) and monthly rainfall in the basin, and flow of main tributaries rivers were obtained. We conclude that the water supply decreased about 40 % during periods of “El Niño” and increased is availability to 65 % on La Niña periods. The Results will provide advances in hydrometeorological studies, in order to reduce uncertainty of the risk of droughts and floods that usually occur during the ENSO extreme phases.

En Colombia, la variabilidad climática y el cambio climático ocasionan frecuentes anomalías en la precipitación que impactan fuertemente la sociedad y los sectores productivos (Sedano, 2012; Carvajal, 2012), debido principalmente a sequías e inundaciones (Quintero *et al.*, 2012). Estas anomalías dinamizan el ciclo hidrológico en la región principalmente por dos factores: 1) hay una mayor radiación solar, causada por su ubicación en la zona ecuatorial, y 2) existe una fuerza activa de gravedad en la región, debido a que la cordillera de los Andes se divide en tres al ingresar al país. Teniendo en cuenta que según el DANE (2011), el índice de pobreza supera el 46 % en las ciudades y 65 % en el campo, estamos ante una situación crítica de vulnerabilidad, que implica la necesidad de abordar la influencia de ENOS en la oferta hídrica del país. Adicionalmente, en el

2011 en Colombia se alcanzó un nivel de pobreza de 34,1 % según estudio realizado por el DANE (2011), situación que aumenta la vulnerabilidad a la ocurrencia de desastres y deja amplios sectores con baja capacidad de respuesta ante eventos catastróficos. Cabe destacar que en el país el impacto generado por la temporada de lluvias y a ENOS en la fase Niña durante el periodo 2010-2011 fue de 3.219.492 damnificados con un costo por daños totales que ascendió a US\$ 4870 millones (Gómez, 2011).

Conocer el porcentaje de reducción o aumento de la precipitación y el caudal que se presenta en la cuenca cuando ocurren las fases extremas de ENOS permite avanzar hacia un mejor conocimiento del comportamiento de la oferta hídrica de la cuenca. La fase fría de ENOS (La Niña), en Colombia, se caracteriza por la ocurrencia de eventos de precipitaciones intensas, crecidas de ríos, avalanchas e inundaciones de planicies (Poveda, 2004), las cuales tienen repercusiones sobre el manejo del recurso hídrico y la sociedad. Por su parte, durante la fase cálida (El Niño) ocurren sequías, incendios forestales, racionamientos de energía, etc. Estudios recientes (Guarín y Ochoa, 2011; Poveda y Sánchez, 2006) se han centrado en analizar los impactos sobre posibles cambios futuros o proyecciones en las temperaturas, precipitaciones y caudales de los ríos como consecuencia de la VC influenciada por el CC; en estos estudios se resalta la importancia de vincular los resultados a la gestión actual del agua, en función de su déficit o exceso.

El presente trabajo enfatiza en el estudio de los regímenes de lluvia y de caudal relacionados con las fases extremas de ENOS que ocasionan alteraciones en los procesos naturales que conforman el ciclo hidrológico y están afectando la dinámica y la distribución espacio-temporal de la oferta hídrica en las diferentes regiones del país, tanto en cantidad como en calidad (Ideam, 2002). Este es el caso de la cuenca río Cali, donde se generan lluvias intensas y crecientes en los ríos, en épocas de La

Niña, que ocasionan inundaciones en la ciudad y afectan la calidad del agua del río para el abastecimiento en la ciudad; esto ocasiona interrupciones del suministro, debido a la contaminación física por las altas cargas de sedimento (Ávila, 2012).

El presente trabajo consistió en seleccionar variables macroclimáticas (VM) encargadas del monitoreo de ENOS en el océano Pacífico tropical para asociarlas con variables hidrometeorológicas en la cuenca de estudio a una escala temporal mensual; esto con el objetivo de determinar el grado de correlación temporal de las fases extremas del fenómeno ENOS y las variables de precipitación y caudal mensual. Se presenta una metodología adaptada que aporta a la estimación en la predicción de la hidrometeorología de cuencas torrenciales andinas, logrando una mayor aproximación al conocimiento científico más preciso de cómo el fenómeno impacta en el régimen hidrológico. De esta forma, los resultados aportan insumos para la adaptación frente a la VC y CC, en aras de definir estrategias para la gestión del recurso hídrico y mejorar la planificación y su uso sostenible y eficiente (Puertas y Carvajal, 2008; Martelo, 2003).

METODOLOGÍA

En el marco de este estudio se correlacionaron las variables macroclimáticas asociadas al fenómeno ENOS con las variables hidrometeorológicas de la cuenca río Cali y se analizó la influencia de El Niño y La Niña en la oferta hídrica mensual de la cuenca. A continuación se presenta el desarrollo metodológico.

Descripción de la zona de estudio

Al suroccidente colombiano, en el Valle del Cauca, se encuentra la cuenca hidrográfica del río Cali (figura 1), con un área de 215 km², la cual hace parte del Parque Natural Farallones de Cali, tercero más importante de los Andes ame-

ricanos por su alta biodiversidad y especies endémicas. Según Empresas Municipales de Cali (Emcali), el río Cali contribuye con el 20% del suministro de agua que toma Santiago de Cali. Tiene una capacidad de producción de 1,8 m³/s que surte de agua potable aproximadamente a 500.000 usuarios; adicionalmente, el río sirve como sistema de drenaje y es considerado patrimonio cultural, paisajístico y ornamental de la ciudad.

Red de medición e información hidrológica

En principio se seleccionaron las estaciones representativas de la zona de estudio (ver figura 1;

posteriormente se recopiló la información hidrometeorológica, que comprende un periodo común de registros entre 1973-2010 (precipitación mensual y caudal medio mensual), y cartográfica (modelo digital del terreno, red hídrica y entre otros). Esto con el objetivo de determinar las principales características fisiográficas, morfométricas e hidrológicas de la zona de estudio, tales como: elevación, tiempo de concentración y rezago, precipitación media, pendiente media, entre otros parámetros e índices que permiten inferir el comportamiento del régimen hidrológico del área de estudio. Cabe destacar que la información fue suministrada por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC).

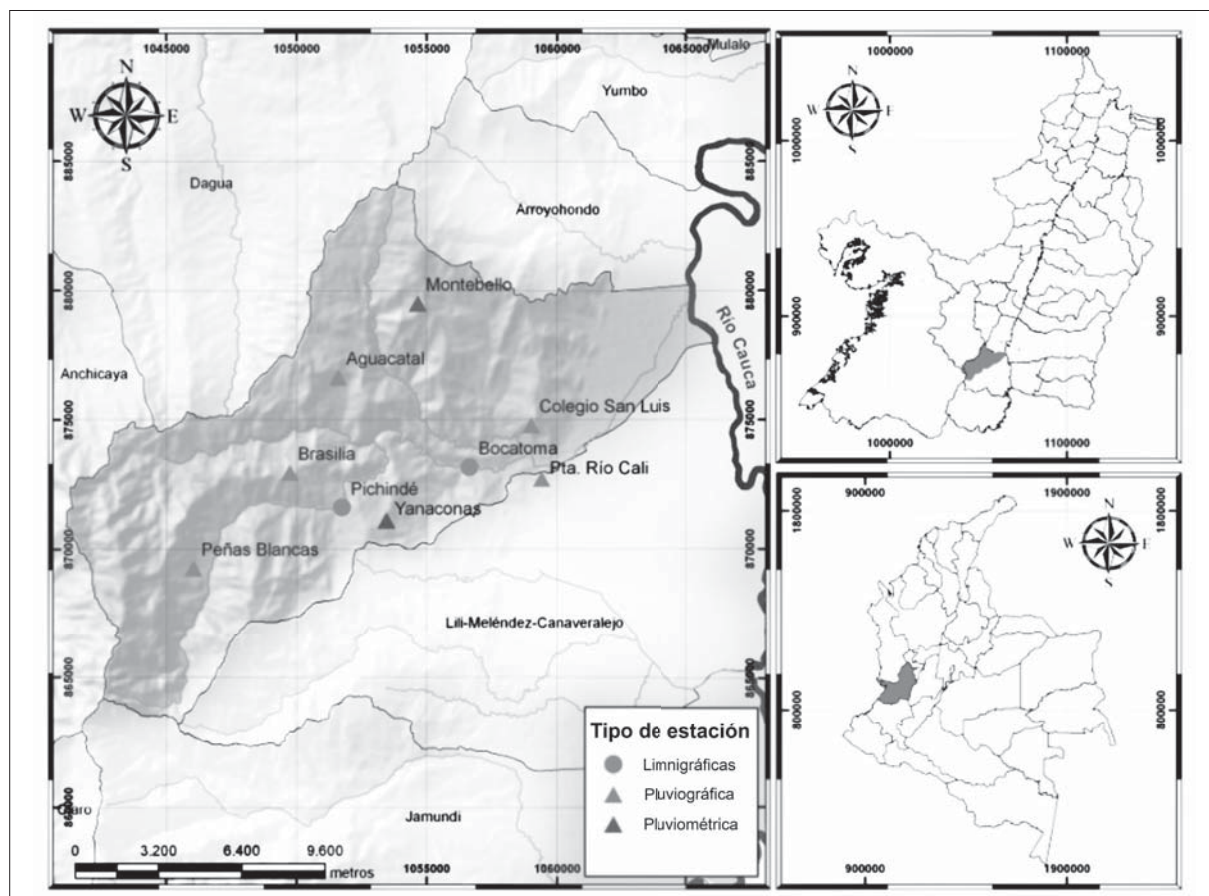


Figura 1. Ubicación de la cuenca hidrográfica del río Cali y localización de las estaciones hidrometeorológicas

Fuente: grupo IREHISA.

Se cuantificaron los datos faltantes de cada estación pluviométrica con el fin de seleccionar aquellas que tienen un porcentaje de datos faltantes menor al 10% del total. Para las estaciones hidrométricas, estos se calcularon aplicando regresiones lineales entre los datos mensuales de las estaciones limnigráficas; posteriormente se realizó su estimación, utilizando el método racional deductivo propuesto por Guevara, que permite completar en las series de precipitación hasta un máximo de once datos faltantes por año (Guevara, 2003), apoyándose en la información que brindan los periodos con información completa de la red hidrometeorológica seleccionada. Cabe resaltar que la CVC tiene una extensa toma de datos en la zona de estudio que supera los 30 años de toma de registro, periodo idóneo para trabajar con series de datos climáticos (Castro y Carvajal, 2010).

El estudio de homogeneidad de series hidrológicas es un aspecto fundamental en el análisis hidrológico, por lo que es necesario tener en este tipo de estudios conocimiento inicial del comportamiento de la información. Se realizó el Análisis Exploratorio de Datos (AED) que estuvo compuesto de dos partes: (I) análisis gráfico (gráfica de serie de tiempo, diagrama de cajas, histogramas, gráfica de normalidad), y (II) análisis confirmatorio, por medio de pruebas estadísticas paramétricas y no paramétricas siguiendo la metodología propuesta en Castro y Carvajal (2010).

Análisis de anomalías estandarizadas

Para conocer cuánto aumentaron o disminuyeron las precipitaciones y los caudales medios mensuales en la cuenca, ante la ocurrencia de un evento extremo asociado a ENOS, se determinaron los periodos en los cuales ocurrieron dichos eventos (El Niño y La Niña); luego se hizo uso de la ecuación (1) para calcular las anomalías promedio de las variables precipitación y caudal mensual, estimando estadísticos de la media durante

los eventos de El Niño y La Niña, con respecto a años normales (noENOS).

$$Anomalia\ X_i EN_{mese\ i} = \left(\frac{X_i\ El\ Niño\ mes\ i - X_i\ medio\ Normal\ mes\ i}{X_i\ medio\ Normal\ mes\ i} \right) * 100 \quad (1)$$

Correlación entre variables macroclimáticas asociadas al fenómeno El Niño Oscilación del Sur y variables hidrometeorológicas de la cuenca río Cali

Es importante resaltar que la intensidad de la fase extrema del fenómeno ENOS depende de la magnitud de las anomalías en las variables monitoreadas de dicho fenómeno, tanto en el océano como en la atmósfera. Esta intensidad, aunque influye en la formación de eventos extremos en determinadas regiones, es diferente de la magnitud y del impacto producido sobre las actividades humanas (Sedano, 2012). Teniendo en cuenta que el país está regido en la zona andina por un comportamiento bimodal de lluvias, con dos periodos húmedos y dos periodos secos durante el año, el efecto de las fases extremas en la región depende de la época del año y de las diferentes condiciones de vulnerabilidad de los sectores productivos (Inzunza, 2001).

Las VM asociadas al fenómeno ENOS que se usaron en este estudio se seleccionaron teniendo en cuenta la ubicación donde es registrada la información, la vigencia de funcionamiento y la relación de estas variables con la hidrometeorología de la zona de estudio. Para esto se siguió la metodología usada en Puertas y Carvajal (2008), en la cual se hace un estudio de la incidencia de ENOS en la precipitación y la temperatura del aire en Colombia. Para el presente caso de estudio se hace énfasis sobre las variables hidrometeorológicas correlacionándolas con las VM que se explican a continuación:

(I) La temperatura en la superficie del mar (TSM), definida como la anomalía mensual de esta variable en cuatro sectores del océano Pacífico alrededor de la línea ecuatorial, denominadas en orden

de este a oeste: NIÑO 4, NIÑO 3-4, NIÑO 3, NIÑO 1+2. Un índice de TSM alto (positivo) indica la ocurrencia de El Niño (fase cálida), pero para este estudio solo se usó la temperatura en la región NIÑO 3-4, que según estudios realizados (Bedoya *et al.*, 2010; Puertas y Carvajal, 2008; Paredes y Guevara, 2010; Poveda *et al.*, 2002; Carvajal, 2004), indican que de todas las regiones en el Pacífico tropical donde se mide la temperatura del océano Pacífico, esta es la que mejor correlación presenta con la hidroclimatología colombiana. (II) El índice de oscilación del sur (SOI), que se define como la diferencia de las anomalías mensuales de presión atmosférica estandarizadas entre un centro de alta presión en Tahití (17° S, 150° O) y un centro de baja presión cerca de Darwin (12° S, 131° E); la fase cálida de ENOS está asociada a un SOI negativo. (III) El índice multivariado de ENOS (MEI), que relaciona las principales variables en el océano Pacífico: presión a nivel del mar, componentes zonal y meridional de los vientos de superficie, temperatura de la superficie del océano, temperatura del aire en la superficie y nubosidad; valores positivos del MEI se relacionan con El Niño (Puertas y Carvajal, 2008). (IV). El índice oceánico de El Niño (ONI) que es el resultado de la media móvil de tres puntos de la serie mensual de anomalías de la temperatura de la superficie del océano en la región Niño 3-4. Valores positivos del ONI, mayores o iguales a 0,5 por 5 meses consecutivos o más indican la ocurrencia del evento El Niño. Valores negativos del ONI, inferiores o iguales a -0,5 por cinco meses consecutivos o más indican la ocurrencia del evento La Niña (Guarín y Ochoa, 2011).

El análisis de correlación cruzada es usado para medir el grado de asociación lineal entre dos variables, y se refiere al grado de variación conjunta que existe entre las variables relacionadas (Carvajal *et al.*, 2007). En el estudio se estimaron coeficientes de correlación de Pearson (r), por ser el más utilizado para estudiar el grado de relación lineal que existe entre variables cuantitativas (Puertas y Carvajal, 2008), relacionando las VM

asociadas a ENOS con las variables de precipitación y caudal en la cuenca.

Para determinar si los coeficientes de correlación obtenidos tienen un valor estadísticamente significativo, se determinó el valor de significancia de los resultados con la probabilidad (p) de obtener un valor para el estadístico tan extremo como el realmente observado, si la hipótesis nula fuera cierta; para este caso de estudio, se rechazó la hipótesis nula de independencia lineal, es decir, la hipótesis de que el coeficiente de correlación vale cero en la población, y se determinó que existe relación lineal significativa cuando el nivel crítico p fue menor que el nivel de significancia establecido en 5 % (Puertas y Carvajal, 2008).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se determinó por medio del análisis exploratorio de datos, y se realizó con el objetivo de determinar la calidad de la información hidrometeorológica de las series históricas anuales de precipitación y caudal que se utilizaron en el estudio. En la tabla 1 se presentan los resultados del AED.

En la tabla 1 se observa que la proporción de datos faltantes es menor que 10 % para las series hidrometeorológicas analizadas y que el resultados del AED indica que ninguna de las estaciones debe ser excluida del estudio.

Análisis de las series de precipitación y caudal

La precipitación media anual multianual del periodo de estudio es de 2042 mm y oscila entre 3600 mm y 1200 mm en las partes alta y baja respectivamente, presentando un comportamiento bimodal temporal. Existe una estrecha relación entre los regímenes hidrológicos y climatológicos; sin embargo, los meses de mayores lluvias no coinciden con los del caudal, presentándose el

desfase de un mes; esto debido a que después de un periodo seco las precipitaciones iniciales recargan la matriz del suelo, reportando caudales mayores un mes después. Por otro lado, al final de un periodo húmedo el caudal medio mensual desciende significativamente, cuando la reserva hídrica del suelo comienza a agotarse. Se determinó de acuerdo con los resultados que el caudal medio anual del río Cali es de 3,7 m³/s, con valores máximos instantáneos que oscilan entre 0,2 m³/s en fuertes estiajes y 193 m³/s en periodos de lluvias intensas, generalmente asociados a El Niño y La Niña, respectivamente.

Por otra parte, se observó que el año hidrológico no coincide necesariamente con el año sidéreo, es decir, el periodo que convencionalmente transcurre entre el 1 de enero y el 31 de diciembre de un mismo año (Bedoya *et al.*, 2010). El año hidrológico se estableció de junio a mayo, para intentar reflejar adecuadamente el comportamiento de las variables climáticas involucradas sobre la cuenca del río Cali (ver figura 2).

Tabla 1. Resultados del análisis exploratorio de datos para las estaciones analizadas

Variable Climática	Estación	Proporción datos Faltantes (%)	Análisis gráfico	Análisis cuantitativo	Resultados AED
Precipitación (mm)	Brasilia	1,26	A	A	A
	Peñas Blancas	1,77	A	A	A
	Yanaconas	7,81	A	A	A
	Montebello	1,11	A	A	A
	San Luis	4,35	R	A	A
	Planta Río Cali	1,84	A	A	A
Caudal (m ³ /s)	Pichindé	8,71	A	A	A
	Bocatoma	9,44	A	A	A

*A: Aprueba, R: Rechaza.

Fuente: elaboración propia.

Análisis de la incidencia dl ENOS en las anomalías de precipitación (mm) y caudal (m³/s)

De acuerdo con los resultados, en la fase La Niña los incrementos promedios son elevados para los registros de precipitación anual en los periodos de 1973-1974 y 1975-1976 con valores de 28 y 25 % por encima de la media respectivamente. Para la temporada de lluvias comprendida entre 2010-2011, la única estación que contaba con datos al momento del estudio fue la estación Peñas Blancas, que presentó un incremento del 38 % con respecto a su media anual del año hidrológico (MAH) en sus registros históricos; en el resto de años hidrológicos no hay un incremento notable en la anomalía de precipitación (figura 2). El caudal presenta anomalías en los periodos de la fase fría La Niña de: 1973-1974, 1975-1976, 1988-1889 y 2010-2011, con incrementos promedio de 41, 64,24 y 65 % respecto al valor de la media MAH. Adicionalmente, se encontró que para el último periodo 2010-2011 se presentó La Niña más fuerte en los últimos 38 años, ya que ocurrieron los caudales medios más altos registrados, con un incremento del 65 % de la anomalía de caudal con respecto a la MAH (figura 3).

En relación con los resultados en la fase cálida El Niño, las consecuencias en los registros de las variables analizadas no fueron tan evidentes, ya que el cambio no es significativo con respecto al decremento de la MAH, excepto para dos periodos: (I) 1976-1977, que presentaron una disminución promedio de precipitación y caudal de 39 y 25 % y (II) 1991-1992, que representó una disminución promedio de 34 y 38 % para la precipitación y caudal anual respectivamente.

Análisis de la correlación entre variables macroclimáticas asociadas al ENOS y las hidrometeorológicas (precipitación y caudal)

Los extremos del ENOS (El Niño y La Niña) afectan el clima del territorio nacional y tienen efectos,

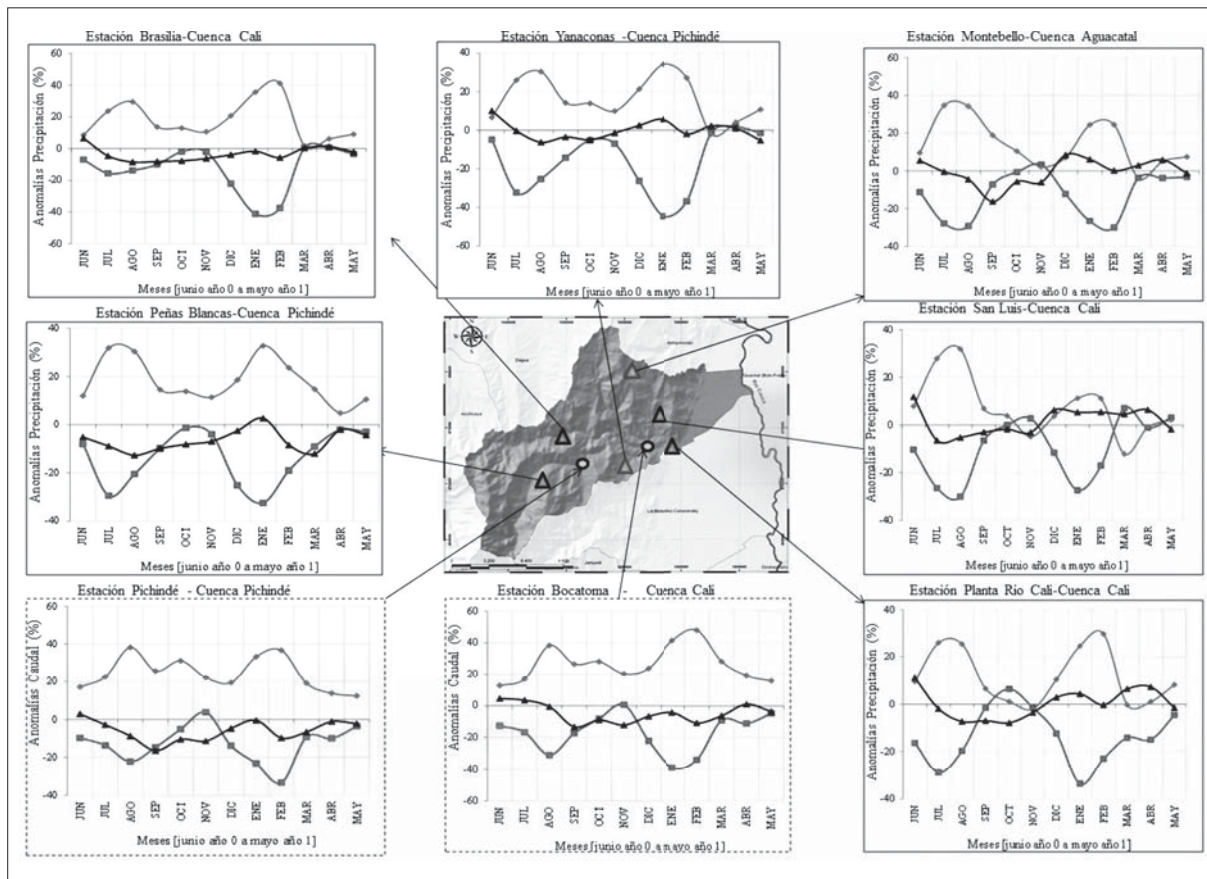


Figura 2. Porcentaje de anomalías de precipitación y caudal mensual (estaciones Pichindé y Bocatoma)

Fuente: elaboración propia.

en particular, sobre la magnitud y los componentes del ciclo hidrológico (Bedoya, *et al.*, 2010). En la distribución espacial de las estaciones en la cuenca del río Cali, se observó (figura 3) que los efectos del ENOS sobre la precipitación se presentan con mayor intensidad al occidente y centro (estaciones La Teresita, Brasilia y Peñas Blancas, con un r promedio de $-0,18$; $-0,17$ y $-0,16$ respectivamente) que al oriente de la cuenca (estaciones Planta Río Cali, Montebello y San Luis, con un r promedio de $-0,14$; $-0,12$; $-0,10$, respectivamente), teniendo en cuenta que los resultados de las correlaciones presentadas obtuvieron un valor de significancia menor de $0,000$; esto reafirma los resultados obtenidos por Poveda *et al.* (2002), en los que se menciona que espacialmen-

te la correlación entre los índices representativos del ENOS y la hidrometeorología es menor en el oriente colombiano. También se observó (tabla 2) que los rezagos entre -1 y 1 mes presentaron mejores correlaciones con las VM, con excepción del ONI, donde las mejores correlaciones se presentaron con un rezago anticipado de -3 meses.

En general, las correlaciones de las estaciones pluviográficas involucradas en el estudio presentaron un comportamiento similar, donde el punto máximo de la curvatura se observó en los rezagos entre -1 y 0 meses, (r entre $-0,24$ para el índice Niño 3-4, y $-0,31$ para el índice MEI); valores que después de este punto presentaron tendencia a cero como se observa en la figura 5. En el

investigación

caso de las estaciones limnigráficas, el comportamiento de la gráfica presenta mayor uniformidad con su máximo valor entre los rezagos 0 y 1 mes ($r=-0,44$), cuyo valor de coeficiente es mayor en comparación con las precipitaciones donde el coeficiente máximo fue de $r=-0,31$ (tabla 2). Esto indica que el comportamiento de los caudales en la cuenca está mayormente influenciado por el fenómeno ENOS que la precipitación; cabe resaltar que todos los datos que se graficaron y se presentaron en las tablas, fueron los que presentaron

mayor valor de r y un p menor a 5 % lo que quiere decir que son estadísticamente significativos.

Las correlaciones obtenidas con la precipitación y caudal en la cuenca del río Cali muestran relaciones inversas con la TSM (Región Niño 3-4), el NOI y el MEI, y proporcional con el SOI; es decir, cuando la temperatura del océano Pacífico aumenta, se reducen las precipitaciones en la región, y cuando el gradiente de presiones en la atmósfera aumenta, las precipitaciones también

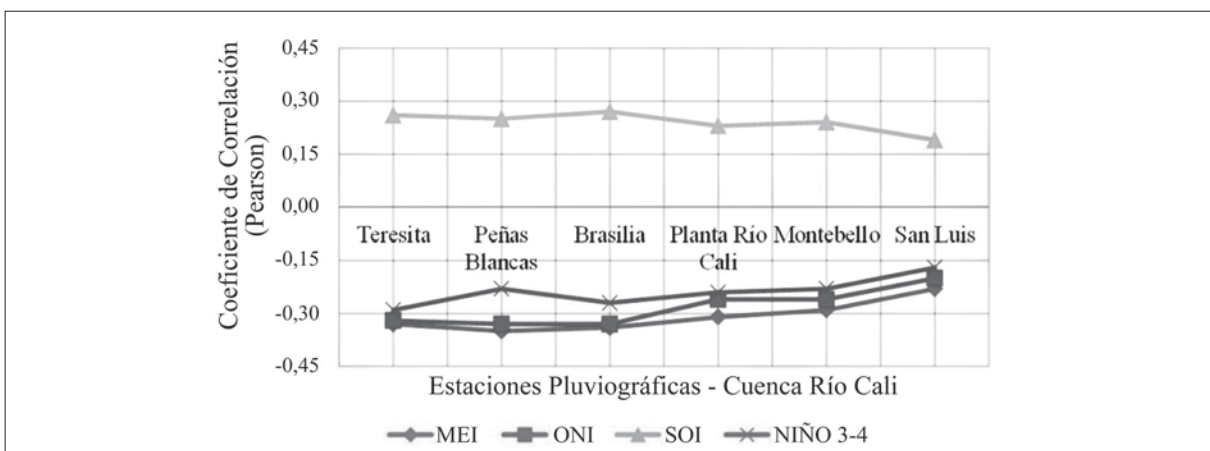


Figura 3. Relación VM del ENOS, con las estaciones pluviográficas de la cuenca del río Cali

Fuente: elaboración propia.

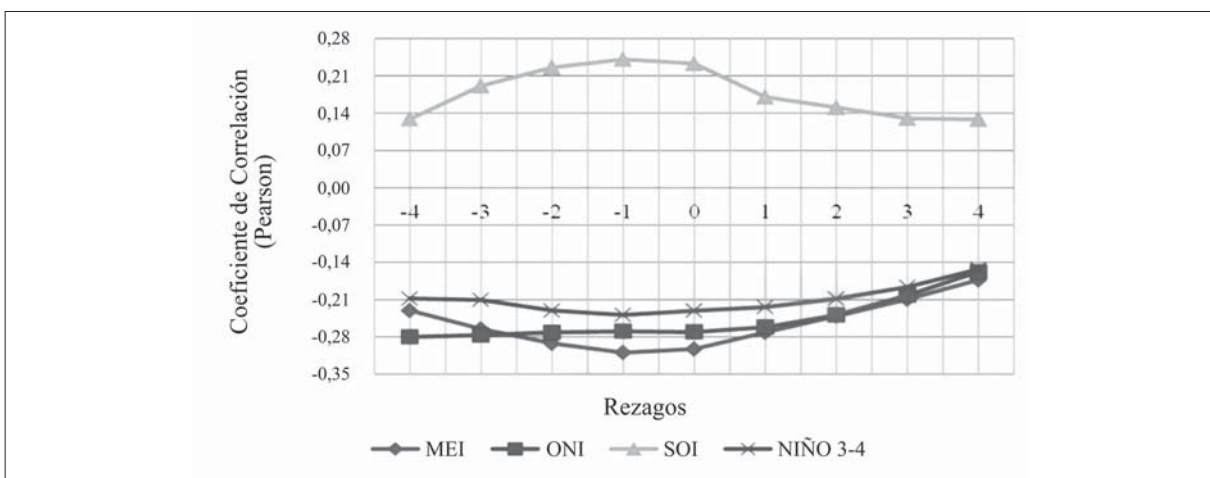


Figura 4. Comportamiento de los coeficientes de correlación (Pearson) vs. Rezago mensual (precipitación)

Fuente: elaboración propia.

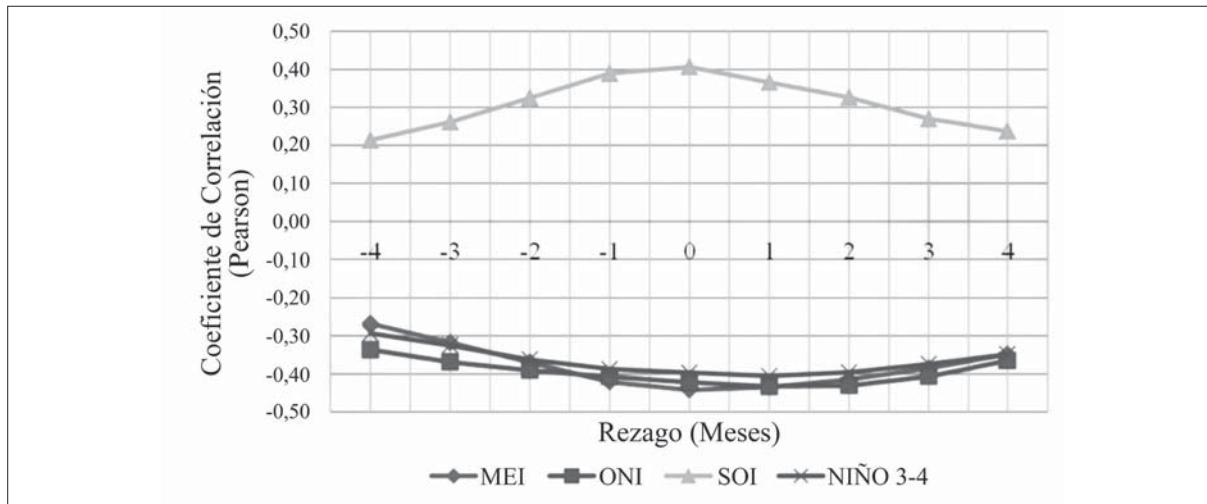


Figura 5. Comportamiento de los coeficientes de correlación (Pearson) vs. Rezago mensual (caudal)

Fuente: elaboración propia.

lo hacen, lo cual se puede asociar a una posible reducción de viento húmedo hacia el territorio colombiano (Carvajal, 2004).

La tabla 2 muestra el promedio de los coeficientes de correlación Pearson encontrados, donde los mayores valores se obtuvieron con el índice MEI. Lo anterior se atribuye al mayor número de variables que esta reúne, lo que concuerda con otros estudios (Guarín y Ochoa, 2011; Carvajal, 2004; Gutiérrez, 2013), en los que la duración y magnitud de los eventos hidrológicos extremos en las cuencas del país se ven fuertemente influenciadas por las fases extremas de ENOS (Bedoya *et al.*, 2010). La variable MEI es la VM que mayor uniformidad presentó; con respecto a los valores de r , su comportamiento viene de menor a mayor hasta el rezago 0, y luego va disminuyendo conforme van aumentando los rezagos (figura 4 y 5).

La diferencia o igualdad de signos entre los coeficientes de correlación indica la relación inversa (-) o directa (+) que existe entre las variables. Los coeficientes de temperatura sobre la superficie del océano Pacífico son de signo opuesto a los coeficientes obtenidos para las estaciones de precipitación; esto indica que un incremento de la temperatura en el océano Pacífico está asociado

Tabla 2. Mejores correlaciones promedio entre las VM asociadas al ENOS y las variables hidrometeorológicas.

Variables Macroclimáticas del ENOS	R* [Precipitación]	Rezago** [Meses]	p***	R* [Caudal]	Rezago** [Meses]	p***
MEI	-0,31	-1	0,000	-0,44	0	0,000
ONI	-0,28	-3	0,000	-0,43	1	0,000
SOI	0,24	-1	0,000	0,41	0	0,000
NIÑO 3-4	-0,24	-1	0,000	-0,41	1	0,000

* R: Coeficiente de Correlación de Pearson (promedio). ** Rezago positivo: encabeza la variable de ENOS y viceversa. *** p: Significancia estadística del 5% ($p < 0,05$).

Fuente: elaboración propia.

con una disminución de la precipitación en la zona de estudio. La explicación física de este proceso se relaciona con la alteración del gradiente de temperaturas del océano Pacífico entre las costas de Colombia y Perú que influye en la hidrometeorología de la zona, perturbando la advección de aire frío y húmedo del océano Pacífico hacia el interior de Colombia. Así mismo, los eventos

hidrológicos extremos generan una retroalimentación positiva sobre sí mismos: condiciones de sequía por un forzamiento de mesoescala producen disminución de la precipitación, y por tanto, disminución de la humedad del suelo, que a su vez reduce la evapotranspiración, lo que ocasiona una menor disponibilidad de humedad para la convección atmosférica, lo que produciría lluvias convectivas (Castro y Carvajal, 2010). Lo anterior también es válido para periodos muy lluviosos asociados a La Niña.

Aunque las estaciones limnigráficas de la cuenca se encuentran distanciadas geográficamente, se observó un comportamiento similar en el valor de las correlaciones entre las estaciones, con su máximo valor en los rezagos -1 y 0 meses, en relación a las variables asociadas al ENOS. Se encontró que las variables MEI y SOI tienen más incidencia sobre los caudales de la estación del río Pichindé, a diferencia de la variable ONI que presenta mayor incidencia en los caudales de la estación Bocatoma; por su parte el índice NIÑO 3-4 se comporta similarmente sobre estas dos estaciones.

Se obtuvieron valores consistentes con correlaciones cruzadas máximas que oscilaron entre -0,45 (Pichindé) y -0,44 (Bocatoma) a un rezago entre 0 y 1 mes con la hidrología de la región; las mayores correlaciones promedio en la variable caudal se obtuvieron para el MEI con un coeficiente de correlación de -0,44 a 0 meses de rezago, seguido por el ONI con -0,43 a 1 mes de rezago.

Las correlaciones entre las VM y los caudales fueron mayores que las obtenidas con las precipitaciones; esto se debe en parte a que los caudales en las cuencas presentan una mayor persistencia significativa, debido al proceso de almacenaje de agua en los acuíferos o a las condiciones de humedad antecedente en el suelo, que aportan una mayor memoria histórica en las series de caudal. Una de las razones por la que los niveles de correlación no tiene un valor alto, es porque los fenómenos de VC, que gobiernan el clima de Co-

lombia, están controlados en gran medida por la zona de confluencia intertropical, y por la dinámica de los océanos de las cuencas del Amazonas y el Orinoco. Lo anterior resulta en una compleja respuesta hidrológica que, entre otros aspectos, dificulta la construcción de escenarios de cambio climático que apoyen la toma de decisiones para determinar el comportamiento de los recursos hídricos ante presiones de VC y CC con bajos niveles de incertidumbre (García *et al.*, 2012).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La inclusión de las VM como variables auxiliares mejora el entendimiento de la hidrología de la cuenca. El comportamiento de los caudales en la cuenca está mayormente influenciado por el fenómeno el ENOS que las precipitaciones, lo que se ve reflejado en mayores valores de correlación sobre la variable caudal ($r=-0,44$) que los de la variable precipitación ($r=-0,31$). Esta metodología puede ser utilizada para la predicción de eventos extremos en el estudio de la variabilidad climática para entender las relaciones de ENOS o fenómenos similares con la hidrología de la zona de estudio.

Las variables macroclimáticas ONI y MEI son las que tienen mayor incidencia sobre las variables hidrometeorológicas analizadas, con un coeficiente de correlación significativo entre el 24 y el 44 %, lo que es una aproximación a la estimación del porcentaje de influencia del fenómeno ENOS sobre las variables precipitación y caudal, determinando que la oferta hídrica en la zona de estudio decrece en un 40 % en épocas de la fase El Niño y aumenta su disponibilidad hasta un 65 % en épocas de La Niña.

La planificación y el manejo de recursos hídricos debe considerar el pronóstico o la ocurrencia de eventos asociados al ENOS. Igualmente las decisiones sobre gestión del recurso, asignación de cuotas de agua, manejo de crecientes, y aún en aspectos de salubridad y epidemias para los cuales

se tenga pronósticos o cuando se esté presentando el fenómeno ENOS.

Los meses en que se presentan mayores anomalías de caudal ocurren en coincidencia con los periodos de mayor estiaje en el ciclo anual, lo que hace más crítica la situación, dado que hace más notoria la reducción de los caudales del río Cali; esto debido a que sus valores oscilan entre 0,8 y -2,1 m³/s, y la fracción de agua extraída aguas arriba de las estaciones limnigráficas durante estos periodos es significativa comparada con la magnitud del caudal de estiaje. Por eso se recomienda que este aspecto sea considerado para la estimación del régimen de caudal ambiental que debe permanecer en el río, para no afectar los ecosistemas y servicios ambientales que presta a la comunidad.

FINANCIAMIENTO

Del proyecto titulado “Cuencas claves en Colombia para la implementación de la nueva política de la gestión integrada del recurso hídrico”, COL-CUENCAS, Ministerio de Ambiente y Desarrollo, Universidad del Valle, IDEAM y UNESCO-IHE, por el suministro a los recursos físicos y las condiciones locativas mínimas necesarias que garantizaron la adecuada ejecución de la investigación.

AGRADECIMIENTOS

Al grupo de Investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos y Suelos IREHISA de la Universidad del Valle, Cali, Colombia, por el apoyo a esta investigación y a la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca por el suministro de la información.

REFERENCIAS

- Ávila, A. (2012). *Simulación hidrológica utilizando HEC-HMS como herramienta para estimar caudales máximos en la cuenca hidrográfica del río Cali*. Tesis de Pregrado. Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería de los Recursos Naturales y del Ambiente, Universidad del Valle, Colombia.
- Bedoya, M., Contreras, C. y Ruiz, F. (2010). Capítulo 7. Alteraciones del régimen hidrológico y de la oferta hídrica por variabilidad y cambio climático. *Estudio Nacional del agua 2010*. Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), Colombia, pp. 282-320.
- Bernal, O. (2010). *Uso del pronóstico en el sector agropecuario*. Trabajo presentado en el I congreso nacional del clima 2010 “El desarrollo económico de Colombia bajo un nuevo escenario climático”. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Bogotá, julio 13 a 15 de 2010.
- Carvajal, Y. (2004). *El uso de funciones ortogonales empíricas y análisis de correlación canónica en el estudio de la variabilidad hidrometeorológica, aplicación al Valle del Cauca-Colombia*. Tesis de Doctorado. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia, España, 2004.
- Carvajal, Y., Correa, G., Muñoz, F. (2007). *Modelos de predicción de caudal utilizando variables macroclimáticas y técnicas estadísticas multivariadas en el Valle del río Cauca*. Escuela EIDENAR, Universidad del Valle, Colombia, 6, 67-81.

- Carvajal, Y. (2012). Inundaciones en Colombia. ¿Estamos preparados para enfrentar la variabilidad y el cambio climático? *Revista Memorias*, 9(16), 105-119.
- Castro, M. y Carvajal, Y. (2010). Análisis de tendencia y homogeneidad de series climatológicas. *Revista Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, 9, 15-25.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE. (2011). *Boletín de prensa-pobreza monetaria y multidimensional en Colombia*. Recuperado de http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/%20condiciones_vida/pobreza/boletin_pobreza_2011.pdf.
- García, M., Piñeros, A., Bernal, F. y Ardila, E. (2012). Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia. *Revista de Ingeniería*, 36, 60-64.
- Gomez, H. (2011). *Foro por el Agua. Impactos y respuestas a la ola invernal 2010-2011. Retos para superar la vulnerabilidad a los fenómenos de origen natural en Colombia*. Departamento Nacional de Planeación. Bogotá D.C.
- Guarín, G. y Ochoa, A. (2011). *Impacto de la variabilidad climática en la producción de banano en el Urabá Antioqueño*. “Índices macroclimáticos, precipitación y producción en Urabá”. Tesis de Maestría. Ingeniería de Recursos Hídricos, Universidad Nacional de Colombia, Colombia.
- Guevara, J. (2003). *Métodos de estimación y ajuste de datos climáticos*. Imprenta Universidad Central de Venezuela, Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales, Dirección de Hidrología y Meteorología. Mérida, Venezuela.
- Gutiérrez, S. (2013). *Análisis de la influencia de el fenómeno ENOS “El Niño - Oscilación del Sur” en la oferta hídrica trimestral de la cuenca hidrográfica del río Dagua, Valle del Cauca*. Tesis de Pregrado. Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería de los Recursos Naturales y del Ambiente, Universidad del Valle, Colombia.
- Hurtado, G. (2010). *El clima: Origen y aplicaciones*. Trabajo presentado en el I congreso nacional del clima 2010 “El desarrollo económico de Colombia bajo un nuevo escenario climático”. Instituto de Hidrología, meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Bogotá, julio 13 a 15 de 2010.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia, IDEAM. (2002). *Efectos naturales y socioeconómicos del fenómeno el niño en Colombia*. Ministerio del medio Ambiente. Bogotá D.C., Colombia.
- Inzunza, J. (2001). Tema 7. Cambio Climático Global. *Pedagogía en Ciencias Naturales y Carreras de la infancia*. Universidad de Concepción. Chile. Recuperado de <http://www2.udec.cl/~jinzunza/infancia/tema7.pdf>
- Martelo, M. (2003). *Influencia de las variables macroclimáticas en el clima de Venezuela*. Dirección de hidrología, meteorología y oceanología – dirección general de cuencas hidrográficas – Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales. Caracas, Venezuela.
- Paredes, F. y Guevara, E. (2010). “Desarrollo y evaluación de un modelo para predecir sequías meteorológicas en los llanos de Venezuela”. *Revista Bioagro*, 1, 3-10.
- Poveda, G., Vélez, J., Mesa, O., Hoyos, C., Salazar, L., Mejía, J., Barco, O. y Correa, P. (2002). Influencia de fenómenos macroclimáticos sobre el ciclo anual de la hidrología colombiana: cuantificación lineal, no lineal y percentiles probabilísticos. *Meteorología Colombiana*, 6, 121-130.

- Poveda, G. (2004). “La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala interdecadal hasta la escala diurna”. *Revista Ciencias de la Tierra*, 28(107), pp. 201-221.
- Poveda G. y Sánchez, J. (2006). *Predicción de Caudales medios mensuales utilizando métodos espectrales y redes neuronales*. Trabajo presentado en el XVII Congreso Nacional de Hidráulica e Hidrología, Popayán, Colombia, septiembre 14 a 16 de 2006.
- Puertas, O. y Carvajal, Y. (2008). “Incidencia de El Niño Oscilación del Sur en la precipitación y la temperatura del aire en Colombia, utilizando el Climate Explorer”. *Revista Ingeniería y Desarrollo*, 23, pp. 104-118.
- Quintero, M., Carvajal, Y., Aldunce, P. (2012). “Variabilidad y el cambio climático: intersecciones con la gestión del riesgo”. *Revista Luna Azul*, 34, pp. 257-271.
- Sedano, K., Carvajal, Y., Ávila, A. (2012). “¿Cómo nos afecta el cambio climático en Colombia? Variabilidad climática, cambio climático y gestión integrada del riesgo de inundaciones en Colombia”. *Revista Semillas*, 46/47, pp. 47-53.
- Sedano, K. (2012). *Gestión integrada del riesgo de inundaciones en Colombia*. Tesis de Maestría. Departamento de ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia, España.

Modelos urbanos tridimensionales generados a partir de nubes de puntos de un escáner láser terrestre

Three-dimensional urban models generated from point clouds of a terrestrial laser scanner

HERNÁN PORRAS DÍAZ

Ingeniero Civil, doctor en Ingeniería Telemática. Docente e investigador de la Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.

Contacto: hporras@uis.edu.co

JHON JAIRO CÁCERES JIMÉNEZ

Ingeniero de Sistemas, doctor en Ingeniería Civil. Docente e investigador de la Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.

Contacto: jcaceres@uis.edu.co

ELVER OMAR GALLO LANCHEROS

Ingeniero de Sistemas, candidato a magíster en Ingeniería de Sistemas e Informática. Investigador de la Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.

Contacto: omga27@gmail.com

Fecha de recepción: 22 de noviembre de 2012

Clasificación del artículo: revisión

Fecha de aceptación: 23 de noviembre de 2013

Financiamiento: Universidad Industrial de Santander

Palabras clave: clasificación, escáner terrestre, modelo 3D, segmentación.

Key words: classification, model 3D, segmentation, terrestrial scanner.

RESUMEN

En este artículo se presenta una revisión del estado del arte de las diferentes metodologías que se han desarrollado para el tratamiento digital de nubes de puntos tridimensionales, recolec-

tadas mediante un escáner láser terrestre. Este instrumento tiene la capacidad de capturar información topográfica y geométrica de cualquier estructura con precisiones hasta el orden de los milímetros, y en algunos casos también captura

la información radiométrica de los objetos escaneados. Esta información recolectada se representa en forma de nubes de puntos que se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones como la planeación del crecimiento urbano, el análisis estructural de construcciones, el modelado de fenómenos de erosión y deforestación, la documentación de patrimonio histórico y la navegación virtual a través de los sitios turísticos mediante modelos tridimensionales de edificaciones. Por lo tanto, el propósito de este trabajo es proveer una revisión en el estado del conocimiento acerca de las técnicas desarrolladas en las diferentes fases que se llevan a cabo con el tratamiento de estas nubes de puntos, como el registro y georreferenciación, la segmentación, clasificación y modelado tridimensional.

* * *

INTRODUCCIÓN

El escaneo a través del láser surgió inicialmente como una respuesta al problema de cómo hacer mediciones sobre la superficie de la tierra con el fin de generar cartografía y modelos digitales de elevación de forma rápida y precisa. Estas mediciones empezaron a ser una realidad con el invento del primer instrumento llamado *Electronic Distance Measurement* (EDM) (Carter, 1973), el cual posteriormente dio paso a la técnica basada en la medición a través del láser. Con respecto al principio de operación del láser los escáneres se puede clasificar en los basados en tiempo de vuelo y en diferencia de fase, mientras que, con respecto a la plataforma donde se monta el dispositivo, existe el escáner láser aéreo (ALS), el terrestre (TLS) y recientemente el móvil (MLS). El ALS fue introducido comercialmente a comienzos de los años setenta (Fernández Díaz, 2007; Laefer, Truong Hongy Fitzgerald, 2011), con el fin de generar modelos digitales de elevación y de ciudades a gran escala. Posteriormente, a finales de los años noventa es lanzado comercialmente

ABSTRACT

The state of the art of the processing methods for TLS (terrestrial laser scanner) digital point clouds is shown in this paper. The TLS is an instrument able to capture topographic and geometric information of any structure at millimeter accuracy. Also, in some cases, they capture radiometric information of the scanned objects. The collected information is represented by point clouds that are used on a wide range of applications such as planning of urban development, structural analysis, erosion and deforestation modeling, cultural heritage preservation and virtual navigation. The purpose of this work is to offer a review of the state of the art on the methods used through the several steps of the point cloud processing workflow: relative and absolute registration, segmentation, classification and three dimensional modeling.

el TLS (Laefer *et al.*, 2011), con el fin de obtener mediciones con alta precisión de los elementos que conforman el mobiliario urbano. El ALS genera baja densidad de puntos, por lo tanto, es ideal para capturar información de grandes áreas en corto tiempo y con precisiones del orden de los centímetros; por su parte, el TLS es usado para capturar información de los objetos a corta distancia, lo que genera una alta cantidad de puntos con precisiones del orden de los milímetros.

La información recolectada por el escáner corresponde a un conjunto de puntos que representan las coordenadas XYZ de la superficie de cualquier objeto con respecto al sistema de referencia del escáner. Adicionalmente, varios de estos dispositivos también pueden capturar la información espectral del objeto, así como su porcentaje de reflectancia que comúnmente se le denomina “valor de intensidad del pulso”.

Una de las aplicaciones más importantes que se le ha dado a la nube de puntos generada por el TLS es la creación de modelos digitales tridimensionales

nales de los elementos que conforman un entorno urbano, tales como fachadas de edificios, puentes, vías y señales de tránsito, entre otros. Este artículo presenta una revisión general sobre las metodologías que algunos investigadores han llevado a cabo para la generación de modelos tridimensionales a partir de una nube de puntos. En la sección dos se muestra un estudio más detallado sobre las características y el funcionamiento del TLS. En la sección tres se presentan las técnicas que existen para llevar a cabo el procesamiento de la nube de puntos, como el registro, la georreferenciación, la segmentación, la clasificación y el modelado 3D. Finalmente, en la sección cuatro se exponen las conclusiones con respecto al estado del arte de la tecnología del escáner laser terrestre.

RECOLECCIÓN DE DATOS

Escáner láser terrestre (TLS)

Es un sistema basado en la tecnología láser que permite obtener una muestra de la superficie de un objeto de diferente forma y tamaño (Van Genchten, 2008; Bornaz y Rinaudo, 2004). El resultado es una nube de puntos con gran detalle en la geometría y con un alto grado de precisión, que se captura de una manera rápida y eficiente (Yan, Liy Xie, 2010). Estos instrumentos han sido ampliamente usados en la adquisición de información en las áreas urbanas, con el fin de generar modelos tridimensionales de las ciudades (Sithole y Vosselman, 2003; Vosselman y Dijkman, 2001). Así mismo, son utilizados en la planeación urbana, la navegación virtual de los sitios turísticos, el análisis del estado estructural de los edificios, la detección de posibles zonas de inundación mediante el análisis de la topografía del terreno, la evaluación y análisis de seguridad de vías y puentes, la documentación de áreas de desastre cuando el evento ya ha ocurrido, el registro de la escena del crimen para evitar alteraciones de las evidencias y el suministro de información para los mapas de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), entre otros (Van Genchten, 2008).

Principios de operación

El TLS está compuesto por dos subsistemas básicos: el primero es un dispositivo electrónico de emisión del rayo láser comúnmente llamado *Light Detection and Ranging* (LIDAR), y el segundo es un dispositivo mecánico y óptico capaz de dirigir el haz de láser en forma de escaneo sobre el área de interés (Fernández Díaz, 2007), como se muestra en la figura 1. Con respecto al principio de operación del láser, los dos tipos más comunes de escáneres son los de tiempo de vuelo (TOF), y los de diferencia de fase (PD) (Van Genchten, 2008; Fernández Díaz, 2007).

El tipo de escáner TOF calcula el tiempo transcurrido desde el momento en que sale el pulso del láser hasta que retorna; con este valor calcula la distancia del objetivo. La propiedad de pulso permite obtener una buena señal de retorno a pesar de que existan condiciones de ruido en el ambiente. Algunos escáneres comerciales basados en esta tecnología son: Optech ILRIS-3D (Optech, 2012), Leica ScanStation C10 (Leica, 2012a), Riegl (toda la gama) (Riegl, 2012), Trimble VX (Trimble, 2012a), Callidus CP3200 (Van Genchten, 2008), entre otros. El tipo de escáner PD calcula la distancia mediante la diferencia de fase entre las formas de las ondas enviadas y de las retornadas. El láser emitido por este tipo de escáner es continuo y de potencia modulada. Algunos escáneres comerciales disponibles basados en esta tecnología son:

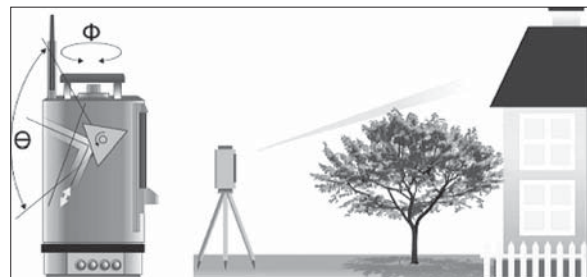







Figura 1. Subsistemas del escáner láser terrestre y modo de operación

Fuente: 3D Terrestrial Laser Scanner RIEGL VZ-400 / RIEGL VZ-1000 (2012).

Tabla 1. Características técnicas de los escáneres láser terrestre más comerciales actualmente

Escáner/ Características	RIEGL VZ 400	OPTECH ILRIS 3D	LeicaScanStationC10	TRIMBLE FX	FARO Focus 3D
Tipo de Láser	Tiempo de Vuelo(TOF)			Diferencia de Fase(PD)	
Mínimo Alcance	1,5 m	400 m	0,1 m	1,5 m	0,6 m
Máximo Alcance (con reflectancia)	600 m con 90 %	400 m con 80 %	300 m con 90 %	80 m con 50 %	120 m con 90 %
	280 m con 20 %	1.200 m con 10 %	134 m con 18 %	45 m con 30 %	
Precisión	3 mm	8 mm	2 mm	0,8 mm	0,95 mm
Exactitud	2 mm	4 mm	6 mm	2 mm	2 mm (25 m)
Cantidad de ptos/seg	422.000	2.500	50.000	216.000	976.000
Velocidad de Escaneo Vertical	100 kHz	10 kHz	50 kHz	190 kHz	976 kHz
Ángulo de Escaneo Vertical	60° (+30° / -30°)	40° (-20° / 20°)	370°	270°	305°
Ángulo de Escaneo Horizontal	360°	(-40° / 40°)	360°	360°	360°
Clase	Clase 1	Clase 1M	Clase 3R	Clase 3R	Clase 3R
Almacenamiento	SSD 80 GB	puerto USB	SSD 80 GB		SD, SDHC 32GB
Imagen					

Fuente: elaboración propia.

Z+F Imager 5010 (Z+F, 2012), Trimble FX (Trimble, 2012b), Leica HDS7000 (Leica, 2012b), Faro Focus 3D (Faro, 2012), entre otros.

Características técnicas

Actualmente existe en el mercado un amplio rango de TLS, donde cada uno posee especificaciones técnicas de acuerdo con la necesidad del usuario final, ver tabla 1. Las características técnicas más importantes que se deben tener en cuenta al momento de adquirir un TLS son: el alcance mínimo y el máximo que se mide en metros; la precisión, que hace referencia al grado de dispersión de un conjunto de mediciones sobre la media de ese valor; la exactitud, que es la cercanía de una medición respecto a su valor real; el campo de visión, que se expresa en grados y describe el ángulo de

barrido vertical que realiza el escáner; la clase de láser, que depende de su potencia y su longitud de onda y que indica el grado de peligro para el ojo humano basado en la exposición máxima permisible (MPE) al rayo; la velocidad de escaneo y la cantidad de puntos por segundo que es capaz de recolectar (Van Genchten, 2008; Fernández Díaz, 2007). Los tipos de escáner TOF tienen mayor alcance y velocidad de escaneo que los de tipo PD, mientras que estos últimos poseen mayor precisión y recolectan más cantidad de puntos por escaneo que los escáneres basados en TOF.

PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

El resultado del escaneo a través del TLS es un conjunto de puntos generalmente llamado “nube de puntos”, cuya definición fue propuesta por el

Dr. Jon Mills y David Barberen en 2003, “la nube de puntos es un conjunto de coordenadas XYZ en un sistema de referencia común, que le muestra al espectador una comprensión de la distribución espacial de un objeto en el sitio. También se puede incluir información adicional como un valor de intensidad o un valor RGB” (Reshetyuk, 2009, p.4).

El formato en que se almacena la nube de puntos depende del *software* del fabricante; algunos formatos solo contienen la información de las coordenadas XYZ del punto, mientras que otros, además de las coordenadas, contienen otro tipo de información como el porcentaje de intensidad del pulso láser, el valor del vector normal de cada punto y la posición del escáner, entre otros. Los formatos más comunes para el almacenamiento de nube de puntos son: XYZ, PTX, PTS, XYZRGB, LAS y FLS.

Para la generación de modelos tridimensionales a partir de los datos de un TLS, se requiere hacer un tratamiento especializado de la nube de puntos que consiste en varias etapas entre las cuales se destacan: el registro y la georreferenciación, la segmentación, la clasificación de los objetos contenidos dentro de la nube de puntos y el modelado 3D de estos objetos.

Registro de la nube de puntos

En la mayoría de los casos, los objetos que se van escanear son demasiado grandes o poseen formas muy complejas para que puedan ser escaneados desde una sola posición: por esta razón, es necesario ubicar el escáner desde diferentes lugares con el fin de obtener la información completa del objeto. Cada posición de escaneo posee sus propias coordenadas locales cuyo origen está en el escáner. Por lo tanto, para obtener una representación completa del objeto escaneado, las nubes de puntos deben ser transformadas a un sistema de coordenadas común o al sistema de coordenadas de algunas de las posiciones de escaneo. Existen varios enfoques para el registro de nube de puntos:

- Registro basado en puntos artificiales (*targets*): son elementos fabricados con material reflectante con el fin de ser identificados más fácilmente dentro de la escena y así poder determinar con alto grado de exactitud sus posiciones en el sistema de coordenadas usado para el registro. En la práctica, se necesita tener al menos tres *targets* con sus posiciones dentro de un sistema de coordenadas conocido.
- Registro usando puntos naturales: para el caso que no sea posible colocar los *targets* debido a las condiciones de la escena, se utilizan diferentes puntos con características naturales que sean visibles dentro de la nube de puntos, por ejemplo, bordes de acero o esquinas de edificios. Después del escaneo, estos puntos naturales son usados como puntos de enlace que se identifican manualmente en la nube de puntos o se escanean separadamente con una alta resolución para una mejor identificación. En la práctica se recomienda usar al menos cuatro puntos naturales.
- Registro mediante emparejamiento de superficies: consiste en alinear las nubes de puntos por medio de las superficies geométricas de dos escaneos. Este algoritmo estima la distancia euclidiana entre fragmentos de superficies por mínimos cuadrados e intenta minimizar las distancias de forma iterativa.

Georreferenciación de la nube de puntos

Es el proceso de transformación de la nube de puntos registrada con el sistema de coordenadas del escáner, a un sistema de coordenadas externas (geodésicas) que pueden ser de ámbito local o global (Reshetyuk, 2009). Actualmente existen diferentes técnicas para llevar a cabo este proceso y se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- Georreferenciación indirecta: en esta técnica los *targets* poseen un sistema de coordenadas geodésicas conocido, lo que permite la transformación de las coordenadas de una nube de

puntos al sistema de coordenadas de ellos. Estos *targets* son llamados puntos de control y sus coordenadas pueden ser determinadas mediante un levantamiento topográfico con una estación total o con equipos de posicionamiento global (GPS). Otra técnica de georreferenciación indirecta consiste en alinear la nube de puntos recolectada con otra que ya tenga un sistema de coordenadas establecido y, mediante el algoritmo llamado *Iterative Closest Point* (ICP), se determina el mejor emparejamiento entre las dos mediante la minimización de una función de distancia. Como el ICP usa la información geométrica (XYZ) de la nube de puntos, cuenta con seis grados de libertad (traslación y rotación en los tres ejes de coordenadas) para realizar el ajuste. En cada iteración el ICP realiza los siguientes pasos:

- Encuentra los puntos más cercanos usando la distancia euclidiana entre las dos nubes de puntos. Ver ecuación (1).

$$d_E(p, q) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (q_i - p_i)^2} \quad (1)$$

- Después calcula la alineación de la nube de puntos mediante una transformación geométrica, que consiste en encontrar la mejor matriz de rotación/traslación necesaria para lograr el ajuste mediante métodos como el de descomposición de valores singulares (SVD) (Wall, Andreasy Rocha, 2003) o mediante *Quaterniones* (Kuipers, 2002). Esta matriz está compuesta por una matriz interior de rotación de 3x3 y su cuarta columna corresponde al vector de traslación. Ver ecuación (2).

Matriz de Transformación =

$$= \begin{pmatrix} R1 & R2 & R3 & x \\ R4 & R5 & R6 & y \\ R7 & R8 & R9 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

- Después de aplicar la matriz de transformación a la nube de puntos se regenera en una nueva nube con un sistema de coordenadas diferente. Este proceso se realiza iterativamente hasta que se minimice la función de error o se cumpla el criterio de parada definido por el usuario.
- Georreferenciación directa: en este método se establece el sistema de referencia geodésico directamente sobre el TLS al momento de realizar el escaneo. Esto se puede realizar de dos maneras: con la ubicación del escáner sobre un punto con sistema de coordenadas geodésicas conocido o mediante el montaje de un equipo GPS sobre el TLS. Comparado con el método de georreferenciación indirecta, este enfoque es más económico y menos costoso en tiempo, ya que no requiere de una estación total, ni de puntos de control en la escena.

Segmentación de la nube de puntos

La segmentación puede definirse como el proceso de etiquetado de cada uno de los puntos, donde los que pertenecen a una misma superficie o región se les asigna la misma etiqueta (Rabbani, Van den Heuvelly Vosselman, 2005). En otras palabras, es el proceso de agrupar espacialmente dentro de regiones homogéneas (segmentos), puntos que contengan características similares. Un segmento es un subconjunto cerrado dentro de la nube de puntos, en donde cada punto pertenece solo a un segmento y no hay dos segmentos que tengan puntos en común.

Selección y extracción de características

La selección de características tiene como objetivo principal la elección de los atributos más relevantes de cada punto o segmento, con el fin de disminuir su cantidad y eliminar información redundante para el proceso de segmentación o clasificación (Dash y Liu, 1997). Este procedimiento en muchos

casos es subjetivo y se consigue mediante técnicas de prueba y error, aunque también existen algunos métodos para realizar este proceso (Kira y Rendell, 1992; Narendra y Fukunaga, 1971).

La extracción de características consiste en la transformación del espacio de características formado por los atributos de los puntos o segmentos, en un nuevo espacio que resalte mejor la información relevante y remueva la redundante. En algunos casos, esta transformación conlleva a una reducción en la dimensión del espacio de características. Entre las técnicas más usadas se encuentran: el análisis de factores, el análisis de discriminantes lineales y el *Principal Component Analysis* (PCA) (Sithole, 2005; Leal y Leal, 2006). Algunos trabajos han utilizado este último método para la detección de postes (Liberge, Soheilian, Chehata y Paparoditis, 2010; Yokoyama, Date, Kanai y Takeda, 2011), o para la detección de elementos urbanos (El-Halawany, Moussa, Licht, y El-Sheimy, 2011; El-Halawany y Lichti, 2011).

Las características más importantes de cada punto o segmento que se utilizan en el proceso de segmentación o de clasificación están definidas de la siguiente manera (Pu y Vosselman, 2006; Pu y Vosselman, 2009a; Pu, Rutzinger, Vosselman, y Oude Elberink, 2011):

- Características geométricas: a) *El tamaño*: es la característica más distintiva y hace referencia a la longitud, ancho, altura, área y volumen. Por ejemplo, en las fachadas, las paredes o puertas se pueden distinguir fácilmente de otros objetos por su tamaño. b) *La posición*: algunos objetos se esperan que se encuentren en cierta posición con respecto a la escena. Por ejemplo, las ventanas y puertas siempre se encuentran sobre la pared, mientras que el techo siempre se encuentra en la parte superior. c) *La orientación*: esta característica generalmente puede ser predecible en los objetos. Por ejemplo, las paredes siempre se encuentran en forma vertical, mientras que

la superficie del terreno es horizontal. d) *La densidad*: en el caso de las ventanas, el pulso del láser penetra el vidrio y difícilmente retorna la información, produciendo una muy baja densidad de puntos dentro estas áreas. Otras características importantes son: el perímetro, la dispersión y la forma geométrica.

- Características radiométricas: son las que están asociadas con el valor del porcentaje de intensidad del pulso retornado. Algunos TLS también pueden capturar imágenes, lo que permite asociar la información espectral a cada punto de la nube.
- Características topológicas: tienen que ver con la relación espacial que existe entre los segmentos, que puede ser definida por la adyacencia y conectividad que existen entre ellos. Por ejemplo, el terreno y el techo siempre se interceptan con las paredes.

Las características más importantes a nivel del punto son: el valor de intensidad del pulso láser, el ancho del pulso (Rutzinger, Höfle, Hollaus y Pfeifer, 2008), y la información espectral obtenida de imágenes digitales tomadas con una cámara (Rottensteiner, Trinder, Clode y Kubik, 2005). Por su parte, en el segmento se encuentran: la altura promedio, el volumen estimado, la desviación estándar, la cantidad de puntos por segmento y el porcentaje de puntos del último eco (Vosselman, 2009). Existen varios métodos para la segmentación de nube de puntos que se pueden clasificar de la manera en que se expone a continuación.

Segmentación basada en la detección de bordes

Este método detecta discontinuidades en las superficies que se forman cerca de los límites de los objetos contenidos en la nube de puntos; por lo tanto, este proceso inicia con la identificación de la extensión de la superficie que está determina-

da por los bordes y las intersecciones, donde los puntos que se localizan dentro de la frontera se consideran que pertenecen a una misma región (Belton, 2008). El desempeño de este tipo de segmentación está determinado por el detector de bordes (Sithole, 2005; Wang y Shan, 2009; Canny, 1986). La detección de bordes consiste en estimar una superficie plana dentro del vecindario alrededor de un punto de interés, para determinar el valor de la normal de esta superficie (Hoppe, DeRose, Dumpchamp, McDonald y Stuetzle, 1992). Este proceso comúnmente se realiza a través del método PCA (Johnson y Wichern, 2002) o mediante regresión de mínimos cuadrados (Shakarji, 1998). Por lo tanto, la variación en la dirección de la normal de la superficie proporciona un indicador del nivel de curvatura o de cambio de la superficie local que permite identificar los bordes (Pauly, Gross y Kobbelt, 2002).

Segmentación basada en el crecimiento de regiones

Esta técnica consiste en detectar superficies continuas que tengan propiedades geométricas similares (Woo, Kang, Wang y Lee, 2002). El proceso comienza examinando un punto semilla que se asocia a un segmento que va creciendo mediante la inspección de los demás puntos alrededor de este punto semilla. El crecimiento se inicia a partir del punto más cercano hasta que se agoten los demás puntos candidatos, ya sea por eliminación de ellos o por la inclusión dentro de un segmento (Vosselman, Gorte, Sitholey Rabbani, 2004; Sapkota, 2008; Pu y Vosselman, 2006). El trabajo presentado en Hoover *et al.* (1996) proporciona una comparación de métodos de segmentación para encontrar superficies planas. En Rabbani *et al.* (2005) presenta un método que consiste en dos pasos: estimación de la normal de la superficie local mediante los k -vecinos más cercanos y el crecimiento de regiones que se ejecuta usando las normales de los puntos estimados; en esta fase los puntos son agregados al segmento mediante una

medida de proximidad y un criterio de suavidad de la superficie.

Segmentación basada en la agrupación de características (clustering)

En este método cada punto es asociado a un vector que contiene las mediciones de sus propiedades geométricas y radiométricas comúnmente llamadas “características” (Sapkota, 2008) (ej. las coordenadas XYZ, el vector normal de la superficie local, el valor de intensidad y la información espectral del objeto). Esas características son representadas en un sistema de coordenadas de n -dimensiones (Sithole, 2005), en el que los puntos se agrupan en regiones compactas y separadas, comúnmente llamadas “clústeres”. En Filin (2002) se define un vector de características de siete dimensiones. El espacio formado por estos vectores es agrupado usando un algoritmo de modo de búsqueda que permite identificar las superficies de los segmentos; finalmente, estos segmentos son agrupados en el espacio de objetos con base en una medida de proximidad.

Otro método es el basado en grafos, que consiste en la implementación de un grafo de atributos $G(V, E_A)$ de una nube de puntos V y las aristas E_A que están basadas en medidas de proximidad. En Zahan (1971) se usa un grafo llamado *Minimum Spanning Tree* (MST) y define que las aristas que no cumplen con un criterio de proximidad son aquellas cuyos pesos son significativamente más grandes que el promedio de los pesos de las aristas más cercanas. En Klasing, Wollherr y Buss (2008) cada nodo es conectado a los vecinos que se encuentren dentro de un radio predefinido. La principal ventaja de esta técnica es que es computacionalmente menos costosa que los demás algoritmos basados en grafos, ya que no hace una búsqueda sobre todos sus vecinos cada vez que está examinando algún nodo en particular, sino que la búsqueda la realizan solamente en los vecinos que se encuentran dentro del radio definido.

Segmentación basada en la línea de escaneo

Esta técnica adopta la estrategia de división y unión, donde la nube de puntos es dividida en líneas de escaneo a lo largo de una dirección (Wang y Shan, 2009). Estas líneas son divididas de forma recursiva e independiente en segmentos de líneas rectas, hasta que la distancia perpendicular de los puntos a su correspondiente segmento de línea esté por debajo de un umbral definido. Posteriormente, los segmentos de líneas de escaneo son unidos basados en alguna medida de similitud mediante el método de crecimiento de regiones (Jiang y Bunke, 1994). En Sithole y Vosselman (2003) se describe un método de segmentación que agrupa puntos de líneas de escaneo basado en una medida de proximidad. Estos grupos no necesitan corresponder a una secuencia de puntos en la línea de escaneo; por lo tanto, todos los puntos están presentes en cada conjunto de líneas de escaneo y varios de ellos tendrán diferente orientación. Esta propiedad es usada para unir estos segmentos de líneas en regiones.

Segmentación mediante el ajuste a un modelo

Este tipo de segmentación se basa en la premisa de que los objetos hechos por el hombre pueden ser escaneados y se pueden descomponer en primitivas geométricas tales como planos, cilindros y esferas (Schnabel, Roland, Wessel y Klein, 2007). Este enfoque intenta ajustar formas geométricas en la nube de puntos; por lo tanto, aquellos puntos que se ajusten a la representación matemática de alguna forma geométrica son etiquetados como pertenecientes a un segmento. Entre los métodos para la estimación de parámetros que permiten la extracción de formas geométricas dentro de una nube de puntos se destacan la Transformada de Hough 3D (Vosselman y Dijkman, 2001; Pu y Vosselman, 2009a; Vosselman *et al.*, 2004) y el *Random Sample Consensus* (RANSAC) (Schnabel, Roland *et al.*, 2007; Schnabel, Wahly Klein, 2007).

Otros métodos de segmentación

La segmentación basada en “voxels” convierte la nube de puntos en una malla 3D, donde las celdas que conforman esta malla son pequeños cubos llamados “voxels” (*volumen elements*), que es similar al concepto de los píxeles (*picture elements*) para el caso 2D. El algoritmo propuesto en Gorte y Pfeifer (2004) inicia con la conversión de la nube de puntos a un raster 3D. El siguiente paso es el proceso de “esqueletonización”, que consiste en la remoción iterativa de voxels que no hacen parte del objeto, con el fin de dejar al descubierto los componentes que conforman su estructura y las relaciones topológicas entre ellos. Posteriormente, la segmentación se hace sobre los esqueletos de los objetos para luego hacerla transformación, pero esta vez de voxels segmentados a nube de puntos segmentada.

La segmentación es una etapa importante aunque no necesaria (Velizhev, Shapovalovy Schindler, 2012) para el siguiente paso, que consiste en la clasificación de los objetos, ya que permite identificar los segmentos claves y reducir el ruido en los datos. Así, logra un mejor desempeño en los algoritmos de clasificación. Sin embargo, en otras investigaciones la etapa de clasificación se realiza antes de la segmentación (Belton, 2008).

Clasificación de objetos en nube de puntos

La clasificación consiste en la separación de puntos o segmentos, según sea el caso, en diferentes clases que han sido previamente definidas (ej. edificaciones, vegetación, terreno, etc.), mediante la evaluación de sus características intrínsecas o naturales, donde para cada clase existe un conocimiento previo sobre su naturaleza (Fernández Díaz, 2007). Para el caso de los elementos que conforman un entorno urbano, los objetos poseen un número de rasgos distintivos y organizados de manera jerárquica dentro de cualquier escena, tal como se visualiza en la figura 2. La mayoría de

los trabajos realizados con datos de un TLS se han enfocado en el reconocimiento de fachadas de edificios (Pu y Vosselman, 2006; Pu y Vosselman, 2009a; Pu y Vosselman, 2009b), mientras que otros se han orientado más en la detección de elementos de las vías (Liberge *et al.*, 2010; El-Halawany y Lichti, 2011; Pu *et al.*, 2011). Con base en los tipos de características, la clasificación se puede categorizar basada en las propiedades radiométricas o geométricas de los puntos (Belton, 2008):

Clasificación basada en las características radiométricas

Este tipo de clasificación se basa en la información espectral de cada punto (intensidad del pulso o color) que depende de las propiedades de cualquier superficie, como su reflectancia, textura, el ángulo de incidencia, así como de las especificaciones del escáner (Lichti y Harvey, 2002; Pfeifer, Dorninger, Haring y Fan, 2007). En Gordon, Lichti y Stewart (2001) se utiliza el valor de intensidad para la clasificación de superficies continuas, ya que permite la diferenciación entre los elementos que conforman las fachadas. Otros trabajos se han concentrado en combinar la información de color de imágenes 2D con la nube de puntos 3D (Lichti, 2005; Jansa, Studnicka, Forkert, Haring y Kager, 2004).

Clasificación basada en las características geométricas

Este tipo de clasificación se basa en la información geométrica derivada de las coordenadas 3D de los puntos. Como esta información es común para todas las nubes de puntos independientemente del TLS que se use o de la configuración que tenga el dispositivo, es el tipo de clasificación más usado.

En Vosselman *et al.* (2004) se presenta una vista general de las diferentes técnicas para la extrac-

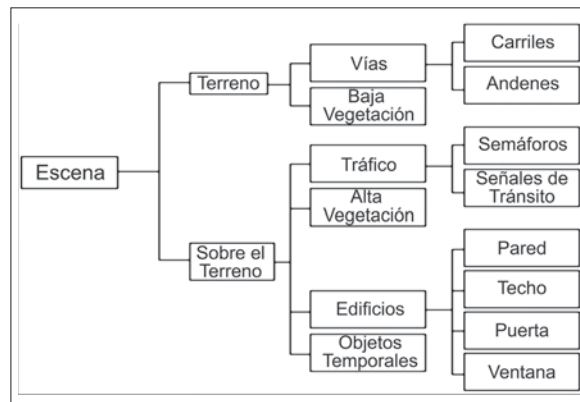


Figura 2. Categoría genérica de objetos en una escena urbana escaneada

Fuente: Shi Pu (2011), tomada de Pu *et al.* (2011).

ción de superficies planas, cilíndricas y esféricas en nubes de puntos, con base en los parámetros de cada una de estas formas geométricas. En Pu *et al.* (2011) se presenta un trabajo basado en la técnica de detección de forma para la localización de señales de tránsito, que inicia con una segmentación mediante el crecimiento de regiones (Vosselman *et al.*, 2004). Luego, se extraen las características con base en el enfoque propuesto en Pu y Vosselman (2009a) y en Pu y Vosselman (2009b) y finalmente, cada segmento es ajustado a una envolvente convexa, con el fin de comparar su área con las áreas de las señales de tránsito en estudio (rectangular, triangular y circular) y realizar el proceso de clasificación.

En Pu y Vosselman (2006) se presenta un enfoque automático para la extracción de objetos de las fachadas dentro de una nube de puntos. Inicialmente se definen las clases que conforman las fachadas de las edificaciones (pared, puerta, ventana, techo, salientes y entrantes). Después se aplican algoritmos de segmentación para agrupar las superficies planas. Luego se extraen las características más relevantes de cada segmento y se establecen sus restricciones basadas en el conocimiento humano. Cada segmento es ajustado a una envolvente convexa con el fin de definir los rangos de valores de las características. Final-

mente, el proceso de clasificación confronta cada segmento mediante las restricciones de las características para determinar la clase a la cual pertenece (Pu y Vosselman, 2009a).

Una técnica para la detección de múltiples objetos en un entorno urbano fue presentado en Golovinskiy, Kim y Funkhouser (2009). Este algoritmo inicia con la localización potencial de los objetos, basándose en la alta densidad de puntos que estos poseen; después se aplica un método de segmentación para remover los puntos del terreno. La extracción de características se lleva a cabo con base en la forma y el contexto. Y en la etapa de clasificación, cada vector de características del objeto candidato es clasificado con respecto a un conjunto de entrenamiento etiquetado manualmente.

En la tesis presentada en Belton (2008) se realiza un proceso de clasificación a nivel de punto. Basado en las características geométricas, los puntos fueron etiquetados en tres clases: superficie, frontera y borde. Esta clasificación se llevó a cabo con base en las propiedades algebraicas de continuidad y de diferencial de los segmentos de las superficies, mediante algoritmos del vecindario más cercano y varianza de la curvatura del vecindario (Belton y Lichti, 2006).

El trabajo presentado en Velizhev *et al.* (2012) se basa en la detección y el reconocimiento de objetos pequeños y compactos de un entorno urbano (ej. carros, señales de tránsito y lámparas). El proceso inicia con el filtrado de los puntos del terreno mediante el algoritmo de RANSAC, luego, se extraen grupos de puntos llamados “componentes conectados”, los cuales se consideran como potenciales objetos. Después se evalúan las características de cada componente (ej. altura, volumen, descriptor *spin-image*) y, finalmente, se aplica un algoritmo de clasificación supervisada llamado *Implicit Shape Models* (ISM), que reconoce los objetos mediante un sistema de votación de las localizaciones de sus centros.

Otro tipo de clasificación de nubes de puntos está basado en el enfoque estadístico (Luo y Sohn, 2012), donde los parámetros del modelo y las probabilidades *a posteriori* son estimadas mediante el ajuste de un modelo Gaussiano mixto usando el algoritmo *Expectation Maximization* (EM). En la fase de análisis de características se detectaron tres tipos de objetos en el entorno urbano: los objetos hechos por el hombre, que generalmente son superficies planas o cilíndricas con algún valor de reflectancia (ej. edificaciones y postes de luz); los objetos naturales, que son superficies irregulares con poca reflectancia (ej. los árboles, el suelo); finalmente, los objetos dinámicos, tales como los peatones y vehículos, que generalmente son de pequeña altura y obstruyen a los dos tipos de objetos anteriores.

Generación de modelos tridimensionales

Una vez identificados los objetos dentro de la nube de puntos en la fase de clasificación, se lleva a cabo el proceso de visualización mediante la generación de un modelo tridimensional con las dimensiones extraídas de los objetos. Aunque existen aplicaciones comerciales para la transformación de la nube de puntos en modelos sólidos, muchos de los procesos tienen limitaciones significativas como la dependencia de geometrías preestablecidas que no reflejan suficientemente la geometría de una edificación, la dependencia de un programa basado en dibujo asistido por computador (CAD) y la incapacidad de operar de manera óptima con datos dispersos e información faltante (Laefer *et al.*, 2011). Existen dos enfoques dominantes que se nombran a continuación.

Geometría sólida constructiva- Constructive Solid Geometry (CSG)

En este enfoque se construyen los modelos a partir de una serie de sólidos primitivos simples (caja, esfera, cilindro y aros) y de operaciones

booleanas como: unión, intersección y diferencia (Laefer *et al.*, 2011; Hoffman y Rossignac, 1996). El proceso de construcción de los modelos tridimensionales se realiza en forma de árbol llamado *CSG-Tree*, donde los sólidos primitivos simples son las hojas y las operaciones booleanas se almacenan como nodos interiores (Goldman, 2009).

Representación de fronteras - B-rep (Boundary Representation)

En este enfoque la estructura geométrica consta de vértices, curvas y superficies junto con los datos numéricos que describen la posición, el tamaño y la orientación, mientras que la estructura topológica de los modelos adyacentes consta de vértices, aristas y caras, junto con punteros que almacenan la información de la conectividad (Hoffman y Rossignac, 1996; Goldman, 2009).

Un trabajo basado en el enfoque B-rep para la reconstrucción de superficies se presenta en Lorenzen y Cline (1987) denominado *Marching Cubes*. El proceso inicia con la subdivisión del espacio de coordenadas en voxels; aquellos voxels que contengan algún elemento de la superficie son remplazados con una serie de triángulos alrededor de los puntos hasta formar polígonos. Después se realiza la unión de los cubos adyacentes a través de sus vértices vecinos para producir la malla poligonal de la superficie. Otro trabajo presentado en Azernikov y Fischer (2004) se basa en la aproximación de la conectividad de grafos a partir del modelo *Hierarchical Space Decomposition Model* (HSDM) y la reconstrucción de caras. El proceso se divide en las siguientes etapas: construcción del HSDM a partir de la nube de puntos, extracción de superficie mediante la conectividad de grafos, la reconstrucción de caras y, finalmente, la reconstrucción de la malla y su extensión mediante la incorporación de los vectores normales.

Otro enfoque para la reconstrucción de superficies está basado en la triangulación de Delaunay, que consiste en la generación de una red irregular de triángulos (TIN) a partir de todos los puntos de la escena. El trabajo presentado en Pu y Vosselman (2007) para la detección de ventanas inicia con la generación de un TIN para los segmentos de la fachada; como las ventanas presentan menor densidad de puntos entonces los triángulos son más grandes en esa área, y esta característica permite detectar estos segmentos más fácilmente para luego ser ajustados a un rectángulo mínimo delimitante. En Pu y Vosselman (2009a) y Pu (2007) se presenta un enfoque para la generación automática de modelos de edificaciones mediante ajuste a polígonos. En su etapa de modelado los objetos reconocidos son ajustados directamente a polígonos convexos mediante los métodos: *Quick Hull* (Barber, Dobkiny Huhdanpaa, 1996), mínimos cuadrados o transformada de Hough (Vosselman *et al.*, 2004). En las partes ocultas de las edificaciones se hacen suposiciones a partir de las partes visibles y del conocimiento acerca de estas y luego se completa el modelo mediante la combinación de los polígonos ajustados y las suposiciones de las partes ocultas. En Pu y Vosselman (2009b) se da un toque más real a los modelos tridimensionales, con la ejecución de un método para la aplicación de color y textura a partir de imágenes digitales, tal como se visualiza en la figura 3.



a) Nube de puntos b) Modelo 3D c) Modelo 3D texturizado

Figura 3. Generación de modelos tridimensionales con textura

Fuente: Shi Pu (2009), tomada de Pu y Vosselman (2009b).

En Boissonnat (1984) se propone un método para reconstruir una malla mediante la triangulación de superficies a partir del vecindario de un conjunto de puntos aplicando el método de mínimos cuadrados. Esta triangulación se propaga hasta que no existan más puntos libres de manera similar a la técnica de crecimiento de regiones.

Actualmente, existen en el mercado algunas herramientas comerciales de *software* para la transformación de nube de puntos en superficie en modelos sólidos. Estas aplicaciones se pueden clasificar en dos categorías: las que dependen de un *software* intermediario CAD o comúnmente llamado “Add-on” para plataformas CAD y las aplicaciones independientes (Bradley y Currie, 2005). Los tipos de archivos de salida de estas aplicaciones son: DXF, SAT, STEP, STL, entre otros. A pesar de que estas aplicaciones facilitan la construcción de un modelo, aún presenta varias desventajas como el consumo considerable de tiempo, ya que no se puede generar un modelo satisfactorio sin algún grado de posprocesamiento manual (Young *et al.*, 2008; Viceconti, Zannoni y Pierotti, 1998).

TENDENCIAS Y TRABAJOS FUTUROS

En Batty, Chapman y Evans (2000) se presenta un estado del arte sobre las diferentes aplicaciones que se la han dado a los modelos de ciudades en 3D, entre las que se destacan: los servicios de emergencia, la planeación urbana, las telecomunicaciones, la arquitectura, el turismo, entre otros.

Una de las tendencias más importantes que se está llevando a cabo con el uso de estos modelos es para el análisis SIG 3D. En Moser, Albrecht y Kosar (2010) se basaron en estudios de casos reales para resaltar las capacidades de análisis 3D, las cuales fueron estructuradas en categorías como: funciones de análisis espacial (Tomlin, 1991) y operaciones con datos en 3D

(Moser, 2010). Las categorías que se plantearon para el análisis SIG 3D fueron: a) *el análisis de proximidad*, usada para el cálculo de distancias, buffer e intersecciones entre objetos 3D; b) *el análisis de propagación de volumen o dinámica de flujos*, utilizada para modelar la dinámica de las corrientes de aire a través de las edificaciones con el fin de evaluar la distribución de la contaminación en la ciudad; c) *la densidad en 3D*, para examinar las posibles ubicaciones de antenas para la cobertura de la telefonía móvil y el *análisis de visibilidad*, que permite identificar las áreas que son visibles desde alguna posición del observador sin tener que generar vistas con perspectiva (Moser *et al.* 2010).

Recientes investigaciones están conduciendo al enriquecimiento semántico de los modelos de ciudades 3D para el desarrollo urbano sostenible. CityGML (Gröger, Kolbe, Czerwinski y Nagel, 2008) es la primera norma estándar relacionada con este tipo de modelos, donde se intenta proporcionar una descripción de las propiedades geométricas, topológicas y semánticas de los objetos 3D, que permiten enriquecer estos modelos con información importante relacionada con los diferentes temas urbanos. En Métral, Ghoula, y Falquet (2012) se aborda el problema relacionado con la visualización de modelos de ciudades 3D enriquecidos, y proponen una representación formal de las técnicas de visualización existentes en forma de una ontología de técnicas de visualización 3D. Igualmente, en Billen, Zaki, Servières, Moreau, y Hallot (2012) se propone una ontología del espacio para fortalecer el diseño de modelos de ciudades 3D basados en el estándar CityGML. Otras investigaciones acerca de la reconstrucción urbana se llevan a cabo en la Sociedad Internacional de Fotogrametría y Sensores Remotos (*ISPRS*) en la comisión III, grupo de trabajo 4 (*ISPRS*, 2013) y en la Cooperación Europea en Ciencia y Tecnología (European COST Action, 2013).

CONCLUSIONES

El desarrollo de la tecnología del escáner láser ha revolucionado la forma del levantamiento de la información topográfica tanto en el área urbana como en la rural. La gran ventaja que tiene esta tecnología es la rapidez y la precisión con la que captura los datos que se representan en forma de una nube de puntos que implícitamente contiene las coordenadas XYZ, el porcentaje de reflectancia y el color de las superficies escaneadas.

El gran volumen de datos recolectados mediante TLS ha impulsado el desarrollo de investigaciones para llevar a cabo el tratamiento de dicha nube

de puntos; algunos de ellos se han enfocado en el desarrollo de algoritmos para el registro, filtrado, segmentación y visualización de nube de puntos, mientras que otros trabajos han hecho énfasis en el reconocimiento y clasificación de objetos.

FINANCIAMIENTO

Este trabajo forma parte el proyecto de investigación “Herramienta para automatizar la generación de un modelo tridimensional de elementos urbanos”, financiado por la Universidad Industrial de Santander (UIS) y por el grupo de investigación Geomática adscrito a la Escuela de Ingeniería Civil de la UIS.

REFERENCIAS

- Azernikov, S. y Fischer, A. (2004). Efficient surface reconstruction method for distributed CAD. *Computer-Aided Design*, 36(9), 799-808.
- Barber, C. B., Dobkin, D. y Huhdanpaa, H. (1996). The Quickhull Algorithm for Convex Hulls. *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, 22(4), 469-483. DOI: 10.1145/235815.235821
- Batty, M., Chapman, D. y Evans, S. (2000). *Visualizing the City: Communicating Urban Design to Planners and Decision Makers*. London.
- Belton, D. (2008). *Classification and Segmentation of 3D TLS Point Clouds*. Tesis de Doctorado no publicada, Curtin University of Technology, Perth, Australia.
- Belton, D. y Lichti, D. (2006). Classification and segmentation of terrestrial laser scanner point clouds using local variance information. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(5), 44-49.
- Billen, R., Zaki, C., Servières, M., Moreau, G. y Hallot, P. (2012). Developing an ontology of space: Application to 3D city modeling. In T. Leduc, G. Moreau, y R. Billen (Eds.). *Usage, Usability, and Utility of 3D City Models – European COST Action TU0801, 02007*, 14. DOI: 10.1051/3u3d/201202007
- Boissonnat, J. (1984). Geometric Structures for Three Dimensional Shape Representation. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 3(4), 266-286. DOI: 10.1145/357346.357349
- Bornaz, L. y Rinaudo, F. (2004). Terrestrial laser scanner data processing. *Proceedings of XX ISPRS Commission V Congress* (vol. 45, pp. 514-519).
- Bradley, C. y Currie, B. (2005). Advances in the Field of Reverse Engineering. *Computer-Aided Design and Applications*, 2(5), 697-706.

- Canny, J. (1986). A computational approach to edge detection. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 8(6), 679-98. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21869365>. DOI: 10.1109/TPAMI.1986.4767851
- Carter, W. (1973). *The Lunar Laser Ranging Pointing Problem*. University of Arizona.
- Dash, M. y Liu, H. (1997). Feature Selection for Classification. *Intelligent Data Analysis*, 1(3), 137-156.
- El-Halawany, S. I. y Lichti, D. (2011). Detection of Road Poles from Mobile Terrestrial Laser Scanner Point Cloud. *International Workshop on Multi-Platform/Multi-Sensor Remote Sensing and Mapping (M2RSM)* (pp. 1-6). IEEE. DOI: 10.1109/M2RSM.2011.5697364
- El-Halawany, S. I., Moussa, A., Lichti, D. y El-Sheimy, N. (2011). Detection of road curb from mobile terrestrial laser scanner point cloud. *ISPRS workshop, Laser scanning 2011*, 38(5), 6.
- European COST Action, T. (2013). Usage, Usability and Utility of 3D City Models. Recuperado de <http://3u3d.edpsciences.org/>
- Faro. (2012). Faro Laser Scanner Focus 3D. *Junio*. Recuperado de <http://www.faro.com/focus/es>
- Fernández Díaz, J. C. (2007). *Scientific Applications of the Mobile Terrestrial Laser Scanner System*. Tesis de Maestría no publicada, University of Florida, USA.
- Filin, S. (2002). Surface clustering from airborne laser scanning data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(3), 119-124.
- Goldman, R. (2009). *An Integrated Introduction to Computer Graphics and Geometric Modeling* (1st ed., p. 543).USA: CRC Press.
- Golovinskiy, A., Kim, V. G. y Funkhouser, T. (2009). Shape-based recognition of 3D point clouds in urban environments. *International Conference on Computer Vision - ICCV* (pp. 2154-2161). IEEE. DOI: 10.1109/ICCV.2009.5459471
- Gordon, S., Lichti, D. y Stewart, M. (2001). Application of a high-resolution, ground-based laser scanner for deformation measurements. *In Proceedings of 10th International FIG Symposium on Deformation Measurements*, 23-32.
- Gorte, B. y Pfeifer, N. (2004). Structuring Laser-Scanned Trees using 3D Mathematical Morphology. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35 (B5), 929-933.
- Gröger, G., Kolbe, T., Czerwinski, A. y Nagel, C. (2008). *OpenGIS® City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard*. Open Geospatial Consortium Inc. Recuperado de www.opengeospatial.org/standards/citygml
- Hoffman, C. y Rossignac, J. (1996). A Road Map to Solid Modeling. *IEEE Transaction on Visualization and Computation Graphics*, 2(1), 3-10. DOI: 10.1109/2945.489381
- Hoover, A., et. al. (1996). An Experimental Comparison of Range Image Segmentation Algorithms. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence Archives*, 18(7), 673-689. DOI: 10.1109/34.506791

- Hoppe, H., DeRose, T., Dumpchamp, T., McDonald, J. y Stuetzle, W. (1992). Surface reconstruction from unorganized points. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 26(2), 71-78. DOI: 10.1145/142920.134011
- ISPRS. (2013). International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Recuperado de <http://www2.isprs.org/commissions/comm3/wg4.html>
- Jansa, J., Studnicka, N., Forkert, G., Haring, A. y Kager, H. (2004). Terrestrial laserscanning and photogrammetry - acquisition techniques complementing one another. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35.
- Jiang, X. y Bunke, H. (1994). Fast Segmentation of Range Images into Planar Regions by Scan Line Grouping. *Machine Vision and Applications*, 7(2), 115-122. DOI: 10.1007/BF01215806
- Johnson, R. y Wichern, W. (2002). *Applied Multivariate Statistical Analysis* (5th ed.). New Jersey, USA: Prentice Hall.
- Kira, K. y Rendell, L. (1992). The feature selection problem: Traditional methods and a new algorithm. *Proceedings of Ninth National Conference on Artificial Intelligence* (pp. 129-134).
- Klasing, K., Wollherr, D. y Buss, M. (2008, May). A clustering method for efficient segmentation of 3D laser data. *Conference on Robotics and Automation, ICRA 2008. IEEE International*, pp. 4043-4048. Munich, Alemania: IEEE. DOI: 10.1109/ROBOT.2008.4543832
- Kuipers, J. (2002). *Quaternions and Rotation Sequences: A Primer with Applications to Orbits, Aerospace and Virtual Reality* (p. 400). Princeton: Princeton University Press.
- Laefer, D., Truong Hong, L. y Fitzgerald, M. (2011). Processing of terrestrial laser scanning point cloud data for computational modelling of building facades. *Recent Patents on Computer Science*, 4(1), 16-29. DOI: 10.2174/1874479611104010016
- Leal, E. y Leal, N. (2006). Point Cloud Denoising Using Robust Principal Component Analysis. *Proceedings of the First International Conference on Computer Graphics Theory and Applications* (pp. 51-58). Setúbal, Portugal.
- Leica. (2012a). Leica ScanStation C10. *Junio*. Recuperado de http://www.leica-geosystems.es/es/Leica-ScanStation-C10_79411.htm
- Leica. (2012b). HDS7000 Laser Scanner. *Junio*. Recuperado de http://www.leica-geosystems.es/es/HDS7000_90337.htm
- Liberge, S., Soheilian, B., Chehata, N. y Paparoditis, N. (2010). Extraction of Vertical Posts in 3D Laser Point Clouds acquired in Dense Urban Areas by a Mobile Mapping System. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (vol. 38, pp. 126-130). Saint-Mandé, Francia.
- Lichti, D. (2005). Spectral filtering and classification of terrestrial laser scanner point clouds. *The Photogrammetric Record*, 20(111), 218-240. DOI: 10.1111/j.1477-9730.2005.00321.x

- Lichti, D. y Harvey, B. (2002). Effects of reflecting surface material properties on time-of-flight laser scanner measurements. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(4).
- Lorensen, W. y Cline, H. (1987). Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 21(4), 163-169. DOI: 10.1145/37402.37422
- Luo, C. y Sohn, G. (2012). Terrestrial Laser Scanning Data Classification Using Expectation Maximization Algorithm. *The XXII Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*. Melbourne, Australia.
- Métral, C., Ghoula, N. y Falquet, G. (2012). An ontology of 3D visualization techniques for enriched 3D city models. (T. Leduc, G. Moreau, y R. Billen, Eds.) *Usage, Usability, and Utility of 3D City Models-European COST Action TU0801, 02005*, 15. DOI: 10.1051/3u3d/201202005
- Moser, J. (2010). Potential of 3D GIS Models for Municipalities - The case of study of Salzburg. *Proceeding of the Geoinformatics Forum Salzburg*.
- Moser, J., Albrecht, F. y Kosar, B. (2010). Beyond visualisation - 3D GIS Analyses for virtual city models. *International Archives of Photogrammetric, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII (4/W5), 143-146.
- Narendra, P. y Fukunaga, K. (1971). A branch and bound algorithm for Feature Subset Selection. *IEEE Transactions on Computers*, C-26(9), 917-922. DOI: 10.1109/TC.1977.1674939
- Optech. (2012). ILRIS Terrestrial Laser Scanner. *Junio*. Recuperado de http://www.optech.ca/pdf/ILRIS_SpecSheet_110309_Web.pdf
- Pauly, M., Gross, M. y Kobbelt, L. (2002). Efficient simplification of point sampled surfaces. *Proceedings of the conference on Visualization, IEEE Computer Society* (pp. 163-170). Massachusetts, USA. DOI: 10.1109/VISUAL.2002.1183771
- Pfeifer, N., Dorninger, P., Haring, A. y Fan, H. (2007). Investigating terrestrial laser scanning intensity data: Quality and functional relations. *In Optical 3-D Measurement Techniques VIII*, 328-337.
- Pu, S. (2007). Automatic building modeling from terrestrial laser scanning. *Advances in 3D Geoinformation Systems* (pp. 147-160). Springer Berlin Heidelberg.
- Pu, S., Rutzinger, M., Vosselman, G. y Oude Elberink, S. (2011). Recognizing basic structures from mobile laser scanning data for road inventory studies. *Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 66(6), S28-S39. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2011.08.006
- Pu, S. y Vosselman, G. (2006). Automatic extraction of building features from terrestrial laser scanning. *Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35(6). Recuperado de http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/part5/paper/1219_Dresden06.pdf
- Pu, S. y Vosselman, G. (2007). Extracting windows from terrestrial laser scanning. *In-*

- ternational Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(3), 320-325.
- Pu, S. y Vosselman, G. (2009a). Knowledge based reconstruction of building models from terrestrial laser scanning data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(6), 575-584. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2009.04.001
- Pu, S. y Vosselman, G. (2009b). Building facade reconstruction by fusing terrestrial laser points and images. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 9(6), 4525-4542. DOI: 10.3390/s90604525
- Rabbani, T., Van den Heuvel, F. y Vosselman, G. (2005). Segmentation of point clouds using smoothness constraint. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(5), 248-253.
- Reshetyuk, Y. (2009). *Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning*. Tesis de Doctorado no publicada. Royal Institute of Technology - KTH, Estocolmo, Suecia.
- Riegl. (2012). Riegl Laser Measurement System. *Junio*. Recuperado de <http://www.riegl.com/nc/products/terrestrial-scanning>
- Rottensteiner, F., Trinder, J., Clode, S. y Kubik, K. (2005). Using the Dempster-Shafer method for the fusion of LIDAR data and multi-spectral images for building detection. *Information fusion*, 6(4), 283-300. DOI: 10.1109/ICPR.2004.1334203
- Rutzinger, M., Höfle, B., Hollaus, M. y Pfeifer, N. (2008). Object-Based Point Cloud Analysis of Full-Waveform Airborne Laser Scanning Data for Urban Vegetation Classification. *Sensors*, 8(8), 4505-4528. DOI: 10.3390/s8084505
- Sapkota, P. P. (2008). *Segmentation of Coloured Point Cloud Data*. Tesis de Maestría no publicada. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation. Enschede. Holanda.
- Schnabel, R., Roland, W., Wessel, R. y Klein, R. (2007). *Shape Recognition in 3D Point Clouds* (p. 9). Bonn, Alemania.
- Schnabel, R., Wahl, R. y Klein, R. (2007). Efficient RANSAC for Point-Cloud Shape Detection. *Computer Graphics Forum*, 26(2), 214-226.
- Shakarji, C. (1998). Least-squares fitting algorithms of the NIST algorithm testing system. *Journal of Research of the National Institute of Standard and Technology*, 6(106), 633-641.
- Sithole, G. (2005). *Segmentation and Classification of Airborne Laser Scanner Data* (p. 203): NCG, Nederlandse Commissie voor Geodesie. Delft, Holanda.
- Sithole, G. y Vosselman, G. (2003). Automatic structure detection in a point-cloud of an urban landscape. *Proceedings 2nd GRSS/IPRS joint workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas*, pp. 67-71. Berlín, Alemania. DOI: 10.1109/DFUA.2003.1219959.
- Tomlin, D. (1991). Cartographic Modelling. En D. Maguire, M. Goodchild y D. Rhind (Ed.). *Geographical Information Systems: Principles and Applications* (I, pp. 631-374). Harlow. Inglaterra: Wiley.

- Trimble. (2012a). Trimble VX Spatial Station. *Junio*. Recuperado de http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-348124/022543-261F_TrimbleVX_DS_0110_lr.pdf
- Trimble. (2012b). Trimble FX Scanner Data-sheet. *Junio*. Recuperado de http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-397918/022504-105B_TrimbleFX_DS_0610_LR.pdf
- Van Genchten, B. (2008). *Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning*. M. Santana Quintero, J. L. Lerma, y E. Heine (Eds.) *Learning tools for advanced three-dimensional surveying in risk awareness project* (pp. 1-241). Valencia: Universidad Politécnica de Valencia: Editorial UPV.
- Velizhev, A., Shapovalov, R. y Schindler, K. (2012). Implicit Shape Models for Object Detection in 3D Point Clouds. *ISPRS of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (vol. 1). Melbourne, Australia. DOI: 10.5194/isprsannals-I-3-179-2012
- Viceconti, M., Zannoni, C. y Pierotti, L. (1998). TRI2SOLID: An Application of Reverse Engineering Methods to the Creation of CAD Models of Bone Segments. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 56(3), 211-220. DOI: 10.1016/S0169-2607(98)00011-X
- Vosselman, G. (2009). Advanced Point Cloud Processing. In *Photogrammetric Week'09*.
- Vosselman, G. y Dijkman, S. (2001). 3D building model reconstruction from point clouds and ground plans. *International Archives of Photogrammetric, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(3/W4), 37-44.
- Vosselman, G., Gorte, B. G. H., Sithole, G. y Rabbani, T. (2004). Recognising Structure in Laser Scanner Point Clouds. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 46(8/W2), 33-38.
- Wall, M., Andreas, R. y Rocha, L. (2003). Singular value decomposition and principal component analysis. *A Practical Approach to Microarray Data Analysis*, 02(4001), 91-109.
- Wang, J. y Shan, J. (2009). Segmentation of Lidar Point Clouds for Building Extraction. *American Society Photogrammetric Remote Sensing Annual 2009*. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- Woo, H., Kang, E., Wang, S. y Lee, K. H. (2002). A new segmentation method for point cloud data. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42(2), 167-178. DOI: 10.1016/S0890-6955(01)00120-1
- Yan, L., Li, Z. y Xie, H. (2010, June). Segmentation of unorganized point cloud from terrestrial laser scanner in urban region. *18th International Conference on Geoinformatics*, pp. 1-5. Beijing, China: IEEE. DOI: 10.1109/GEOINFORMATICS.2010.5567982
- Yokoyama, H., Date, H., Kanai, S. y Takeda, H. (2011). Pole-like objects recognition from mobile laser scanning data using smoothing and principal component analysis. *ISPRS Workshop, Laser Scanning 2011*, 38(W12), 115-120.
- Young, P., Beresford-West, T., Coward, S., Notarberardino, B., Walker, B. y Abdul-Aziz, A.

(2008). An efficient approach to converting three-dimensional image data into highly accurate computational models. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 366(1878), 3155-3173. DOI: 10.1098/rsta.2008.0090.

Z+F. (2012). Z+F Profiler 5010 Technical Data. *Junio*. Recuperado de http://www.zf-uk.com/downloads/5010_Specs.pdf

Zahan, C. (1971). Graph-theoretical methods for detecting and describing gestalt clusters. *IEEE Transactions on Computers*, 20(1), 68-86. DOI: 10.1109/T-C.1971.223083.

INSTRUCCIONES PARA LOS AUTORES

REVISTA TECNURA UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS FACULTAD TECNOLÓGICA

CONTENIDO

1. ALCANCE Y POLÍTICA EDITORIAL DE LA REVISTA
2. TIPOS DE ARTÍCULOS ACEPTADOS
3. FORMATO DEL ARTÍCULO
4. ENVÍO DE ARTÍCULOS
5. PROCEDIMIENTO PARA LA PUBLICACIÓN
6. ARBITRAJE DE ARTÍCULOS
7. 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 en enero, abril, julio y octubre. Su primer número apareció en el segundo semestre de 1997 y hasta la fecha ha mantenido su regularidad.

Las áreas temáticas de interés de la revista *Tecnura* están enfocadas en 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) y Ulrich de Proquest (Estados Unidos).

Tecnura es una revista arbitrada mediante un proceso de revisión entre pares de doble ciego. La periodicidad de la conformación de sus comités científico y editorial está sujeta a la publicación de artículos en revistas indexadas internacionalmente por parte de sus respectivos miembros.

La Universidad Distrital Francisco José de Caldas, sus directivas, el editor, el comité editorial y científico no son responsables por la opinión y criterios expresados en el contenido de los artículos y estos se publican bajo la exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento del comité editorial.

Además de la versión impresa, la revista *Tecnura* tiene también una versión digital disponible en su página web: <http://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, y evitar las que sean demasiado largas o complejas.
- ▶ El vocabulario empleado debe ser básico y común. Los términos técnicos deben explicarse brevemente; así mismo, 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) y cumplir con las siguientes indicaciones:

- ▶ Letra *Times New Román* de 12 puntos (a excepción de que se requiera lo contrario para algunos apartados).
- ▶ Una columna a doble espacio.
- ▶ Todas las márgenes de 3 cm.
- ▶ Los párrafos se justifican y no debe haber espacio entre los consecutivos.
- ▶ No incluir saltos de página o finales de sección.
- ▶ Si se desea resaltar palabras o frases del texto, no usar letra negrita sino letra cursiva.
- ▶ Los decimales se deben señalar con coma (,) y no con un punto.

- ▶ Los millares y millones se deben señalar con un espacio fino.
- ▶ Evitar las notas de pie de página.
- ▶ Se debe utilizar nomenclatura arábica hasta el tercer nivel únicamente.

3.4 De la estructura del documento

Los trabajos deben tener la siguiente estructura y cumplir con los siguientes requisitos:

Composición de un artículo

Todos los artículos remitidos para su evaluación y posible publicación por parte de la revista *Tecnura* deben tener por lo menos los componentes descritos a continuación:

- ▶ Título en español e inglés.
- ▶ Información de los autores.
- ▶ Resumen en español e inglés.
- ▶ Palabras clave en español e inglés.
- ▶ Introducción.
- ▶ Conclusiones.
- ▶ Trabajo futuro (opcional).
- ▶ Agradecimientos (opcional).
- ▶ Referencias bibliográficas.

Si el artículo es de investigación científica y tecnológica deben tener, además de lo anterior, los siguientes componentes:

- ▶ Metodología.
- ▶ Resultados.
- ▶ Financiamiento.

Título

El título del artículo deberá ser corto o dividido en título y subtítulo, atractivo para el lector potencial y escrito en mayúscula sostenida. Este debe aparecer centrado entre las márgenes, escrito con letra *Times New Roman*, en negrita, tamaño de fuente 18. El título del artículo debe ir en español e inglés separado por un espacio doble. *Máximo* 20 palabras.

Autores

Después del título debe escribirse el (los) nombre(s) completo(s) del (los) autor(es), acompañado de los datos biográficos básicos: título de pregrado, título de posgrado,

ocupación o cargo, afiliación institucional (institución donde labora), dependencia, ciudad, país y correo electrónico. La información anterior debe ir inmediatamente debajo del nombre del autor.

Resumen

Debe establecer el objetivo y alcance del trabajo, una descripción clara y concisa de la metodología, los resultados y las conclusiones obtenidas. Máximo 250 palabras.

Palabras clave

Debe escogerse entre tres y diez palabras clave, escritas en español con letra *Times New Roman*, en negrita y cursiva.

Las palabras clave deben estar escritas en orden alfabético y ser de uso estandarizado, para lo cual se sugiere utilizar bases de datos internacionales según el área del conocimiento. Por ejemplo, en el área de eléctrica y electrónica se sugiere utilizar el tesoro de la Unesco que se puede encontrar en la página: <http://databases.unesco.org/thessp>

Abstract

Debe ser una traducción correcta y precisa al idioma inglés del texto que aparece en el resumen en español.

Key words

Debe ser una traducción correcta y precisa al idioma inglés de la lista de palabras clave en español.

Las *key words* 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 o World Bank que se pueden encontrar en las siguientes paginas: respectivamente: http://www.ieee.org/documents/2009Taxonomy_v101.pdf, <http://multites.net/mtsql/wb/site/default.asp>

Introducción

Debe describir el planteamiento general del trabajo, así como contexto, antecedentes, estado de arte de la temática abordada, 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 JPG o PNG 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).

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.
- ▶ Año entre paréntesis.
- ▶ Título del artículo.
- ▶ Nombre de la revista en cursiva.
- ▶ Volumen y número, o año y número de la revista.
- ▶ Páginas de referencia del artículo.

Ejemplo:

Weiming H., Tieniu T., Liang W. & Maybank, S. (2004). A survey on visual surveillance of object motion and behaviors. *IEEE Trans. Systems, Man, Cybern*, 34(3), 334–352.

Referencia de un libro: debe incluir la siguiente información en el orden descrito:

- ▶ Apellido del autor, iniciales del nombre del autor.
- ▶ Año entre paréntesis

- ▶ 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.
- ▶ Número de páginas, en caso de que aplique.

Ejemplo:

Hamilton, J. (1994). *Time series analysis*. New Jersey, United States of America: Princeton University Press.

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, y adjuntar 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 este 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:

- ▶ Envío del artículo acompañado de la carta de presentación y el formato de información por parte de los autores.
- ▶ Notificación al autor de correspondencia de la recepción del artículo.
- ▶ Verificación del tema del artículo con respecto a las áreas de interés de la revista.
- ▶ Verificación de las normas de presentación por parte del monitor de la revista.
- ▶ Notificación al autor de correspondencia de la evaluación de las normas de presentación.
- ▶ Envío de las correcciones realizadas por los autores con respecto a la evaluación de las normas de presentación.
- ▶ Envío del artículo a los árbitros seleccionados.
- ▶ Notificación del inicio del proceso de arbitraje del artículo.
- ▶ Notificación a los autores de la decisión tomada por el comité editorial y de las evaluaciones hechas por los árbitros.
- ▶ Envío de las correcciones realizadas por los autores con respecto a las evaluaciones de los árbitros.
- ▶ Estudio de la versión final del artículo y de las evaluaciones de los árbitros por parte del comité editorial.
- ▶ Envío por parte de los autores de la carta de cesión de derechos al editor de la revista.
- ▶ Envío de la versión con corrección de estilo y diagramada a los autores.
- ▶ Verificación de errores y aprobación final de la versión con corrección de estilo y diagramada por parte de los autores.
- ▶ Publicación del artículo en el número correspondiente de la revista *Tecnura*.
- ▶ Notificación a los autores de la publicación del número de interés.
- ▶ 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 febrero, mayo,

agosto y noviembre. Los artículos serán recibidos hasta la fecha máxima establecida en cada convocatoria.

Una vez recibidos los artículos el monitor de la revista realizará una primera evaluación de forma para verificar que cumplan con todos los elementos mencionados en esta guía de instrucciones a los autores. Luego de recibir nuevamente el artículo con las correcciones de forma solicitadas por el monitor de la revista, este será sometido a evaluación por tres pares académicos (paulatinamente se espera incorporar un mayor número de pares externos que participen en el proceso).

Cada artículo remitido a la revista *Tecnura* es revisado por dos pares académicos externos a la institución de los autores, mediante un proceso de "revisión entre pares" (*peer-review*) de doble-ciego, garantizando el anonimato de los autores y evaluadores. Se considera confidencial todo trabajo recibido y así se le exige a sus evaluadores.

Las posibles conclusiones de los resultados de la evaluación por parte de los árbitros son únicamente tres: publicar el artículo sin modificaciones, publicar el artículo con modificaciones o no publicar el artículo.

Posteriormente, el comité editorial toma la decisión de publicar o no los artículos, con base en los resultados de las evaluaciones realizadas por los árbitros asignados. En caso de existir contradicciones en las evaluaciones con respecto a la publicación de un artículo, el comité editorial enviará el artículo a un tercer árbitro y se inclinará por las dos evaluaciones que tengan el mismo concepto respecto a la publicación del artículo.

En cada convocatoria el autor de correspondencia debe sugerir al menos cuatro posibles evaluadores externos a su institución laboral, los cuales deben ser especialistas en el tema específico del artículo remitido, tener al menos maestría y por lo menos dos deben ser internacionales. Los posibles evaluadores pueden pertenecer a una universidad o industria, pública o privada; de estos se debe proporcionar el nombre completo, su formación académica más alta, su afiliación institucional y su correo electrónico. Estos cuatro potenciales evaluadores serán analizados por el comité editorial con el 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.

7. CONTACTO

Para cualquier solicitud de información adicional puede comunicarse a través del correo electrónico de la revista *Tecnura*: tecnura@udistrital.edu.co, 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, 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

1. SCOPE AND EDITORIAL POLICY OF THE JOURNAL
2. TYPE OF ACCEPTED ARTICLES
3. ARTICLE FORMAT
4. ARTICLE SUBMISSION
5. PUBLICATION PROCEDURE
6. ARBITRATION OF ARTICLE PROCESS
7. CONTACT

1. 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 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) 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

2. 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 critic perspective from the author, over a specific topic y 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.

3. ARTICLE FORMAT

3.1 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, technic 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.

3.2 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.

3.3 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 consecutives and without cutting words.
- ▶ Do not include page breaks or section finals.
- ▶ If you want to emphasize words or phrases from the text, do not use bold letters but italic.
- ▶ Decimals should be pointed with point (,) and not with coma (.), and thousands and millions with coma (,).

- ▶ Avoid footnotes.
- ▶ Arabic nomenclature must be used only until the third level.

3.4 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.

Key words:

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://multites.net/mtsql/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/thessp>

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).

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 States 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.

4. 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.

4.1 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.

4.2 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.

4.3 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.

5. 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:

- ▶ Delivery of the article with the cover letter and the information format by the authors.
- ▶ Notification to the author about the reception of the article.
- ▶ Verification of the presentation rules by the monitor of the journal.
- ▶ Notification to the author about the evaluation of the presentation rules.
- ▶ Submission of corrections made by the authors related to the evaluation of presentation rules.
- ▶ Submission of the articles to the selected arbitrators.
- ▶ Notification of the beginning of the arbitration process of the article.
- ▶ Notification to the authors about the decision made by the editorial committee, and of the evaluations made by the arbitrators.
- ▶ Delivery of the corrections made by the authors with respect to the evaluations made by the arbitrators.
- ▶ Study of the final version of the article and the evaluations of the arbitrators by the editorial committee.
- ▶ Delivery by the authors of the letter that surrenders right to the editor of the journal.
- ▶ Submission of the version with style corrections and diagrammed to the authors.
- ▶ Verification of errors and final approval of the version with style corrections and diagrammed by the authors.
- ▶ Publication of the article in the corresponding number of Tecnura journal.
- ▶ Notification to the authors of the number of interest.
- ▶ Delivery of a copy of the journal to each one of the authors of the published article.

6. ARTICLE ARBITARION 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 to 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

7. CONTACT

For any additional information request, please send an e-mail to Tecnura journal tecnura@udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com 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, tecnura@gmail.com

Web page: <http://tecnura.udistrital.edu.co>

ÍNDICE PERIÓDICO DE AUTORES

VOLUMEN 18
NÚMERO 39, 40 Y 41

2014

ABDEL KARIM HAY HARB

Ingeniero Electrónico, magíster en Ingeniería Electrónica. Docente emérito de la Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia. Contacto: karim.hay@javeriana.edu.co

Contacto: andresjaor@gmail.com

ARTURO FAJARDO JAIMES

Ingeniero Electrónico, magíster en Ingeniería Electrónica. Docente asistente de la Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia. Contacto: fajardo@javeriana.edu.co

ALEJANDRO CASTILLO RAMÍREZ

Ingeniero de Materiales. Estudiante de Maestría en Ingeniería de la Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. Contacto: alcara52@hotmail.com

B. CRISTINA PELAYO GARCÍA-BUSTELO

Engineer Informatic and Doctor in Computer Science. Researcher in University of Oviedo, Spain. Contact: crispelayo@uniovi.es

ÁLVARO JAVIER ÁVILA-DÍAZ

Ingeniero Agrícola, Universidad del Valle. Investigador del Grupo de Investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos y Suelos, IREHISA. Cali, Colombia. Contacto: alvaro.avila@correounivalle.edu.co

BYRON MEDINA DELGADO

Ingeniero Electrónico, Magíster en Ingeniería Electrónica. Docente, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia. Contacto: byronmedina@ufps.edu.co.

ANDRÉS GONZÁLEZ HASSIG

Ingeniero Mecánico, Magíster en Ingeniería de Energía Sustentable. Gerente Regeneración Ltda., Bogotá, Colombia. Contacto: andres.gonzalez@regeneracion.com.co

CARLOS A. LOZANO

Ingeniero Electricista, magíster en Ingeniería Eléctrica. Docente de la Universidad del Valle. Cali, Colombia. Contacto: carlos.a.lozano@correounivalle.edu.co

ANDRÉS JARAMILLO ORTIZ

Ingeniero en Mecatrónica. Auxiliar de investigación del grupo GAV en la Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia.

CARLOS ADRIÁN CORREA FLÓREZ

Ingeniero Electricista, magíster en Ingeniería Eléctrica. Profesor asistente de la Universidad de La Salle. Bogotá, Colombia. Contacto: carcorrea@unisalle.edu.co

CARLOS ALBERTO HIDALGO MORA

Ingeniero Electrónico de la Universidad Distrital, Asistente de Investigación del grupo LIFAE de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Contacto: carlosalbertohm@gmail.com

CARLOS ENRIQUE MONTENEGRO MARÍN

Engineer Informatic and Doctor in Computer Science. Researcher in Universidad Distrital "Francisco José de Caldas", Colombia. Contact: cemontenegrom@udistrital.edu.co

CÉSAR ALBERTO TORRES

Ingeniero eléctrico, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Grupo GCEM, Bogotá, Colombia. Contacto: catorress12@hotmail.com

CÉSAR AUGUSTO GARCÍA UBAQUE

Ingeniero Civil, Doctor en Ingeniería. Profesor Asistente Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Contacto: cagarciau@udistrital.edu.co

CÉSAR LEONARDO TRUJILLO RODRÍGUEZ

Ingeniero Electrónico, Magíster en Ingeniería Eléctrica, Doctor en Ingeniería Electrónica. Docente Asociado de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: cltrujillo@udistrital.edu.co

CESAR M. GALARZA

Ingeniero electrónico, magíster de Ingeniería Electrónica. Asistente de investigación de la Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia. Contacto: cesarmgb@gmail.com

CLAUDIA L. SÁNCHEZ

Ingeniera electrónica. Investigadora de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, Colombia. Contacto: claudia.sanchez-j@mail.escuelaing.edu.co

DANIEL ALEJANDRO ARANGO

Magíster en Ingeniería Electrónica, Pontificia Universidad Javeriana. Docente investigador, programa de Ingeniería Electrónica, Universidad Manuela Beltrán. Contacto: darangop@gmail.com

DANIEL E. RODRÍGUEZ

Ingeniero electrónico. Consultor junior área GBS-AP de IBM Colombia. Bogotá, Colombia. Contacto: daniel.rodriguez-m@mail.escuelaing.edu.co

DANILO ALFONSO LÓPEZ

Ingeniero Electrónico, magíster en Teleinformática. Docente e investigador de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: dalopezs@udistrital.edu.co

DANNY O. MALDONADO

Ingeniero electrónico. Ingeniero de Soporte de CRC Outsourcing. Bogotá, Colombia. Contacto: danny.maldonado@mail.escuelaing.edu.co

DIEGO MANOTAS

Ingeniero Industrial, magíster en Ingeniería Industrial. Docente de la Universidad del Valle. Cali, Colombia. Contacto: diego.manotas@correounivalle.edu.co

DIEGO MAURICIO ACERO SOTO

Electronic Engineer, Master Candidate in Information Sciences. Professor at the Universidad Pedagógica Nacional. Bogotá, Colombia. Contact: dacero@pedagogica.edu.co

EDUYN RAMIRO LÓPEZ-SANTANA

Ingeniero Industrial, especialista en Gestión de Proyectos de Ingeniería, Magíster en Ingeniería Industrial. Docente Facultad de Ingeniería Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Investigador del grupo de investigación Sistemas Expertos y Simulación. Bogotá, Colombia. Contacto: erlopezs@udistrital.edu.co

EDWARD ROLANDO NÚÑEZ-VALDEZ

Engineer Informatic and Doctor in Computer Science. Researcher in University of Oviedo, Spain. Contact: nunezedward@uniovi.es

EDWIN VILLARREAL LÓPEZ

Magíster en Automatización Industrial, Universidad Nacional de Colombia. Docente investigador, programa de Ingeniería Electrónica, Universidad Manuela Beltrán. Contacto: edvillal@gmail.com

ELBERTO CARRILLO RINCÓN

Ingeniero de Sistemas, magíster en Ciencias de la Computación. Profesor asociado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Contacto: elcarin@uis.edu.co

ELVER OMAR GALLO LANCHEROS

Ingeniero de Sistemas, candidato a magíster en Ingeniería de Sistemas e

Informática. Investigador de la Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. Contacto: omga27@gmail.com

ERNESTO GÓMEZ VARGAS

Ingeniero Electrónico, Magíster en Teleinformática. Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: egomezvargas@udistrital.edu.co

FABINTON SOTELO GÓMEZ

Ingeniero de Sistemas. Estudiante de Maestría en Ingeniería Telemática de la Universidad del Cauca y Docente de la Secretaría de Educación del Cauca. Cauca, Colombia. Contacto: fabinton.sotelo@unicauca.edu.co

FABIO EMIRO SIERRA VARGAS

Ingeniero Mecánico, magíster en Automatización Industrial, doctor en Ingeniería. Profesor titular de la Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. Contacto: feserrav@unal.edu.co

FERNANDO OJEDA RUIZ

Ingeniero Electrónico, magíster en Ingeniería Electrónica. Ingeniero de Investigación y Desarrollo de U y G Ingeniería S.A. Bogotá, Colombia. Contacto: fojeda@javeriana.edu.co

FERNANDO VILLADA DUQUE

Ingeniero Electricista. Docente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. Contacto: fvillada@udea.edu.co

FRANCISCO SANTAMARÍA

Ingeniero electricista, doctor en Ingeniería. Profesor Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Grupo GCEM, Bogotá, Colombia. Contacto: fsantamariap@udistrital.edu.co

FREDY HERNÁN MARTÍNEZ SARMIENTO

Electrical Engineer, Ph.D. Candidate in Engineering. Professor at the Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contact: fhmartinez@udistrital.edu.co

GABRIEL FERNANDO TALERO ROJAS

Ingeniero Mecánico, Ingeniero de Proyectos Regeneración Ltda., Bogotá, Colombia. Contacto: gabriel.talero@regeneración.com.co

GABRIEL PERILLA GALINDO

Ingeniero Electrónico, magíster en Ingeniería Electrónica. Docente asistente de la Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia. Contacto: gabriel.perilla@javeriana.edu.co

GERMÁN ANDRÉS MÉNDEZ-GIRALDO

Ingeniero Industrial, Doctor en Ciencias Técnicas. Docente Facultad de Ingeniería Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Director del grupo de investigación Sistemas Expertos y Simulación. Bogotá, Colombia. Contacto: gmendez@udistrital.edu.co.

GUSTAVO ADOLFO PUERTO LEGUIZAMÓN

Ingeniero de Telecomunicaciones, Doctor en Telecomunicaciones, Docente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Contacto:

gapuerto@udistrital.edu.co

HANS RAÚL MÁRQUEZ RAMOS

Ingeniero Electrónico. Joven Investigador Colciencias 2011, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: hans_marquez@hotmail.com

HÉCTOR CRISTYANMANTA CARO

Ingeniero Electrónico, magíster en Teleinformática. Investigador de la Universidad de Granada. España. Contacto: cristyan.manta@gmail.com

HERNÁN PAZ PENAGOS

Ingeniero electrónico, ingeniero electricista, filósofo, magíster en Teleinformática, doctor en Educación. Docente de Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, Colombia. Contacto: hernan.paz@escuelaing.edu.co

HERNÁN PORRAS DÍAZ

Ingeniero Civil, doctor en Ingeniería Telemática. Docente e investigador de la Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. Contacto: hporras@uis.edu.co

JAIME ALEJANDRO VALENCIA VELÁSQUEZ

Ingeniero Electricista. Docente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. Contacto: jvalenci@udea.edu.co

JAIME ANDRÉS VALLEJO AVELLANEDA

Estudiante Facultad de Ingeniería, Ingeniería Electrónica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Contacto: javallejoa@correo.udistrital.edu.co

JAVIER DE LA HOZ FREYLE

Estudiante de maestría en Ingeniería de Sistemas e Informática. Ingeniero de Sistemas, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Contacto: javierdlahoz@gmail.com

JAVIER FERNANDO CAMACHO TAUTA

Ingeniero Civil, Doctor. Profesor Asociado, Programa de Ingeniería Civil, Investigador Grupo Geotecnia, Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia. Contacto: javier.camacho@unimilitar.edu.co

JESÚS D. GONZÁLEZ-LLORENTE

Ingeniero electrónico, especialista en Ingeniería de Software, magíster en Ingeniería Eléctrica, Docente Investigador en la Universidad Sergio Arboleda. Bogotá, Colombia. Contacto: jesusd.gonzalez@correo.usa.edu.co

JHON JAIME RAMÍREZ OCHOA

Estudiante Facultad de Ingeniería, Ingeniería Electrónica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Contacto: jjramirezo@correo.udistrital.edu.co

JHON JAIRO CÁCERES JIMÉNEZ

Ingeniero de Sistemas, doctor en Ingeniería Civil. Docente e investigador de la Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. Contacto: jcaceres@uis.edu.co

JOHANN ALEXANDER HERNÁNDEZ MORA

Ingeniero Electricista, magíster en Ingeniería Eléctrica, Doctor en Ingeniería Eléctrica. Docente asistente de la Universidad Distrital Francisco José de

Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: jahernandezm@udistrital.edu.co

JORDÁN PASCUAL ESPADA

Engineer Informatic and Doctor in Computer Science. Researcher in University of Oviedo, Spain. Contact: pascualjordan@uniovi.es

JORGE EDUARDO ARANGO GÓMEZ

Ingeniero Mecánico, magíster en Motores de Combustión Interna, magíster en Automatización. Profesor asistente de la Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. Contacto: jearangogo@unal.edu.co

JOSÉ DANILO RAIRÁN ANTOLINES

Electrical Engineer, Ph.D. Candidate in Engineering at Universidad Nacional de Colombia. Professor at the Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contact: drairan@udistrital.edu.co

JOSÉ ROBERTO CÁRDENAS CASTIBLANCO

Ingeniero Electrónico, Magister en Teleinformática, Doctor en Ingeniería. Profesor asociado de la Maestría en Ciencias de la Información y las Comunicaciones de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto rcardenas@udistrital.edu.co

JUAN JOSÉ MORA-FLÓREZ

Ingeniero electricista, doctor en Ingeniería Eléctrica. Docente titular de la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP). Pereira, Colombia. Contacto: jjmora@utp.edu.co

JUAN MANUEL CUEVA LOVELLE

Engineer Informatic and Doctor in Computer Science. Researcher in University of Oviedo, Spain. Contact: cueva@uniovi.es

JUAN SEBASTIÁN BOTERO VALENCIA

Ingeniero Electrónico. Investigador del Instituto Tecnológico Metropolitano. Medellín, Colombia. Contacto: juanbotero@itm.edu.co

LORENA CARDONA RENDÓN

Ingeniera Mecánica, magíster en Ingeniería. Investigadora de la Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. Contacto: lcardon0@unalmed.edu.co

LUIS ALBERTO PAREDES CHÉRREZ

Ingeniero Civil. Auxiliar de Investigación, Programa de Ingeniería Civil, Grupo Geotecnia, Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia. Contacto: u1100719@unimilitar.edu.co

LUIS CARLOS GÓMEZ FLÓREZ

Ingeniero de Sistemas, magíster en Ciencias de la Computación. Profesor titular, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Contacto: lcgomezf@uis.edu.co

LUIS LEONARDO CAMARGO ARIZA

Ingeniero Electrónico, Magíster en Ingeniería Electrónica. Docente, Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia. Contacto: lcamargoa@unimagdalena.edu.co.

MAIRA CECILIA GASCA MANTILLA

Ingeniero Electrónico, Magíster en Mantenimiento Industrial. Docente, Universidad Antonio Nariño, Santa Marta, Colombia. Contacto: magasca@uan.edu.co.

MARÍA C. BOHÓRQUEZ

Ingeniera electrónica. Analista Mesa de Ayuda del Banco AV Villas. Bogotá, Colombia. Contacto: maria.bohorquez@mail.escuelaing.edu.co

MARIELA CASTIBLANCO ORTIZ

Electronic Engineer, Master Candidate in Industrial Engineer. Professor at the Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contact: marielacastiblanco@gmail.com

MARIO FERNANDO SOLARTE

Magíster en Ingeniería Área Telemática. Profesor de planta de la Universidad del Cauca. Cauca, Colombia. Contacto: msolarte@unicauca.edu.co

MIRNA JIRÓN POPOVA

Candidata a Doctora en Educación, Magistra en Educación, Magíster en Ingeniería Mecánica, Ing. Mecánico. Docente Asociado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: mjiron@udistrital.edu.co.

MÓNICA SÁNCHEZ

Ingeniera Industrial, magíster en Ingeniería Eléctrica. Ingeniera de EPSA. Cali, Colombia. Contacto: msanchez@epsa.com.co

NELSON LEONARDO DÍAZ ALDANA

Ingeniero Electrónico, Magíster en Automatización Industrial. Docente Asistente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: nldiaza@udistrital.edu.co

NELSON OBREGÓN NEIRA

Ingeniero Civil, Doctorado en Hidráulica. Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia. Contacto: nobregon@javeriana.edu.co

NELSON ENRIQUE VERA PARRA

Ingeniero Electrónico, magíster en Teleinformática. Docente e investigador de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: neverap@udistrital.edu.co

OLGA LUCÍA RAMOS

Ingeniero electrónico y magíster en Teleinformática. Docente Investigador grupo GAV, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia. Contacto: olga.ramos@unimilitar.edu.co

OMAR IVÁN TREJOS BURITICÁ

Ingeniero de Sistemas y Doctor en Ciencias de la Educación. Docente de planta, Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia. Contacto: omartrejos@utp.edu.co

OSCAR IGNACIO SÁNCHEZ

Ingeniero eléctrico, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Grupo GCEM, Bogotá, Colombia. Contacto: os_carsa@hotmail.com

ÓSCAR JAVIER REYES ORTIZ

Ingeniero Civil, Doctor. Profesor Titular, Programa de Ingeniería Civil, - Líder Grupo Geotecnia, Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia. Contacto: oscar.reyes@unimilitar.edu.co

PAULA ANDREA ORTIZ VALENCIA

Ingeniera en Instrumentación y Control, magíster en Ingeniería. Docente e investigador del Instituto Tecnológico Metropolitano. Medellín, Colombia. Contacto: paulaortiz@itm.edu.co

RICARDO ANDRÉS BOLAÑOS OCAMPO

Ingeniero Electricista, magíster en Ingeniería Eléctrica. Analista Coordinación de Operación de XM Filial de ISA. Bogotá, Colombia. Contacto: rabolanos@xm.com.co

ROBINSON JIMÉNEZ M.

Ingeniero electrónico y magíster en Automatización Industrial. Docente Investigador grupo GAV, Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia. Contacto: robinson.jimenez@unimilitar.edu.co

SANDRA MILENA PÉREZ-LONDOÑO

Ingeniera electricista, doctora en Ingeniería. Docente titular de la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP). Pereira, Colombia. Contacto: saperez@utp.edu.co

SERGIO A. ROJAS

Systems Engineer, Ph.D. in Computer Science, Assistant Professor at the Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contact: srojas@udistrital.edu.co

SERGIO ENRIQUE GUTIÉRREZ SERNA

Ingeniero Agrícola, Universidad del Valle. Investigador del Grupo de Investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos y Suelos, IREHISA. Cali, Colombia. Contacto: serguti@univalle.edu.co

VICENTE GARCÍA-DÍAZ

Engineer Informatic and Doctor in Computer Science. Researcher in University of Oviedo, Spain. Contact: garciavicente@uniovi.es

**VIRGILIO SANTANDER SOCORRAS
QUINTERO**

Ingeniero Electrónico y de Telecomunicaciones. Estudiante de Maestría en Teleinformática, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: vssocarrasq@correo.udistrital.edu.co

VLADIMIR SILVA LEAL

Ingeniero Mecánico, magíster en Ingeniería Mecánica. Investigador de la Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. Contacto: vsilval@unal.edu.co

WALTER JULIÁN GIL-GONZÁLEZ

Ingeniero electricista, candidato a magíster en Ingeniería Eléctrica. Investigador del Grupo de Investigación en Calidad de Energía Eléctrica y Estabilidad de la Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia. Contacto: wjgil@utp.edu.co

WILLIAM ANDRÉS VALLEJO LOZADA

Químico, Doctor en Química. Docente de la Universidad del Atlántico. Barran-

quilla, Colombia. Contacto: williamvallejo@mail.uniatlantico.edu.co

YESID CARVAJAL ESCOBAR

Ingeniero Agrícola. Doctor en Ingeniería. Profesor Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente. Universidad del Valle. Director del Grupo de Investigación Ingeniería de Recursos Hídricos y Suelos, IREHISA. Cali, Colombia. Contacto: yesid.carvajal@correounivalle.edu.co

ÍNDICE PERIÓDICO DE ARTÍCULOS

VOLUMEN 18

NÚMERO 39, 40 Y 41

2014

- ▶ A BRIEF INTRODUCTION TO MODEL-DRIVEN ENGINEERING
- ▶ A STUDY ON THE MULTIPLE DYNAMIC WAVELENGTH DISTRIBUTION FOR GIGABIT CAPABLE PASSIVE OPTICAL NETWORKS
- ▶ ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE EL NIÑO Y LA NIÑA EN LA OFERTA HÍDRICA MENSUAL DE LA CUENCA DEL RÍO CALI
- ▶ ANÁLISIS DEL PROCESAMIENTO DE LOS DATOS DE ENTRADA PARA UN LOCALIZADOR DE FALLAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN
- ▶ ANÁLISIS EXPLORATORIO DE INVESTIGACIONES SOBRE LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA QUE TRABAJAN CON BIOGÁS
- ▶ ARQUITECTURAS DE RADIO COGNITIVA: UNA REVISIÓN ACTUAL
- ▶ AUTONOMOUS NAVIGATION STRATEGY FOR ROBOT SWARMS USING LOCAL COMMUNICATION
- ▶ CALIBRACIÓN DE IMÁGENES DE RADARES METEOROLÓGICOS
- ▶ COMPARACIÓN DE LAS NORMAS NTC 4552 DE 2008 E IEC 62305 DE 2010 PARA EL ANÁLISIS DE RIESGO
- ▶ COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS DENSAS A PARTIR DEL ENSAYO DE VIGA SEMICIRCULAR SIMPLEMENTE APOYADA
- ▶ DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADORES LINEALES PARA REGULACIÓN DEL BUS DC EN CONVERTIDORES VSC PARA HVDC
- ▶ DISEÑO MULTIOBJETIVO DE UN SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO - SOLAR CON BATERÍAS PARA ZONAS NO INTERCONECTADAS
- ▶ ESTIMACIÓN DE LA CANTIDAD DE POTENCIA SUMINISTRADA POR LAS CELDAS FOTOVOLTAICAS DE UN CUBESAT
- ▶ ESTRATEGIAS PARA EL ENTRENAMIENTO DE REDES NEURONALES DE NÚMEROS DIFUSOS
- ▶ ESTUDIO DE PLANTA PILOTO PARA PELETIZACIÓN DE RESIDUOS MADEREROS Y SU UTILIZACIÓN COMO COMBUSTIBLE EN HORNOS LADRILLEROS
- ▶ INCORPORACIÓN DE RECURSOS WEB COMO SERVICIOS DE E-LEARNING AL SISTEMA DE GESTIÓN DE APRENDIZAJE .LRN: UNA REVISIÓN

- ▶ INNOVACIÓN EMPRESARIAL. ARTE Y CIENCIA EN LA CREACIÓN DE EMPRESAS
- ▶ INSPECCIÓN DE CALIDAD PARA UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN INDUSTRIAL BASADO EN EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES
- ▶ MEJORAMIENTO DE LA TÉCNICA ATPM PARA REDUCCIÓN DE INTERFERENCIA EN SISTEMAS DE BANDA ANCHA POR LÍNEA DE POTENCIA EN RESIDENCIAS
- ▶ MEMORIAS ORGANIZACIONALES EN LA ERA DEL ALMACENAMIENTO EN LA NUBE
- ▶ METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DE APLICACIONES MÓVILES
- ▶ METODOLOGÍA PARA EL PRONÓSTICO DE LA DEMANDA EN AMBIENTES MULTIPRODUCTO Y DE ALTA VARIABILIDAD
- ▶ MODELADO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MANEJADOR ELÉCTRICO PARA UN MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO
- ▶ MODELAMIENTO DE LA IRRADIANCIA Y LA TEMPERATURA AMBIENTE UTILIZANDO FUNCIONES DE PROBABILIDAD
- ▶ MODELO DE VALORACIÓN DE RIESGO FINANCIERO EN LA GESTIÓN DE CONTRATOS DE SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA
- ▶ MODELO TEST-BED DE SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN DE CRIPTOGRAFÍA DE CURVA ELÍPTICA EN REDES IPV6 DE PRÓXIMA GENERACIÓN
- ▶ MODELOS URBANOS TRIDIMENSIONALES GENERADOS A PARTIR DE NUBES DE PUNTOS DE UN ESCÁNER LÁSER TERRESTRE
- ▶ PLANEAMIENTO DE LA TRANSMISIÓN CONSIDERANDO SEGURIDAD E INCERTIDUMBRE EN LA DEMANDA EMPLEANDO PROGRAMACIÓN NO LINEAL Y TÉCNICAS EVOLUTIVAS
- ▶ RECONSTRUCTION OF PERIODIC SIGNALS USING NEURAL NETWORKS
- ▶ RELACIONES DE APRENDIZAJE SIGNIFICATIVO ENTRE DOS PARADIGMAS DE PROGRAMACIÓN A PARTIR DE DOS LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN
- ▶ SISTEMA DE NAVEGACIÓN PARA UN ROBOT LIMPIADOR DE PISCINAS
- ▶ TECNOLOGÍA RADIO COGNITIVA EN LA BANDA ULTRA HIGH FREQUENCY (UHF)
- ▶ TECNOLOGÍA, INGENIERÍA Y CICLOS DE FORMACIÓN
- ▶ TOWARDS AUTOMATIC RECOGNITION OF IRREGULAR, SHORT-OPEN ANSWERS IN FILL-IN-THE-BLANK TESTS

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 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 y 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, 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:

Region	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 and 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 García 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, tecnura@gmail.com

