

Contenido

EDITORIAL	11
INVESTIGACIÓN	
Estudio comparativo de cinco estrategias de compensación de armónicos en filtros activos de potencia	15
A comparative study of five methods of harmonics compensation in active power filters JESSER JAMES MARULANDA DURANGO, ANDRÉS ESCOBAR MEJÍA, ALFONSO ALZATE GÓMEZ	
Comparative analysis of threshold voltage extraction techniques based in the MOSFET gm/ID characteristic	32
Comparación de las técnicas de extracción del voltaje de umbral basadas en la característica gm/ID del MOSFET ARTURO FAJARDO JAIMES	
Further compression of focal plane array in compressive spectral imaging architectures	45
Compresión adicional de los datos del plano focal en arquitecturas de sensado comprimido en imágenes espectrales JEISON MARÍN ALFONSO, LEONARDO BETANCUR AGUDELO, HENRY ARGUELLO FUENTES	
A quantitative and qualitative performance analysis of compressive spectral imagers	53
Una comparación cuantitativa y cualitativa de análisis de rendimiento de las cámaras espectrales compresiva FERLEY MEDINA ROJAS, HENRY ARGUELLO FUENTES, CRISTINA GÓMEZ SANTAMARÍA	
Multichannel assignment using K-Means in cognitive radio networks	68
Asignación multicanal usando K-Means en redes de radio cognitiva HANS MARQUEZ, CAMILA SALGADO, CÉSAR HERNÁNDEZ	
Metodología para el monitoreo estructural y patológico de viviendas afectadas por deslizamientos	79
Structural and pathological monitoring methodology for homes affected by landslides SERGIO GIOVANNY VALBUENA PORRAS, CÉSAR AUGUSTO GARCÍA-UBAQUE, MARTHA ALEJANDRA GRANADOS SOLER	
ESTUDIO DE CASO	
Aplicación de modelo ARIMA para el análisis de series de volúmenes anuales en el río Magdalena	88
Applying ARIMA model for annual volume time series of the Magdalena River GLORIA AMARIS, HUMBERTO ÁVILA, THOMAS GUERRERO	
Priorización de despachos con AHP difuso y Topsis	102
Dispatch prioritization using fuzzy AHP and Topsis MARÍA ISABEL HERNÁNDEZ SANTIBÁÑEZ, LUISA FERNANDA GIRALDO CORREA, LIZETH ALEJANDRA GAVIRIA RAMÍREZ, ÁNGELA MARÍA WILCHES DAVID, JUAN CARLOS OSORIO GÓMEZ	
Procesamiento en paralelo y distribuido en dos SGBDS: un caso de estudio	111
Parallel and distributed processing in two SGBDS: A case study FRANCISCO JAVIER MORENO ARBOLEDA, NATALY CASTRILLÓN CHARARI, CAMILO TABORDA ZULUAGA	
REVISIÓN DE TEMA	
Diagnóstico tecnológico del uso de dispositivos programables en la industria boyacense. Caso de estudio: cadena agroindustrial de la panela	130
Technological diagnosis of the use of programmable devices in the boyaca industry: Case study – panela's agroindustrial chain ILBER ADONAYT RUGE RUGE, WILSON JAVIER PÉREZ HOLGUÍN	
Instrucciones para los autores	148
Instructions for authors	156
SUSCRIPCIÓN	164
SIGN UP	165

Tecnura

p-ISSN: 0123-921X
Volumen 21 - Número 52
Abril - Junio de 2017

Revista Tecnura • Volumen 21 – Número 52 • Abril - Junio de 2017
p-ISSN: 0123-921X • e-ISSN: 2248-7638 • Bogotá D.C. Colombia

Tecnura

Tecnología y cultura, afirmando el conocimiento

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad Tecnológica

Estudio comparativo de cinco estrategias de compensación de armónicos en filtros activos de potencia

Multichannel assignment using K-Means in cognitive radio networks

Aplicación de modelo ARIMA para el análisis de series de volúmenes anuales en el río Magdalena

Procesamiento en paralelo y distribuido en dos SGBDS: un caso de estudio



Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad Tecnológica



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Tecnura

Tecnología y cultura, afirmando el conocimiento

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad Tecnológica

Vol. 21 No. 52
Abril - Junio de 2017
p-ISSN: 0123-921X
e-ISSN: 2248-7638



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

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

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

EDITOR

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

COMITÉ EDITORIAL

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

COMITÉ CIENTÍFICO

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

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

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

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

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

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

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

EVALUADORES

PhD. Carlos Alberto Restrepo Patiño
Universidad de Talca. Chile

PhD. Cesar Augusto Orozco Henao
Universidad del Norte, Colombia

PhD. César Augusto Vargas García
University of Delaware, Estados Unidos

PhD. Fernando Sánchez Lasheras
Universidad de Oviedo, España

PhD. Jeison Marín Alfonso
Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia

PhD. Surayne Torres López
Universidad de las Ciencias Informáticas. Cuba

PhD. Yeleny Zulueta Véliz
Reparto Novia del Mediodía. Cuba

MEng. Alfredo Chacón García
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

MEng. Andrés Ricardo Herrera Orozco
Universida de Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

MEng. Catalina Gonzáles Castaño
Universitat Rovira I Viegili, España

MEng. Cristian Camilo Viasus Figueredo
Universidad de los Andes, Colombia

MEng. Geovanny Alberto Marulanda García
Universidad de la Salle, Colombia

MEng. Jaiber Evelio Cardona Aristizabal
Universidad del Quindío, Colombia

MEng. Javier Villahermosa Jaén
Consejo de Agricultura Ecológica de la Región de Murcia, España

MEng. Mauricio Hernandez Sarabia
Universidad de Ibagué, Colombia

MEng. Yolanda Parra Guacaneme
Universidad de Cundinamarca, Colombia

Esp. Laura Ximena Giral
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Esp. Rafael Alberto Fino Sandoval
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

ASISTENTES DE LA REVISTA TECNURA

MEng. Diego Armando Giral Ramírez

COORDINACIÓN EDITORIAL

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

Tecnura

Vol. 21 No. 52

Abril - Junio de 2017

REVISTA *TECNURA*

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

PERIODICIDAD

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

COBERTURA TEMÁTICA

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

MISIÓN

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

PÚBLICO OBJETIVO

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

INDEXACIÓN

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

FORMA DE ADQUISICIÓN

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

SUSCRIPCIÓN

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

REPRODUCCIÓN

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

DIRECCIÓN POSTAL

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

DISEÑO ORIGINAL

Julián Hernández-Taller de Diseño

CORRECCIÓN DE ESTILO PARA ESPAÑOL

Fernando Carretero Padilla

CORRECCIÓN DE ESTILO PARA INGLES

Laura Ximena García

DIAGRAMACIÓN Y DISEÑO DE CUBIERTA

Julián Hernández-Taller de Diseño
director@julianhernandez.co

IMPRESIÓN

Imprenta Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Formato: 21.5 x 28 cm
Papel: Bond 75g
Fuente: Optima LT Std
Tiraje: 400 ejemplares



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

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

EDITOR

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

EDITORIAL COMMITTEE

Ph.D. Ing. Electo Eduardo Silva
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

PhD. Carlos Alberto Restrepo Patiño
Universidad de Talca, Chile

PhD. Cesar Augusto Orozco Henao
Universidad del Norte, Colombia

PhD. César Augusto Vargas García
University of Delaware, Estados Unidos

PhD. Fernando Sánchez Lasheras
Universidad de Oviedo, España

PhD. Jeison Marín Alfonso
Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia

PhD. Surayne Torres López
Universidad de las Ciencias Informáticas, Cuba

PhD. Yeleny Zulueta Véliz
Reperto Novia del Mediodía, Cuba

MEng. Alfredo Chacón García
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

MEng. Andrés Ricardo Herrera Orozco
Universida de Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

MEng. Catalina Gonzáles Castaño
Universitat Rovira I Viegili, España

MEng. Cristian Camilo Viasus Figueredo
Universidad de los Andes, Colombia

MEng. Geovanny Alberto Marulanda García
Universidad de la Salle, Colombia

MEng. Jaiber Evelio Cardona Aristizabal
Universidad del Quindío, Colombia

MEng. Javier Villahermosa Jaén
Consejo de Agricultura Ecológica de la Región de Murcia, España

MEng. Mauricio Hernandez Sarabia
Universidad de Ibagué, Colombia

MEng. Yolanda Parra Guacaneme
Universidad de Cundinamarca, Colombia

Esp. Laura Ximena Giral
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Esp. Rafael Alberto Fino Sandoval
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

TECNURA JOURNAL ASSISTANTS

MEng. Diego Armando Giral Ramírez

EDITORIAL COORDINATION

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

Tecnura

Vol. 21 No. 52

April - June of 2017

TECNURA JOURNAL

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

PERIODICITY

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

THEMATIC COVERAGE

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

MISSION

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

TARGET AUDIENCE

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

INDEXING

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

FORM OF ACQUISITION

Tecnura journal is available through purchase, exchange or subscription.

SIGN UP

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

REPRODUCTION

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

POSTAL ADDRESS

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

ORIGINAL DESIGN

Julián Hernández - Taller de Diseño
director@julianhernandez.co

STYLE CORRECTION IN SPANISH

Fernando Carretero Padilla

STYLE CORRECTION IN ENGLISH

Laura Ximena García

LAYOUT AND TITLE PAGE DESIGN

Julián Hernández - Taller de Diseño

PRINTED BY

Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas Press
Format: 21.5 x 28 cm
Paper: Bond 75g
Font: Optima LT Std
Printing: 400 copies

DECLARACIÓN DE ÉTICA Y BUENAS PRÁCTICAS

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

Obligaciones y responsabilidades generales del equipo editorial

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

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

Relaciones con los lectores

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

Relaciones con los autores

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

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

Relaciones con los evaluadores

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

Proceso de evaluación por pares

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

Reclamaciones

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

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

Fomento de la integridad académica

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

Protección de datos individuales

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

Seguimiento de malas prácticas

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

Integridad y rigor académico

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

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

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

Relaciones con los propietarios y editores de revistas

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

Conflicto de intereses

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

Quejas/denuncias

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

CODE OF ETHICS AND GOOD PRACTICE

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

General duties and responsibilities of the editorial board

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

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

Relations with authors

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

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

Relations with evaluators

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

Peer review process

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

Claims

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

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

Promoting Academic Integrity

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

Protection of individual data

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

Tracking malpractice

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

Integrity and academic rigour

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

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

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

Relations with owners and journal editors

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

Conflict of interest

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

Complaints / allegations

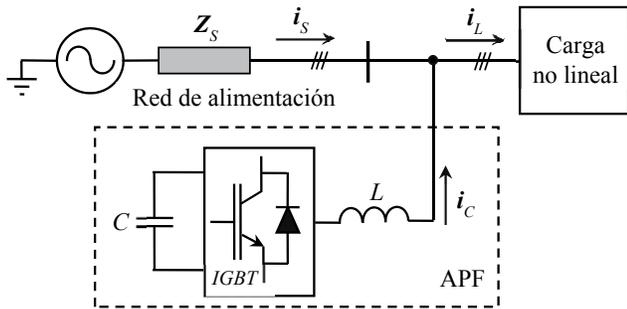
Any author, reader, reviewer or editor may refer their complaints to the competent authorities.

Contenido

EDITORIAL

11

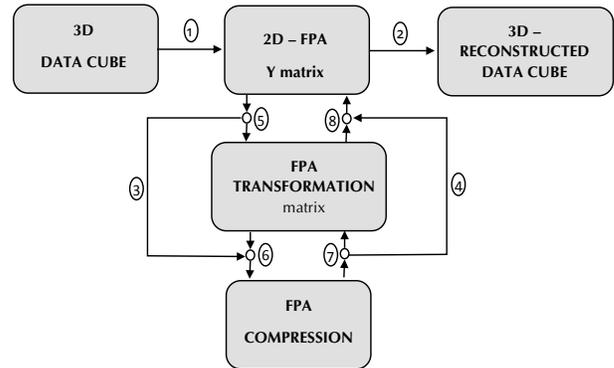
INVESTIGACIÓN



Estudio comparativo de cinco estrategias de compensación de armónicos en filtros activos de potencia 15

A comparative study of five methods of harmonics compensation in active power filters

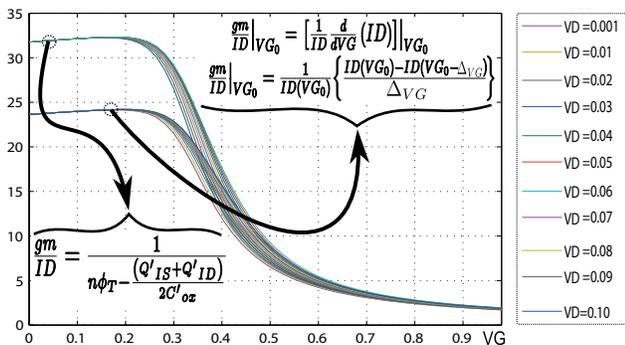
JESSER JAMES MARULANDA DURANGO, ANDRÉS ESCOBAR MEJÍA, ALFONSO ALZATE GÓMEZ



Further compression of focal plane array in compressive spectral imaging architectures 45

Compresión adicional de los datos del plano focal en arquitecturas de sensado comprimido en imágenes espectrales

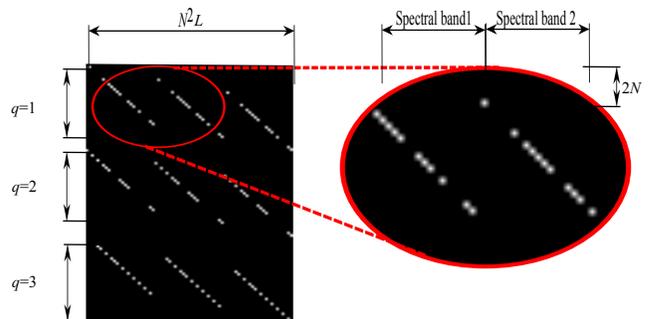
JEISON MARÍN ALFONSO, LEONARDO BETANCUR AGUDELO, HENRY ARGUELLO FUENTES



Comparative analysis of threshold voltage extraction techniques based in the MOSFET gm/ID characteristic 32

Comparación de las técnicas de extracción del voltaje de umbral basadas en la característica gm/ID del MOSFET

ARTURO FAJARDO JAIMES



A quantitative and qualitative performance analysis of compressive spectral imagers 53

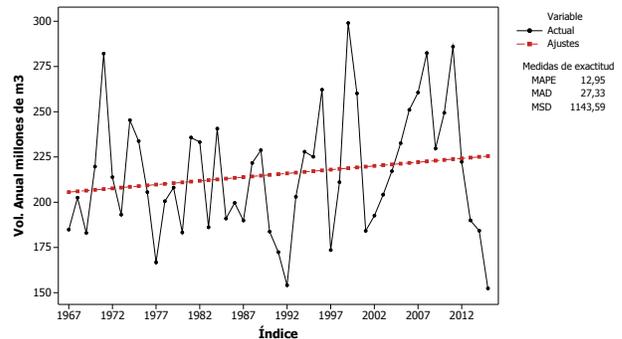
Una comparación cuantitativa y cualitativa de análisis de rendimiento de las cámaras espectrales compresiva

FERLEY MEDINA ROJAS, HENRY ARGUELLO FUENTES, CRISTINA GÓMEZ SANTAMARÍA

ESTUDIO DE CASO

Serie anual de volúmenes del río Magdalena - Estación Calamar (K115)

Modelo de tendencia lineal
 $Y_t = 205.2 + 0.414 * t$

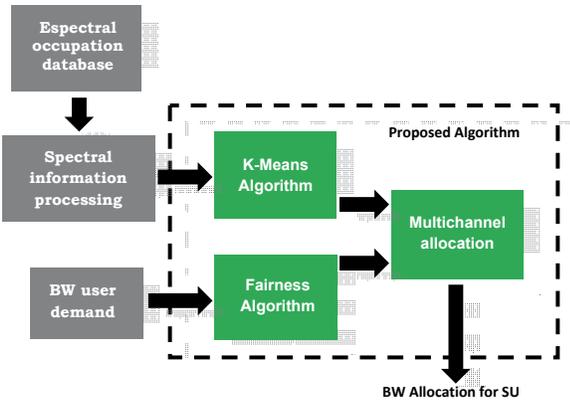


Aplicación de modelo ARIMA para el análisis de series de volúmenes anuales en el río Magdalena

88

Applying ARIMA model for annual volume time series of the Magdalena River

GLORIA AMARIS, HUMBERTO ÁVILA, THOMAS GUERRERO



Multichannel assignment using K-Means in cognitive radio networks

68

Asignación multicanal usando K-Means en redes de radio cognitiva

HANS MARQUEZ, CAMILA SALGADO, CESAR HERNÁNDEZ

C. REGISTRO FOTOGRAFICO



D. EVALUADOR :

nicifuentes@correo.udistrital.edu.co

Metodología para el monitoreo estructural y patológico de viviendas afectadas por deslizamientos

79

Structural and pathological monitoring methodology for homes affected by landslides

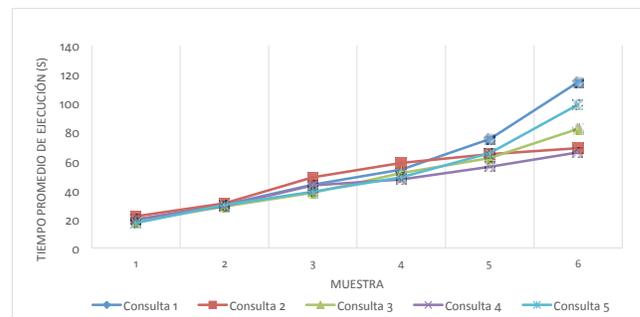
SERGIO GIOVANNY VALBUENA PORRAS, CÉSAR AUGUSTO GARCÍA-UBAQUE, MARTHA ALEJANDRA GRANADOS SOLER

Priorización de despachos con AHP difuso y Topsis

102

Dispatch prioritization using fuzzy AHP and Topsis

MARÍA ISABEL HERNÁNDEZ SANTIBÁÑEZ, LUISA FERNANDA GIRALDO CORREA, LIZETH ALEJANDRA GAVIRIA RAMÍREZ, ÁNGELA MARÍA WILCHES DAVID, JUAN CARLOS OSORIO GÓMEZ



Procesamiento en paralelo y distribuido en dos SGBDS: un caso de estudio

111

Parallel and distributed processing in two SGBDS: A case study

FRANCISCO JAVIER MORENO ARBOLEDA, NATALY CASTRILLÓN CHARARI, CAMILO TABORDA ZULUAGA

REVISIÓN DE TEMA

Potencia de Negocios ↑	IV • Actividades servicios sociales • Industria manufacturera (metalurgia básica, muebles, productos químico)	I • Agroindustria • Turismo • Minero-energético • Transporte
	III	II • Artesanías • Logística y comunicaciones • Comercio • TIC • Siderurgia
	Entorno Favorable →	

Instrucciones para los autores 148

Instructions for authors 156

SUSCRIPCIÓN 164

SIGN UP 165

Diagnóstico tecnológico del uso de dispositivos programables en la industria boyacense. Caso de estudio: cadena agroindustrial de la panela 130

Technological diagnosis of the use of programmable devices in the boyaca industry: Case study – panela’s agroindustrial chain

ILBER ADONAYT RUGE RUGE, WILSON JAVIER PÉREZ
HOLGUÍN

El uso sustentable del agua se define como “el uso de agua que permite sostener a una sociedad para que perdure y se desarrolle en un futuro indefinido sin alterar la integridad del ciclo hidrológico y de los ecosistemas que dependan de él” (Gleick *et al.*, 1996, citado por Cervera, 2007). El seguimiento a la sostenibilidad del uso del agua es fundamental para orientar la gestión pública y privada del recurso hídrico, para garantizar el suministro de este recurso natural y la sostenibilidad del mismo (Posada *et al.*, 2005). La oferta hídrica neta hace referencia al agua que el hombre puede llegar a usar para sus diferentes usos como: agricultura, industria, doméstico, recreación o bienes y servicios. (Samboni *et al.*, 2011). Esta oferta se ve cada día más afectada por las actividades humanas, las cuales disminuyen su suministro. La determinación de la calidad de un cuerpo de agua usualmente se lleva a cabo por medio del análisis de una cantidad grande de indicadores que normalmente se expresan en diferentes rangos, distintas unidades y tienen diferente comportamiento en términos de la relación entre concentración e impacto (Damo & Icka, 2013).

Por ello, es de suma importancia conocer los índices de calidad de agua (ICA) para poder proponer un nuevo índice que se ajuste a las condiciones ambientales de los ecosistemas de Bogotá y de sus ríos, para la toma de decisiones e implementación de políticas públicas ambientales. Los ICA fueron propuestos inicialmente por Horton en 1965 (García, 2012), a partir de la década de 1970 estos índices adquieren importancia en la evaluación del recurso hídrico; su uso es cada vez más popular para identificar las tendencias integradas a cambios de la calidad del agua (Torres *et al.*, 2010). Muchos países a nivel mundial han desarrollado diferentes ICA que permiten evaluar la calidad del agua. Según Cervera (2007), los indicadores son desarrollados a partir de un modelo sistemático que incorpora los componentes principales de un sistema sustentable.

Numerosas investigaciones se han realizado a cerca de los ICA. El trabajo realizado por Torres *et al.* (2010) reúne información pertinente de los ICA en fuentes superficiales donde realiza una comparación de las ventajas y limitaciones de los ICA, junto con la evolución de los mismos; además aplica estos ICA orientados al uso de la fuente para consumo humano (Torres *et al.*, 2010). Por otro lado, los intentos para lograr construir un índice que permita calificar la calidad del agua tienen bastante historia; por ejemplo, existe información de que en Alemania, en 1848, ya se realizaban algunos intentos para relacionar la presencia de organismos biológicos con la pureza del agua (Benez *et al.*, 2010).

Uno de los índices para medir la calidad de aguas superficiales es el índice holandés de valoración de la calidad para los cuerpos de agua superficiales. El índice se basa en la obtención de un puntaje de acuerdo a varios parámetros analizados: la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), el oxígeno disuelto (OD) y el nitrógeno amoniacal (N-NH₄⁺) (Calvo-Brenes, 2013).

Históricamente los ICA han sido una herramienta importante para el control de la contaminación de los cuerpos de agua. Hacia la última década del siglo XX se dieron importantes avances en su aplicación en las distintas entidades gubernamentales encargadas de hacer seguimiento y control al recurso hídrico, con el fin de conocer inicialmente el efecto de la cantidad de carga orgánica como contaminante principal (Del Saz *et al.*, 2011). A medida que se tienen avances en los procesos industriales, donde se desarrollan y emplean nuevas sustancias químicas entre los años de 1960 y 1970 en los países industrializados, los ICA tienen mayor relevancia como medida del estado de contaminación del recurso hídrico en diferentes países (Brenes & Molina, 2012).

Aunque se tiene conocimiento de que desde años atrás con la revolución industrial ya se empleaban técnicas de medida de la contaminación del agua,

solo hasta 1965 se propone inicialmente por Horton el empleo de un ICA. Posteriormente, en 1970, la Fundación Nacional de Saneamiento de los Estados Unidos (NSF) desarrolló un nuevo índice que denominó WaterQualityIndex (WQI), que en la actualidad es uno de los más utilizados por las entidades en los Estados Unidos (Gallego *et al.*, 2010). Hacia 1987, en los Estados Unidos se desarrollaron otros índices: NSF-WQI y el ICA Danius. A partir de éstos, en otros países se han hecho modificaciones para su uso en la evaluación y control del recurso hídrico, de acuerdo a las características ambientales de sus ecosistemas y del agua (Aguirre *et al.*, 2008). Finalmente, con la creación de la comunidad europea, se propone un nuevo ICA universal el cual llaman UWQI, para evaluar la calidad y potabilidad de aguas superficiales, donde se emplean 12 parámetros fisicoquímicos. En México y Latinoamérica,

muchos de estos ICA han sido adaptados a las condiciones de sus sistemas hídricos para ser utilizados como medida de evaluación y control del recurso hídrico (Aragüés, 2011).

Un índice de calidad de agua es aquel que se obtiene mediante parámetros adicionados en una fórmula matemática. Al valor resultante se le atribuye un valor cualitativo en un rango determinado (Benavides *et al.*, 2008). Es una herramienta que permite de forma sintetizada, clara y sencilla, comprender las implicaciones generales de la información de parámetros monitoreados por las entidades en los procesos de seguimiento, evaluación y control de las fuentes de agua (Betancourt *et al.*, 2012). En Colombia desde el año 2007 se ha venido utilizando el índice de riesgo de la calidad del agua para el consumo humano IRCA establecido en la resolución Colombiana No 2115 de 2007,

CÉSAR AUGUSTO GARCÍA-UBAQUE
Director

The sustainable use of water is defined as “the use of water that permits to sustain a society so it lasts and develops indefinitely in the future, but without altering the integrity of the hydrological cycle or its depending ecosystems” (Gleick *et al.*, 1996, quoted by Cervera, 2007). In order to understand this, it is necessary to comprehend some facts. In first place, the net water supply refers to the amount of water that humans can use in activities as agriculture, industries, domestic activities, and general services (Samboni *et al.*, 2011); however, human activities affect and diminish this supply. Second, monitoring the sustainable use of a hydrological resource is essential to guide the management (both public and private) in order to guarantee the supply and sustainability of this natural resource (Posada *et al.*, 2005). Third, the quality of a body of water can be determined by the analysis of many indicators. These indicators are usually expressed in different ranges and units, and they have a different behavior depending on the relationship between concentration and impact (Damo & Icka, 2013).

Therefore, it is of utmost importance to understand the Water Quality Indices (ICA, for its acronym in Spanish), so it is possible to suggest a new index for decision-making and the implementation of environmental public policies; this proposed index must adjust to the environmental conditions of the ecosystems present in Bogota and its rivers. These indices (ICA) were proposed by Horton in 1965 (García, 2012), and by the 1970's they gained importance in the evaluation of hydrological resources. They are becoming more popular to identify trends related to changes in water quality (Torres *et al.*, 2010). Many countries worldwide have developed Indices to assess the quality of water; and, according to Cervera (2007), these indices are carried out from a model incorporating the main components of a sustainable system.

Furthermore, many researches on ICA had been carried out through the decades. For example, the

works by Torres (*et al.*, 2010) gathers relevant information on ICA applied in shallow sources; it makes a comparison of the advantages and the restraints of these indices, and a summary of their historical evolution. In addition, it applies these ICA to the human use of the source. On the other hand, there is information about investigations implemented in Germany 1848, to connect the presence of biological organisms to the purity of water (Benez *et al.*, 2010). In particular, one index design to assess the quality of shallow waters is the Dutch index of quality assessment for surface water bodies. This index is obtained by scoring several analyzed parameters: the biochemical demand of Oxygen (DBO5), the dissolved oxygen (OD), and the ammoniac nitrogen (N-NH4+)(Calvo-Brenes, 2013).

According to history, water quality indices have been and important tool for the control of pollution in water bodies. Towards the last decade of the 20th century, government entities made significant progress in the application of indices for the tracing and control of hydrological resource, so to know the effect of the amount of organic mass as the main pollutant (Del Saz *et al.*, 2011). Later in the 1960s and 1970s, as industrial processes are developed (where new chemical substances are developed and used in industrialized countries), the ICA became more relevant as a measure of contamination of the water resource in the different countries (Brenes & Molina, 2012).

It is known that with the Industrial Revolution, there were techniques to assess the contamination of water; however, as told before, it was in 1965 when Horton suggested using an index as a measure of contamination. Later, in 1970, the National Sanitation Foundation (NSF) design a new index called WaterQualityIndex (WQI), which nowadays is one of the most used in the United States (Gallego *et al.*, 2010); and in 1987, they also implemented other indices: the NSF-WQI and the ICA Danius. From these, other countries have made modifications for their use

in the evaluation and control of water resources according to the environmental characteristics of their own ecosystems and water (Aguirre *et al.*, 2008). Finally, with the creation of the European Community, a universal ICA was proposed and called UWQI; this index assessed the quality and edibility of superficial waters, and it used 12 physiochemical parameters. On their part, Mexico and Latin America have adapted many of these indices to the conditions of their hydrological systems in order to be used as a way to evaluate and control the hydrological resource (Aragües *et al.*, 2011).

A water quality index is obtained from various parameters in a mathematical model; the result is associated with a qualitative value within a determined range (Benavides *et al.*, 2008). It is a tool that allows comprehending the general implications of the information resulting from the processes of monitoring, evaluation and control of water sources (Betancourt *et al.*, 2012). Since 2007, Colombia has been using the Water Quality Risk Index (IRCA) established in the Colombian resolution N° 2115 from 2007,

CÉSAR AUGUSTO GARCÍA-UBAQUE
Director



Estudio comparativo de cinco estrategias de compensación de armónicos en filtros activos de potencia

A comparative study of five methods of harmonics compensation in active power filters

Jesser James Marulanda Durango¹, Andrés Escobar Mejía², Alfonso Alzate Gómez³

Fecha de recepción: 9 de agosto de 2016

Fecha de aceptación: 15 de febrero de 2017

Cómo citar: Marulanda D., J.J.; Escobar M., A. y Alzate G., A. (2017). Estudio comparativo de cinco estrategias de compensación de armónicos en filtros activos de potencia. *Revista Tecnura*, 21(52), 15-31. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.2.a01

Resumen

Contexto: Una de las funciones de un filtro activo de potencia es calcular las consignas de corriente (i.e.: reducción de armónicos, corrección del factor de potencia, balancear las corrientes y voltajes) que compensen la fuente de alimentación. Existen en la literatura varios algoritmos que realizan esta función. El objetivo de este artículo es presentar los resultados obtenidos sobre el funcionamiento de cinco algoritmos propuestos en la literatura, bajo condiciones de voltajes distorsionados.

Método: Consiste en la implementación de los siguientes algoritmos: potencia reactiva instantánea; factor de potencia unitario; compensación perfecta de armónicos; algoritmo pqr; y marco de referencia síncrono, en el programa de simulación Matlab – Simulink. Luego, usando un sistema eléctrico compuesto por cargas lineales y no lineales con características similares a un circuito real, se calcula la distorsión armónica total, el valor eficaz de la corriente de línea y de su componente fundamental, y el factor de potencia en la fuente trifásica. Se tomarán valores antes y después de la conexión a la

red del filtro activo de potencia, considerando cada uno de los algoritmos por separado y manteniendo las mismas condiciones en el sistema para cada uno de ellos. También se calculan otras cantidades en el sistema de potencia para realizar la comparación.

Resultados: Se muestran las corrientes de la red de alimentación antes y después de la conexión del filtro activo de potencia, además de la distorsión armónica de las corrientes y el factor de potencia. También se presenta la forma de onda del voltaje de continua del inversor con cada uno de los algoritmos utilizados, para evaluar el desempeño de un controlador de tensión que requiere el filtro.

Conclusiones: En condiciones de funcionamiento con voltajes distorsionados en la red de alimentación, el algoritmo con mejor desempeño es el de compensación perfecta de armónicos, ya que este utiliza un filtro pasa bajo para mitigar los efectos de los armónicos de los voltajes sobre el cálculo de las corrientes de compensación.

Palabras clave: armónicos, calidad de la energía, compensación, factor de potencia, filtro activo de potencia.

1 Ingeniero electricista, magíster en Ingeniería Eléctrica. Docente de la Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia.

Contacto: jjmarulanda@utp.edu.co

2 Ingeniero electricista, magíster en Ingeniería Eléctrica, doctor en Ingenierías. Docente de la Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia.

Contacto: andreses1@utp.edu.co

3 Ingeniero electricista, magíster en Sistemas de Generación de Energía Eléctrica. Docente de la Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia.

Contacto: alalzate@utp.edu.co

Abstract

Context: One of the functions of an Active Power Filter (APF) is to calculate current set points (i.e. harmonic reduction, power factor correction and current and voltage balancing) that compensate the power source. There are several algorithms in the literature that perform this function, so the objective in this article is to present the results obtained from the implementation of five algorithms proposed in the literature, under conditions of distorted voltages.

Method: The methodology consists of the implementation of the following algorithms: Instantaneous reactive power; unit power factor; perfect harmonic compensation; PQR algorithm; and synchronous frame of reference in the MATLAB simulation program. Then, we calculate the total harmonic distortion (THD), the effective value of the line current and its fundamental component, and the power factor (PF) at the three-phase source, using an electrical system composed of linear and non-linear loads with similar characteristics to a real circuit. We will take values before and after the connection to the network

of the active power filter, considering each of the algorithms separately and maintaining the same conditions in the system for each of them. Other quantities are also calculated in the power system to make the comparison.

Results: The main currents before and after the active power filter connection are displayed, in addition to the harmonic distortion of the currents and the power factor. We also present the waveform of the inverter continuous voltage with each of the algorithms used, in order to evaluate the performance of a voltage controller that requires filter.

Conclusions: In operating conditions with distorted voltages in the power supply network, the algorithm with the best performance is the perfect harmonic compensation algorithm, since it uses a low-pass filter to mitigate the effects of the harmonics of the voltages on the calculation of the currents of compensation.

Keywords: Active power filters, Compensation, Harmonics, Power Factor, Power Quality.

INTRODUCCIÓN

Un problema presente en las redes eléctricas de distribución de energía es el aumento progresivo de cargas no lineales que ayudan a incrementar la inyección de corrientes y tensiones armónicas. La presencia de armónicos puede originar problemas como: calentamiento en transformadores, vibraciones en motores, bajo factor de potencia, disparos indeseados en equipos de protección, excesiva corriente por el conductor neutro, entre otros (Kanjia, Khadkikar y Zeineldin, 2015).

Convencionalmente, filtros pasivos se han utilizado para reducir la presencia de armónicos en los sistemas eléctricos. Esta alternativa presenta varias desventajas, ya que su estructura es invariable y puede ocasionar problemas de resonancia entre el filtro pasivo y la impedancia de la red (Rafiei, Toliyat, Ghazi y Gopalarathnam, 2001). Por esto, otras

formas de compensación más sofisticadas como los filtros activos de potencia o *active power filters* (APF) han sido considerados en los últimos años. Los APF tienen entre sus principales ventajas la reducción del contenido armónico y el aumento del factor de potencia (Asiminoael, Blaabjerg y Hansen, 2007; Alzate, Murillo y Silva, 2017).

Obtener las corrientes que debe inyectar el APF para compensar el sistema es una de las principales funciones que debe realizar el sistema de control de los APF en conexión paralela. Estas corrientes, conocidas como *corrientes de compensación*, se obtienen a través diversos algoritmos, que emplean transformaciones matemáticas buscando desacoplar la potencia activa y la reactiva para facilitar la tarea del controlador (Akagi, Kanazawa y Nabae, 1984). Debido a los diversos algoritmos de compensación que se encuentran en la literatura, surge la siguiente pregunta: ¿Cuál algoritmo

presenta un mejor desempeño en el APF para determinadas condiciones de operación? En Ranjbar, Masoum y Jalilian (2009) se realiza una comparación de cuatro algoritmos de compensación en condiciones de voltajes desbalanceados y distorsionados, para un filtro activo que utiliza un inversor de cuatro ramas. En Rafiei *et al.* (2001) se presenta un nuevo algoritmo y se compara su desempeño con algoritmos previamente presentados, bajo condiciones de voltajes balanceados y distorsionados.

En este artículo se pretende analizar el desempeño de cinco algoritmos de compensación bajo condiciones de voltajes distorsionados. Los algoritmos que se comparan son: teoría de la potencia instantánea o teoría pq (Akagi *et al.*, 1984), factor de potencia unitario (Cavallini y Montanari, 1994), cancelación perfecta de armónicos (Rafiei *et al.*, 2001), teoría pqr (Kim, Blaabjerg, Bak-Jensen y Choi, 2002) y marco de referencia síncrono (Kale y Ozdemir, 2005). En la literatura especializada la comparación del desempeño de dichos algoritmos no ha sido reportada.

El artículo está dividido de la siguiente forma: primero, se describe el sistema eléctrico de potencia bajo estudio; luego se presenta el marco teórico donde se resumen las bases de funcionamiento de los algoritmos utilizados, además se muestra el procedimiento de ajuste del controlador de tensión del voltaje *dc* (*direct current*) del inversor. Después, se muestran los resultados obtenidos en simulación, donde se realiza un análisis para cada caso. Por último, se presentan las conclusiones y se citan las referencias bibliográficas utilizadas.

METODOLOGÍA

Dependiendo de cómo se conecta el APF al sistema, se puede distinguir entre filtro serie, filtro paralelo y filtro mixto. La conexión paralela es la que se utiliza en este artículo. Con dicha conexión, los APF se pueden asemejar como una fuente de corriente trifásica controlada, ya que inyectan en el punto de acoplamiento las corrientes que

compensan el sistema de potencia. En la figura 1 se muestra un diagrama unifilar general de un APF en paralelo con la carga. En la figura 1, las corrientes de la carga se denotan con el subíndice *L*, las de la fuente con el subíndice *S* y las que inyecta el APF o las de compensación con el subíndice *C*.

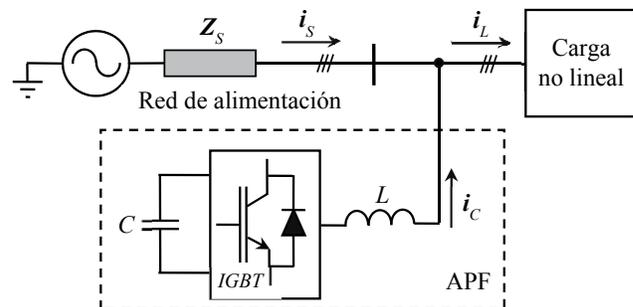


Figura 1. Diagrama unifilar general de un APF conectado en paralelo con la carga

Fuente: elaboración propia.

El APF está conformado por un inversor trifásico de tres ramas que se conecta a la red a través de inductancias de acople (*L* por fase) y un capacitor *C* que se utiliza para mantener constante el voltaje en el lado *dc* del inversor. Los algoritmos de compensación se encargan de determinar las corrientes i_c en cada fase (i_{ac} , i_{bc} , i_{cc}) que debe inyectar el APF. Las corrientes de la carga se denotan como (i_{al} , i_{bl} , i_{cl}) y las de la fuente (i_{as} , i_{bs} , i_{cs}).

Algoritmos de compensación

Estos algoritmos se encargan de determinar para cualquier instante de tiempo, el valor de las corrientes en cada fase que debe inyectar el APF para realizar la compensación en el sistema. La principal característica de estos algoritmos es el corto tiempo que tarda en obtener las consignas de corriente ante posibles cambios que pueda ocurrir en las condiciones de la carga. Los algoritmos utilizados se basan en el dominio del tiempo y son: teoría de la potencia reactiva instantánea,

factor de potencia unitario, compensación perfecta de armónicos, teoría pqr y marco de referencia síncrono.

Potencia reactiva instantánea

Este algoritmo fue propuesto en Akagi *et al.* (1984). Consiste en una transformación de las tensiones y las corrientes que circulan en la carga a un marco de coordenadas estacionario y ortogonal conocido como $(\alpha, \beta, 0)$, usando la transformación dada en la ecuación

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \mathbf{C} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}; \quad \mathbf{C} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

Donde x puede ser un voltaje, e , o una corriente i , y \mathbf{C} es la matriz de transformación de Clarke. En el marco de referencia $(\alpha, \beta, 0)$, la potencia total instantánea absorbida por la carga, se expresa como la suma de dos términos, la potencia activa p asociada a las componentes de voltaje y corriente de la carga en los ejes α y β , y la potencia p_0 debida a las componentes en el eje 0 (o de secuencia cero) (Akagi *et al.*, 1984).

$$i_{0c} = \frac{p_{0ac}}{e_{0L}}, \quad i_{\alpha c} = \frac{[(p_{ac} - \Delta p)e_{\alpha L} - qe_{\beta L}]}{e_{\alpha L}^2 + e_{\beta L}^2}, \quad i_{\beta c} = \frac{[(p_{ac} - \Delta p)e_{\beta L} + qe_{\alpha L}]}{e_{\alpha L}^2 + e_{\beta L}^2}. \quad (6)$$

La potencia Δp se obtiene a través de un controlador proporcional y se requiere para mantener constante el voltaje dc del inversor, como se mostrará posteriormente. El signo negativo de Δp significa que esta potencia es absorbida por el filtro. En la figura 2, se resume el algoritmo del cálculo de las corrientes de compensación basado en la teoría pq.

$$p = e_{\alpha L}i_{\alpha L} + e_{\beta L}i_{\beta L}, \quad (2)$$

$$p_0 = e_{0L}i_{0L}, \quad (3)$$

Donde el subíndice L hace referencia a cantidades de la carga. La potencia reactiva instantánea q , está dada por Akagi *et al.* (1984).

$$q = e_{\alpha L}i_{\beta L} - e_{\beta L}i_{\alpha L}, \quad (4)$$

Cada componente de potencia tiene a su vez una componente constante o dc y una componente alterna o ac . El objetivo de este algoritmo es conseguir que la red de alimentación entregue la componente dc de p y p_0 , y el resto de las potencias de la carga sean suministradas por el APF. A partir de lo anterior, las corrientes de compensación que se denotan con el subíndice c en el marco de referencia $(\alpha, \beta, 0)$ están dadas por:

$$\begin{bmatrix} i_{0c} \\ i_{\alpha c} \\ i_{\beta c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{0L} & 0 & 0 \\ 0 & e_{\alpha L} & e_{\beta L} \\ 0 & -e_{\beta L} & e_{\alpha L} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p_{0ac} \\ p_{ac} - \Delta p \\ q \end{bmatrix}; \quad e_{0L} \neq 0, \quad (5)$$

Al calcular la inversa de la matriz de tensiones y multiplicarla por el vector columna de potencias se obtiene que,

El procedimiento para el cálculo de la constante proporcional del controlador k_p se muestra más adelante. Los voltajes V_{dc} y V_{dc}^* que aparecen en la figura 2 son el voltaje medido y el esperado en el lado dc del inversor respectivamente. Por último, usando la transformación inversa de Clark, se obtienen las corrientes de referencia en el sistema trifásico (a, b, c) , como se indica en la ecuación.

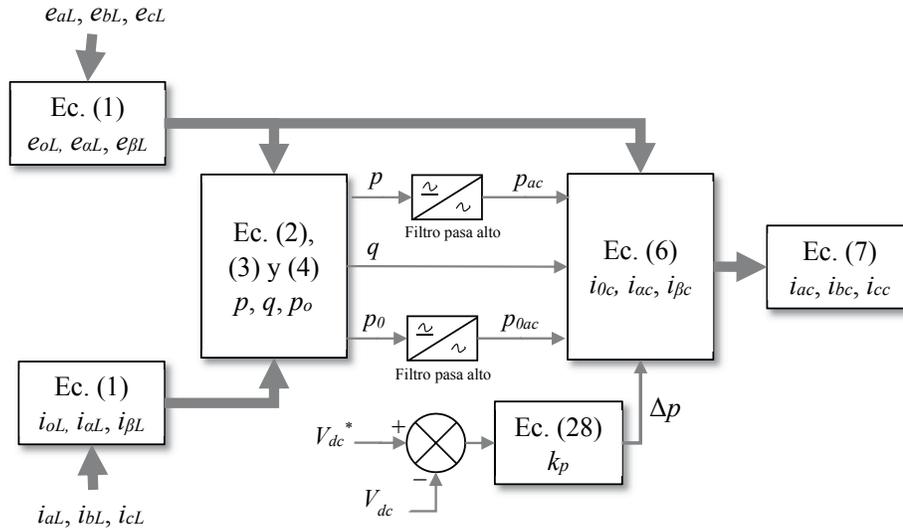


Figura 2. Diagrama de bloques para el cálculo de las corrientes de compensación usando la teoría pq.

Fuente: elaboración propia.

$$\begin{bmatrix} i_{ac} \\ i_{bc} \\ i_{cc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{0c} \\ i_{\alpha c} \\ i_{\beta c} \end{bmatrix}; \quad (7)$$

Factor de potencia unitario

También conocida como *Unity Power Factor* (UPF). Esta estrategia parte de la suposición de que la carga compensada (carga más filtro) es equivalente a una carga resistiva (Cavallini y Montanari, 1994). De otra forma, lo anterior equivale a decir que las corrientes esperadas en la fuente de alimentación que se denotan con el subíndice *s*, sean iguales a los voltajes en terminales multiplicados por una constante de proporcionalidad (o la conductancia). En el marco de referencia $(\alpha, \beta, 0)$ el algoritmo de factor de potencia unitario busca que,

$$\begin{bmatrix} i_{0s_e} \\ i_{\alpha s_e} \\ i_{\beta s_e} \end{bmatrix} = \kappa_{dc} \begin{bmatrix} e_{0L} \\ e_{\alpha L} \\ e_{\beta L} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Donde el subíndice *e* significa componente esperada y κ_{dc} es un valor constante que representa la conductancia equivalente de la carga compensada. En efecto, la potencia instantánea de la carga compensada que se denota como p_t en función de los voltajes y las corrientes en las coordenadas $(\alpha, \beta, 0)$ está dada por (Rafiei *et al.* (2001),

$$p_t = e_{\alpha L} i_{\alpha s} + e_{\beta L} i_{\beta s} + e_{0L} i_{0s} = \kappa \varepsilon \quad (9)$$

Donde κ es la conductancia de la carga compensada, debe de ser constante e igual a κ_{dc} para tener factor de potencia unitario (Rafiei *et al.*, 2001), y ε está dada por

$$e_{\alpha L}^2 + e_{\beta L}^2 + e_{0L}^2. \quad (10)$$

El comportamiento resistivo de la carga compensada sugiere que su conductancia sea igual a (Rafiei *et al.*, 2001),

$$\kappa_{dc} = \frac{p_{dc} + \Delta p}{\varepsilon_{dc}}, \quad (11)$$

Donde p_{dc} y ε_{dc} son los valores promedio de p_t y ε , respectivamente. La potencia Δp se requiere

para mantener constante el voltaje *dc* del inversor y debe ser suministrada por la fuente de alimentación, por lo que se suma al valor promedio de la potencia instantánea.

Luego, usando la transformación inversa de Clark (ecuación), se transforman las corrientes esperadas en la fuente de alimentación en coordenadas $(\alpha, \beta, 0)$ al sistema (a, b, c) . Finalmente, haciendo sumatoria de corrientes en el punto donde se conecta el APF (figura 1), se obtienen las corrientes de compensación cuyo resultado está dado por la ecuación.

$$\begin{bmatrix} i_{ac} \\ i_{bc} \\ i_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{aL} \\ i_{bL} \\ i_{cL} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{as_e} \\ i_{bs_e} \\ i_{cs_e} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

En la figura 3 se ilustra, en diagramas de bloques, el algoritmo de factor de potencia unitario.

El método UPF se conoce como un método indirecto, ya que primero se calculan las corrientes compensadas para después calcular las corrientes que debe inyectar el APF.

Compensación perfecta de armónicos

Conocido como *perfect harmonic compensation* (PHC) (Rafiei *et al.*, 2001). Se trata de un método indirecto similar al UPF, que en teoría es capaz de compensar todos los armónicos presentes en la carga (Ranjbar, Masoum y Jalilian, 2009). Parte del hecho de que una vez se realiza la compensación, en la red de alimentación la potencia activa instantánea de la carga compensada es constante, y además se anula la potencia reactiva y la generada por las componentes de secuencia cero. Lo anterior se expresa en términos de las corrientes de la fuente de alimentación en el marco de referencia $(\alpha, \beta, 0)$ (ecuación) a través de la ecuación .

$$\begin{bmatrix} i_{0s_e} \\ i_{\alpha s_e} \\ i_{\beta s_e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{0L} & 0 & 0 \\ 0 & e_{\alpha L} & e_{\beta L} \\ 0 & -e_{\beta L} & e_{\alpha L} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ p_{dc} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Donde el subíndice *e* hace referencia a las componentes esperadas en la red de alimentación. La ecuación se puede expresar a partir de la ecuación (14).

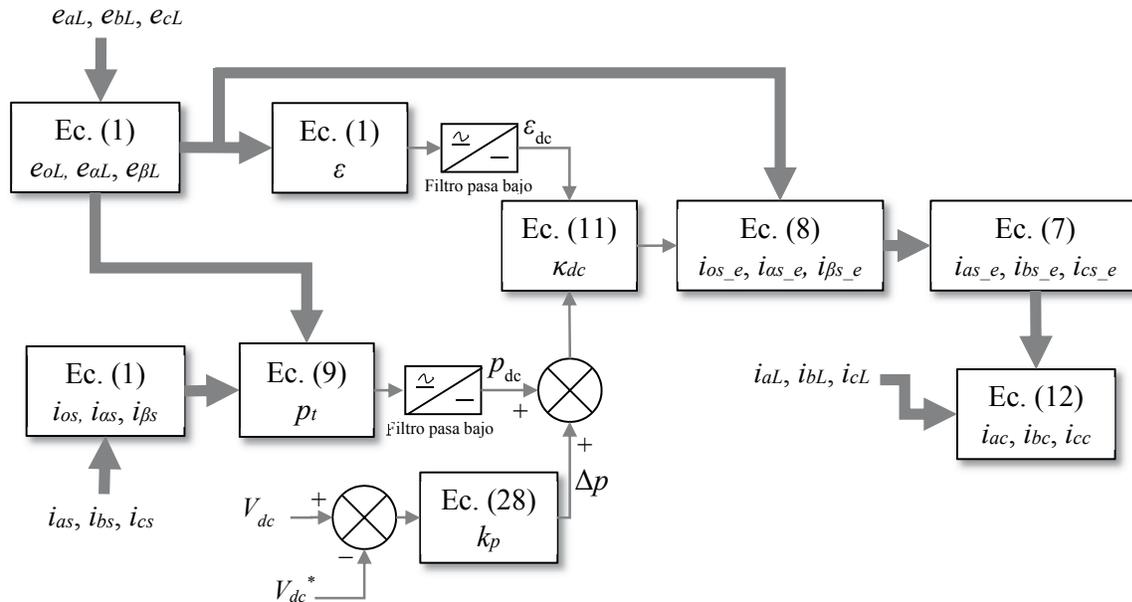


Figura 3. Algoritmo del factor de potencia unitario en forma de diagramas de bloque

Fuente: elaboración propia.

$$i_{0s} = 0, \quad i_{as_e} = \frac{P_{dc}}{e_{\alpha L}^2 + e_{\beta L}^2} e_{\alpha L}, \quad i_{\beta s_e} = \frac{P_{dc}}{e_{\alpha L}^2 + e_{\beta L}^2} e_{\beta L}. \quad (14)$$

En el algoritmo PHC, se utilizan las componentes fundamentales de los voltajes $e_{\alpha L}$ y $e_{\beta L}$ para obtener las corrientes de referencia (Rafiei et al., 2001), de tal manera que,

$$\begin{bmatrix} i_{0s_e} \\ i_{as_e} \\ i_{\beta s_e} \end{bmatrix} = \frac{P_{dc}}{\bar{e}_{\alpha L}^2 + \bar{e}_{\beta L}^2} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{e}_{\alpha L} \\ \bar{e}_{\beta L} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

Las componentes fundamentales $\bar{e}_{\alpha L}$ y $\bar{e}_{\beta L}$ se obtienen a través de filtros pasa banda (o BPF, *band pass filters*) para cada componente. Luego de obtener las corrientes esperadas en la fuente de alimentación en coordenadas $(\alpha, \beta, 0)$, por un procedimiento igual al algoritmo UPF, se obtienen las referencias de las corrientes en el sistema (a, b, c) . En la figura 4 se muestra el procedimiento empleado en el algoritmo PHC a través de diagramas de bloque para el cálculo de las corrientes de compensación del APF.

Algoritmo pqr

Este algoritmo fue propuesto por Kim y Akagi (1999), donde se define un marco de referencia en el que la potencia activa y reactiva instantánea se expresan en términos de componentes linealmente independientes, lo cual facilita la compensación de la potencia reactiva y la mitigación de armónicos (Kim et al., 2002).

Luego de la transformación de los voltajes de fase y las corrientes de línea en la carga al marco de referencia $(\alpha, \beta, 0)$, las corrientes en el marco de referencia (p, q, r) se obtienen con la ecuación (Ucar y Ozdemir, 2008),

$$\begin{bmatrix} i_{pL} \\ i_{qL} \\ i_{rL} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{e_{\alpha L}}{e_{\alpha\beta 0}} & \frac{e_{\beta L}}{e_{\alpha\beta 0}} & \frac{e_{0L}}{e_{\alpha\beta 0}} \\ -\frac{e_{\beta L}}{e_{\alpha\beta}} & \frac{e_{\alpha L}}{e_{\alpha\beta}} & 0 \\ -\frac{e_{0L}e_{\alpha L}}{e_{\alpha\beta}e_{\alpha\beta 0}} & -\frac{e_{0L}e_{\beta L}}{e_{\alpha\beta}e_{\alpha\beta 0}} & \frac{e_{\alpha\beta}}{e_{\alpha\beta 0}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha L} \\ i_{\beta L} \\ i_{0L} \end{bmatrix}, \quad (16)$$

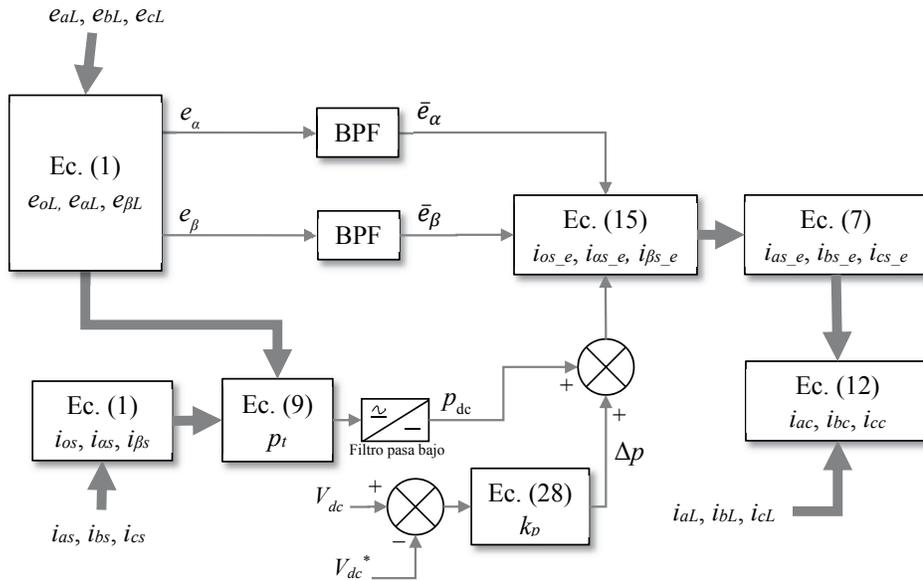


Figura 4. Diagramas de bloque para el algoritmo PHC

Fuente: elaboración propia.

Donde $e_{\alpha\beta}$ y $e_{\alpha\beta 0}$ están dados por la ecuación .

$$e_{\alpha\beta} = \sqrt{e_{\alpha L}^2 + e_{\beta L}^2}, \quad e_{\alpha\beta 0} = \sqrt{e_{\alpha L}^2 + e_{\beta L}^2 + e_{0L}^2}. \quad (17)$$

El algoritmo *pqr* propone calcular las corrientes de compensación en el marco (*p, q, r*) con la ecuación para obtener corrientes sinusoidales y balanceadas en la fuente de alimentación (Ucar y Ozdemir, 2008),

$$\begin{bmatrix} i_{pc} \\ i_{qc} \\ i_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{pca} - \Delta i \\ i_q \\ i_{rL} + (i_{pL} e_0)(e_{\alpha\beta})^{-1} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

Donde i_{pca} es la componente alterna de i_{pL} y la corriente Δi se obtiene a partir de un controlador proporcional de la tensión en el lado *dc* del inversor, como se muestra más adelante. Luego, con la ecuación se obtienen las corrientes de compensación en el marco ($\alpha, \beta, 0$), y con la transformación inversa de Clark dada en la ecuación se pasa al sistema trifásico convencional (*a, b, c*),

$$\begin{bmatrix} i_{ac} \\ i_{bc} \\ i_{0c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{e_{\alpha L}}{e_{\alpha\beta 0}} & \frac{e_{\beta L}}{e_{\alpha\beta 0}} & \frac{e_{0L}}{e_{\alpha\beta 0}} \\ -\frac{e_{\beta L}}{e_{\alpha\beta}} & \frac{e_{\alpha L}}{e_{\alpha\beta}} & 0 \\ -\frac{e_{0L}e_{\alpha L}}{e_{\alpha\beta}e_{\alpha\beta 0}} & -\frac{e_{0L}e_{\beta L}}{e_{\alpha\beta}e_{\alpha\beta 0}} & \frac{e_{\alpha\beta}}{e_{\alpha\beta 0}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} i_{pc} \\ i_{qc} \\ i_{rc} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

En la figura 5 se ilustra a través de diagramas de bloque la implementación del algoritmo *pqr*, para la obtención de las corrientes de compensación,

Marco de referencia síncrono

También conocido como *dq0*. Esta estrategia transforma las corrientes de la carga a un sistema de coordenadas (*d,q,0*) que se encuentra en movimiento, para facilitar la descomposición de las corrientes dejando solo aquellas componentes de la corriente que definen la compensación (Asiminoael, Blaabjerg y Hansen, 2007). Se utiliza la transformación de Park que está dada por la ecuación (Kale y Ozdemir, 2005), para transformar las corrientes trifásicas en la carga del sistema convencional al marco de referencia síncrono (*d, q, 0*),

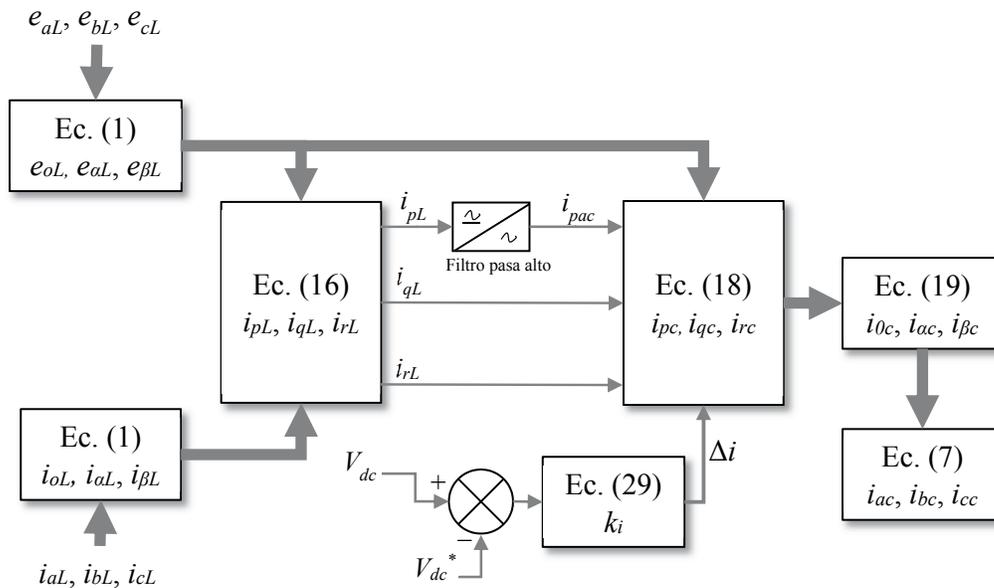


Figura 5. Ilustración a través de diagramas de bloque del algoritmo *pqr*

Fuente: elaboración propia.

$$\begin{bmatrix} i_{dL} \\ i_{qL} \\ i_{0L} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - (2\pi/3)) & \cos(\omega t + (2\pi/3)) \\ -\sin(\omega t) & -\sin(\omega t - (2\pi/3)) & -\sin(\omega t + (2\pi/3)) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{aL} \\ i_{bL} \\ i_{cL} \end{bmatrix}, \quad (20)$$

En cargas no lineales o desbalanceadas, las corrientes en los ejes ($d, q, 0$) tienen componentes constantes y alternas denotada con el subíndice ac . Las componentes alternas son generadas por los armónicos y a los desbalances presentes en las corrientes de la carga. El propósito del algoritmo $dq0$ es obtener en la fuente de alimentación la componente constante de i_d e i_0 (generada por cargas desbalanceadas), y que las corrientes restantes sean suministradas por el filtro (Asiminoel, Blaabjerg y Hansen, 2007). Lo anterior define las consignas de corrientes en el marco de referencia síncrono ($d, q, 0$), que se expresan a través de la ecuación.

$$\begin{bmatrix} i_{dc} \\ i_{qc} \\ i_{0c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{dLca} - \Delta i \\ -i_{qL} \\ -i_{0Lca} \end{bmatrix}, \quad (21)$$

La corriente Δi se requiere para garantizar un voltaje casi constante en el enlace dc del inversor y se obtiene a través de un controlador proporcional como se muestra más adelante. En la figura 6 se detalla la implementación en diagramas de bloque del algoritmo $dq0$.

El ángulo ωt sincroniza los voltajes en el punto de acople del APF con el sistema de referencia en movimiento ($d, q, 0$), y es obtenido a través de un oscilador de seguimiento de fase (o PLL, *phase locked loop*) que se explica detalladamente en Luna *et al.*, 2015).

$$\begin{bmatrix} i_{ac} \\ i_{bc} \\ i_{cc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\omega t - (2\pi/3)) & -\sin(\omega t - (2\pi/3)) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\omega t + (2\pi/3)) & -\sin(\omega t + (2\pi/3)) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dc} \\ i_{qc} \\ i_{0c} \end{bmatrix}, \quad (22)$$

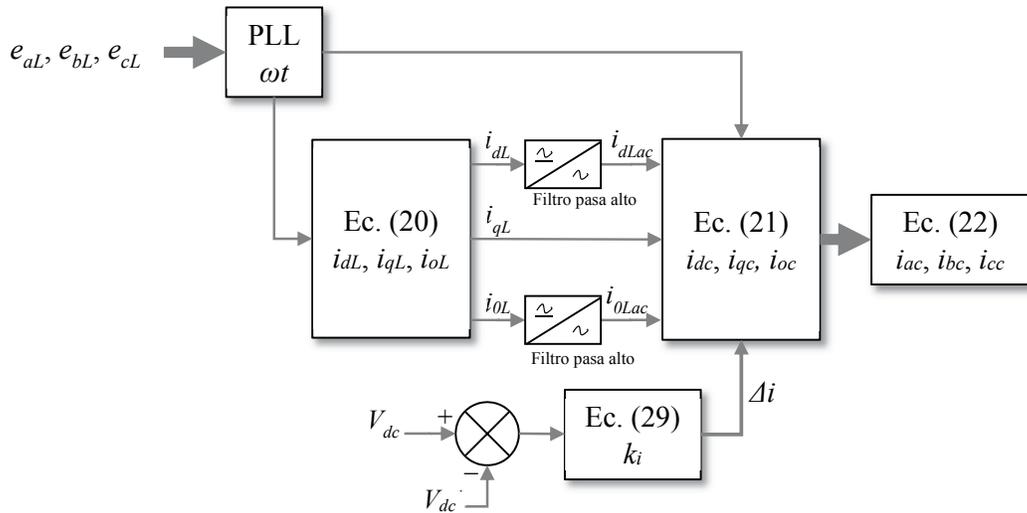


Figura 6. Implementación en diagramas de bloque del algoritmo de marco de referencia síncrono

Fuente: elaboración propia.

Control de la tensión continua del inversor

Como se mencionó anteriormente en cada uno de los algoritmos para obtener las corrientes de referencia o compensación, el APF requiere mantener en un valor constante el voltaje dc del inversor. Esta tarea es llevada a cabo a través de un controlador proporcional (Hsu y Wu, 1996). La diferencia entre el voltaje esperado (o de referencia) V_{dc}^* y el medido V_{dc} , se denota con la letra λ y es el error del controlador que es la entrada al controlador proporcional para establecer la potencia Δp o la corriente Δi , según el algoritmo utilizado. En efecto, la energía almacenada en el lado dc del inversor está dada por la ecuación:

$$W = \frac{CV_{dc}^2}{2}, \quad (23)$$

Donde C es el valor del capacitor a la entrada del inversor. La variación de energía en C para un periodo de los voltajes de la red de alimentación se obtiene con la ecuación.

$$\Delta W = \frac{C(V_{dc}^{*2} - V_{dc}^2)}{2}, \quad (24)$$

A través de la aproximación $V_{dc}^* + V_{dc} \approx 2V_{dc}^*$, se obtiene la ecuación (25).

$$W = \lambda CV_{dc}^*, \quad (25)$$

Esta variación de energía se toma en cada ciclo de la fuente de alimentación (Hsu y Wu, 1996) y su valor está dado con la ecuación :

$$\Delta W = \int_0^T 3V_m I_m \sin^2(\omega t) dt = \frac{3}{2} \frac{V_m I_m}{f}, \quad (26)$$

Donde V_m es el valor pico de las tensiones de fase en el punto de conexión del APF, I_m es el valor máximo de las corrientes de compensación (su valor se puede aproximar al valor máximo de las corrientes de la carga), T es el periodo y ω es la frecuencia fundamental de los voltajes de la red de alimentación, respectivamente. Reemplazando el resultado obtenido en la ecuación en la ecuación

se obtiene la ecuación que relaciona el error de control λ con los parámetros de operación del APF.

$$\lambda CV_{dc}^* = \frac{3}{2} \frac{V_m I_m}{f}, \quad (27)$$

En las estrategias de compensación donde la salida del controlador es en forma de potencia (Δp), la constante proporcional del regulador k_p se obtiene de $\lambda k_p = \Delta p$ con $\Delta p = V_m I_m$. De la ecuación resulta la ecuación para el cálculo de k_p .

$$k_p = \frac{2}{3} CV_{dc}^* f, \quad (28)$$

Y para las estrategias de compensación que a la salida del regulador tienen una corriente (Δi), usando un planteamiento similar al caso anterior, la constante proporcional k_i se determina con la ecuación .

$$k_i = \frac{2}{3} \frac{CV_{dc}^* f}{V_m}. \quad (29)$$

RESULTADOS

Se ha utilizado el circuito eléctrico propuesto por Rafiei *et al.* (2001) para evaluar el desempeño de los algoritmos de compensación. En la figura 7 se muestra el diagrama unifilar del sistema bajo estudio, que consiste en una carga de tipo industrial. La carga B es un convertidor de corriente alterna a continua de seis pulsos a base de tiristores, y su operación distorsiona los voltajes en terminales en las cargas A y C. Esta distorsión se vuelve más severa al conectar el banco de capacitores de 50 kVAr, ya que el tercer armónico pasa del 8,7 % (sin el banco) al 17 % (con el banco) respecto de la componente fundamental y el séptimo armónico pasa del 4,9 % al 24 %. Lo anterior permite evaluar el desempeño de los algoritmos de compensación en condiciones no ideales, al tratar con voltajes distorsionados como sucede en un sistema real de distribución.

El APF está compuesto por un inversor trifásico tipo puente o *voltage source inverter* (VSI) con

condensador repartido el cual proporciona un camino de circulación de la corriente por el neutro cuando se presentan cargas desbalanceadas (Grino, Cardoner, Costa-Castello y Fossas, 2007). La conmutación de los dispositivos semiconductores tipo *insulated gate bipolar transistor* (IGBT) se realiza usando *modulación por ancho de pulsos* (o *pulse width modulation* (PWM)) por banda fija de histéresis, en donde la corriente de salida de cada rama del inversor se mantiene dentro de una banda de corriente de ancho fijo que tiene la misma forma de la corriente de compensación respectiva a cada fase. Cuanto más angosta sea la banda, mayor es la frecuencia de conmutación de los dispositivos del inversor (Kale y Ozdemir, 2005).

Para la simulación se ajustó el ancho de banda a 1 A, la inductancia de acople por fase del filtro con la red en 3 mH y el valor de cada capacitor en 1500 μ F (Rafiei *et al.*, 2001) con un voltaje de referencia (V_{dc}^*) de 800 V en el lado de continua del inversor. Adicionalmente, se instala un filtro pasivo paso-bajo (no mostrado en la figura 7 en aras de la claridad), para disminuir las componentes de alta frecuencia en las corrientes trifásicas de la red de alimentación, producidas por las conmutaciones de los IGBT. El filtro pasivo a la salida del inversor es de tipo LCL (inductancia, capacitor, inductancia) como se muestra en la figura 8, y ha sido probado en Rodríguez *et al.* (2012) para reducir el rizado de alta frecuencia de las corrientes generadas por un inversor.

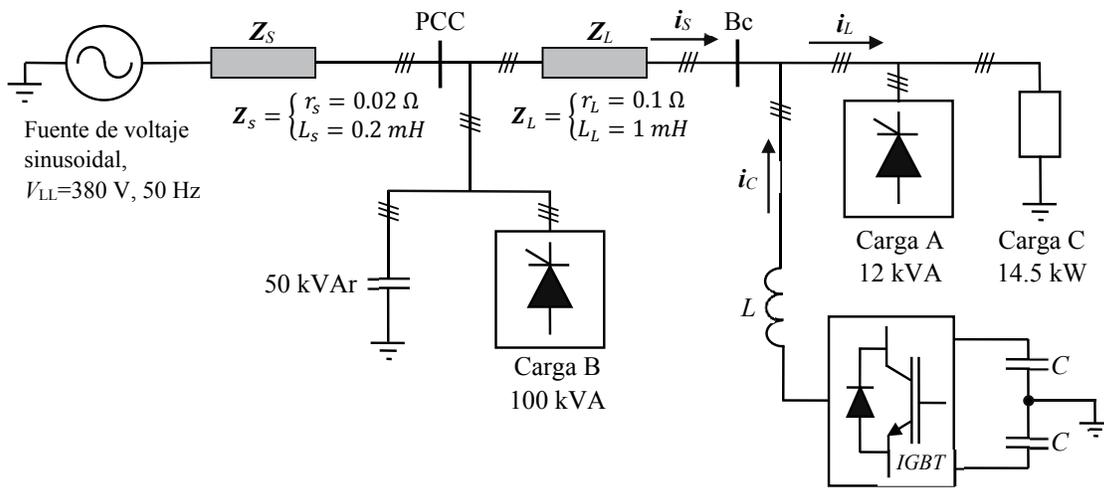


Figura 7. Sistema eléctrico de potencia, compuesto por una fuente de voltaje trifásica, una carga no lineal y el filtro activo de potencia

Fuente: Rafiei *et al.* (2001).

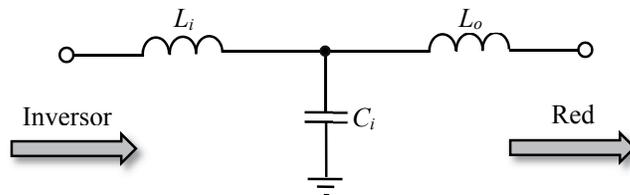


Figura 8. Filtro LCL por fase, para mitigar el rizado de alta frecuencia de las corrientes a la salida del inversor

Fuente: Rodríguez *et al.* (2012).

La inductancia L_i es la del lado del inversor, que equivale a la inductancia de acople L (figura 7) cuyo valor es de 3 mH de acuerdo con los parámetros utilizados por Rafiei *et al.* (2001).

El valor del capacitor se ha seleccionado siguiendo el planteamiento presentado en Rodríguez *et al.* (2012), el cual establece la ecuación para el cálculo del capacitor.

$$C_i = \frac{L_i + L_o}{(L_i \cdot L_o) \omega_r^2}, \quad (30)$$

Donde ω_r es la frecuencia de resonancia del filtro en radianes por segundo y su valor se toma en el rango dado por la ecuación .

$$10 \cdot \omega \leq \omega_r \leq \frac{\omega_s}{2}, \quad (31)$$

Con ω_s igual a la frecuencia de conmutación de los IGBT. Debido a que la técnica PWM por banda fija de histéresis genera una frecuencia de conmutación variable (Kale y Ozdemir, 2005), se utiliza el valor promedio de ω_s para establecer el límite superior de la ecuación . El valor de L_o se ha establecido igual al 10 % del valor de L_i , de acuerdo con los criterios de diseño establecidos por Rodríguez *et al.* (2012). A partir de lo anterior, se obtienen los siguientes resultados para cuando $L_o = 0,3$ mH y $C_i = 0,1$ μ F.

En la figura 9 se ilustran las formas de onda de el voltaje en la fase a en la barra Bc y la corriente

en la fase a a través de Z_L , sin estar en operación el APF. Debido a que la carga es balanceada, se omiten las formas de onda para las otras fases.

Se observa en la figura 9 la distorsión que tienen ambas formas de onda. Para cada forma de onda se ha calculado la *distorsión total armónica*, o *total harmonic distortion* (THD), que es una medida de la contribución de los armónicos y se calcula en un valor porcentual respecto al valor de la componente fundamental (Rashid, 2011). Para el voltaje se obtiene un THD de 30,46 % y 22,23 % para la corriente. En la figura 10, se muestran las formas de onda de la corriente i_s (para la fase a) a través de la impedancia Z_L , una vez realizada la compensación al sistema usando cada uno de los algoritmos presentados. Se observa que el algoritmo PHC es el que mejor reduce los armónicos en la corriente, ya que la forma de onda obtenida es muy similar a una senoide. Le sigue el algoritmo *dq0*, donde la corriente obtenida es similar a una senoide a excepción en los puntos cercanos a los valores pico donde ocurre una distorsión en la onda. A través de diferentes pruebas de simulación en el dominio del tiempo, se observa que dichas distorsiones se pueden reducir incrementando el voltaje en el lado *dc* del inversor o reduciendo el valor de la inductancia de acople del filtro con la red. Lo anterior va ligado a la dependencia que tiene la derivada de la corriente (di/dt) a la salida del inversor con el voltaje

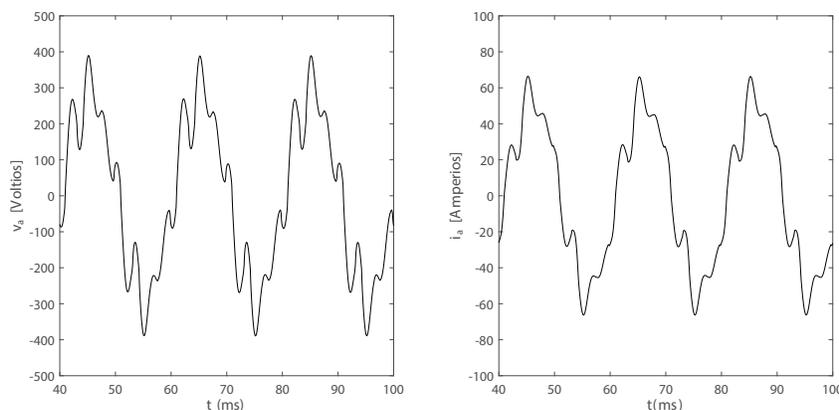


Figura 9. Formas de onda distorsionadas de voltaje y corriente, antes de la conexión del APF

Fuente: elaboración propia.

V_{dc} y el valor de L , que hace que está corriente, que es lineal por tramos, no siga fielmente a la corriente de referencia dentro de la banda de histéresis usada para la conmutación de los IGBT, como se muestra en la figura 10 (f). El valor mínimo que puede tener la pendiente de la corriente inyectada por el APF se aproxima con la ecuación.

$$\frac{di}{dt} \approx \frac{V_{dc} - V_m}{L}, \quad (32)$$

Donde V_m es el valor máximo del voltaje de fase en el punto de conexión del APF y L es la inductancia de acople entre el APF y la red de alimentación. Al reemplazar los resultados obtenidos en la simulación, el valor mínimo aproximado de la pendiente es de $0,121 \text{ A}/\mu\text{s}$, y es recomendable que sea mayor a la máxima tasa de variación que presente la corriente de compensación obtenida con los algoritmos.

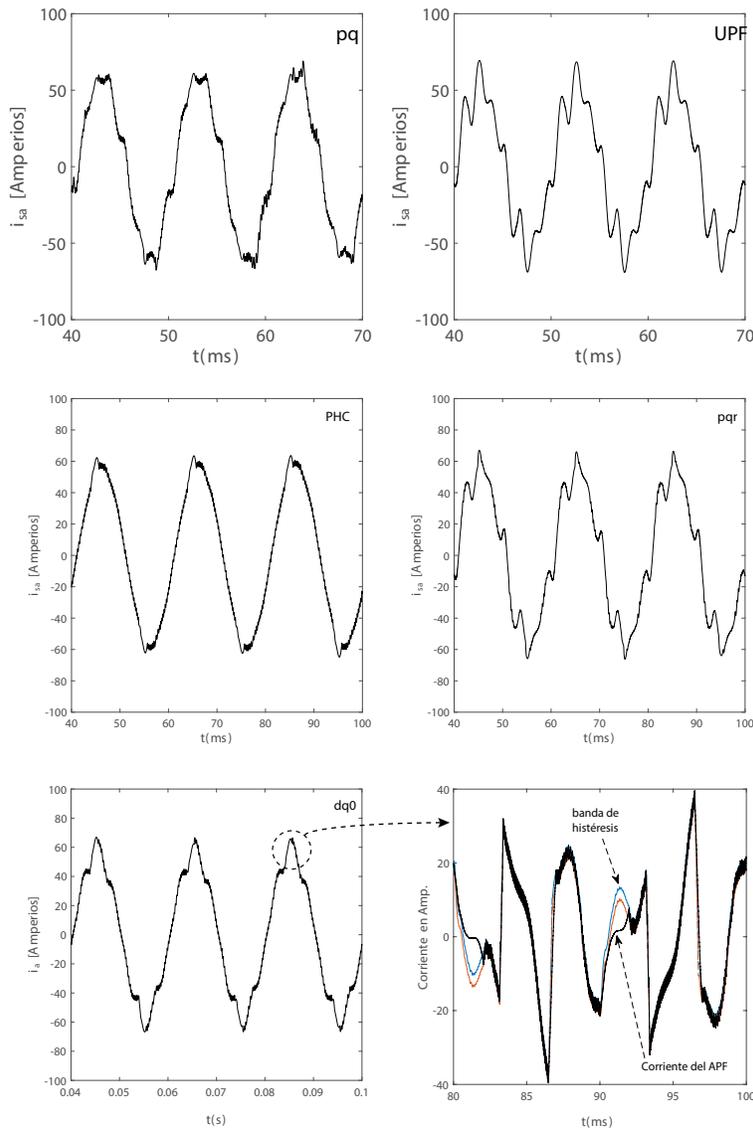


Figura 10. Forma de onda de la corriente compensada en la fase a , a la entrada del APF, usando los algoritmos pq (a), UPF (b), PHC (c), pqr (d) y $dq0$ (e)

Fuente: elaboración propia.

Los demás algoritmos muestran una corriente distorsionada, similares a los resultados obtenidos por Rafiei *et al.* (2001) y por Ranjbar, Masou y Jalilian (2009), esto debido a las formas de onda no-sinusoidales de los voltajes de fase en el punto de conexión del APF. Incluso el algoritmo UPF genera una mayor distorsión en la corriente al conectar el APF, ya que su objetivo es obtener una forma de onda de corriente semejante a la del voltaje, pero escalada. Esto se puede observar al comparar el voltaje de la figura 9 y la corriente con el algoritmo UPF en la figura 10. En la tabla 1 se muestran los resultados obtenidos para el THD, el valor eficaz de la componente fundamental (I_{s1}) y el valor eficaz (I_s) de la corriente i_s . También se muestra el factor de potencia (FP) en el punto de conexión del APF.

Los resultados muestran que el mejor algoritmo para reducir el THD en la corriente es el PHC de 22,23 % (sin APF) a 6 % (con APF), seguido del $dq0$, pq , pqr y UPF . El algoritmo UPF distorsiona aún más las corrientes. El mejor FP se obtiene con los algoritmos UPF y pqr , dada la similitud que tienen estas las corrientes con el voltaje de la figura 9. Según los resultados, los valores eficaces de la corriente y su fundamental son mayores a los que presenta el sistema sin el APF en todos los casos, lo que indica que el APF además de inyectar las corrientes de compensación, inyecta un pequeño rizado de alta frecuencia en las corrientes que contribuye a aumentar los valores eficaces, incluso puede tener efectos en la forma de onda de los

voltajes generando a su vez un rizado en estos y en la corriente que absorbe la carga.

La constante k_p del controlador proporcional del voltaje dc del inversor se ajusta en 80 en el caso de que a la salida del controlador se tenga una variación en la potencia (Δp) y de 0,2 en el caso de que sea una variación en la corriente (Δi). Los resultados obtenidos en el voltaje de entrada del inversor en régimen permanente se muestran en la figura 11, para cada uno de los algoritmos implementados. De acuerdo con los resultados el voltaje dc de entrada al inversor se mantiene cercano al valor deseado, validando el procedimiento de ajuste del controlador.

La tabla 2 lista el valor máximo y promedio de la frecuencia de conmutación de los IGBT según el algoritmo de compensación empleado. Como se puede observar, la frecuencia de conmutación promedio está entre los 20 y 30 kHz. Una forma de reducir esta frecuencia sin variar la técnica PWM empleada es aumentando el ancho de la banda de histéresis, sin embargo, al realizar dicho aumento se estaría aumentando el rizado de las corrientes del inversor.

La frecuencia de conmutación y la corriente que circula por el compensador, permite seleccionar los dispositivos semiconductores en un sistema real. Según los resultados de la simulación para un ancho de banda de 1 A se deben seleccionar dispositivos semiconductores que operen a frecuencias de conmutación de hasta 85 kHz.

Tabla 1. Resumen de los resultados obtenidos en algunos de los parámetros de operación del sistema eléctrico de potencia

	Sin APF	pq	UPF	PHC	pqr	dq0
THD de i_s	22.23	11.96	24.17	6	19.17	10.1
I_{s1} [A]	38.36	42.82	38.73	42.52	39.64	41.05
I_s [A]	39.3	43.14	39.84	42.6	40.36	41.26
FP	0.90	0.90	0.94	0.91	0.94	0.93

Fuente: elaboración propia.

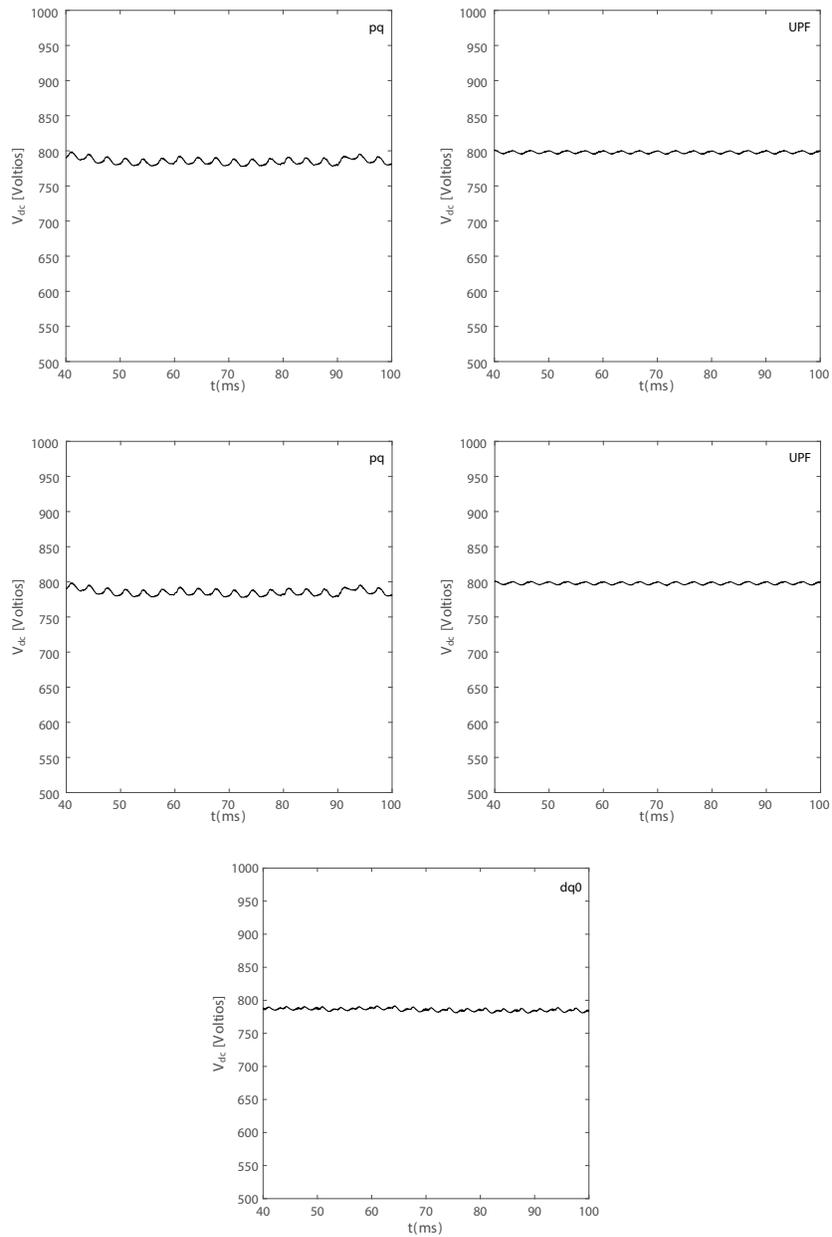


Figura 11. Forma de onda del voltaje dc en régimen permanente del inversor, usando diferentes algoritmos para realizar la compensación

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Resumen de la frecuencia de conmutación máxima y promedio de los IGBT

	pq	UPF	PHC	pqr	dq0
Máxima	75,2 kHz	75 kHz	85,7 kHz	85,7 kHz	85,7 kHz
Promedio	17,7 kHz	30,3 kHz	22,1 kHz	30,2 kHz	21,3 kHz

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos, el algoritmo de compensación PHC es el que mejor opera para la reducción de armónicos de la corriente, ya que al utilizar filtros pasa banda atenúa el efecto que tienen los armónicos de tensión en el punto de conexión del APF sobre el cálculo de las corrientes de compensación.

El algoritmo $dq0$ requiere un nivel de tensión en la barra dc del inversor mayor a los otros algoritmos para llegar a resultados semejantes a los obtenidos con el PHC, ya que en algunos intervalos la rapidez de cambio de la corriente de compensación se hace mayor a la que puede entregar el inversor, lo que genera distorsiones en las corrientes que circulan por la red de alimentación como se observa en la figura 10 (f).

Los demás algoritmos, pq , UPF y pqr , no son recomendables en el caso de voltajes distorsionados, ya que la reducción de armónicos no es considerable, llegando incluso a generar más armónicos cuando se conecta el compensador como es el caso del algoritmo UPF . Lo atractivo de estos métodos es que no requieren de un PLL o de filtros pasa banda en su funcionamiento, como sucede en el $dq0$ y PHC . Se deja como un trabajo futuro, observar los resultados que se obtienen con estos tres métodos al modificarlos en su estructura a través de la incorporación de filtros pasa banda, para generar condiciones sinusoidales en el voltaje en el cálculo de las corrientes de compensación.

Referente a los resultados obtenidos con el controlador de tensión dc del inversor, se observó que el voltaje se mantiene cercano al esperado, con lo cual se valida el procedimiento y cálculo de la constante del controlador. Finalmente, los valores promedio y máximo de la frecuencia de conmutación de los IGBT, usando PWM por banda fija de histéresis se mostraron semejantes independiente del algoritmo empleado, por lo que ninguno de los algoritmos muestra alguna ventaja considerable en este aspecto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akagi, H.; Kanazawa, Y. y Nabae, A. (1984). Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1A-20(3), 625-630. <http://doi.org/10.1109/TIA.1984.4504460>
- Alzate, A.; Murillo, Y. y Silva, C. (2017). Prototipo para la compensación de armónicos en sistemas trifásicos. *Revista Tecnura*, 20(50), 96-105. DOI: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.4.a07
- Asiminoael, L.; Blaabjerg, F. y Hansen, S. (2007). Detection is key—Harmonic detection methods for active power filter applications. *IEEE Industry Applications Magazine*, 13(4), 22-33. <http://doi.org/10.1109/MIA.2007.4283506>
- Buso, S.; Malesani, L. y Mattavelli, P. (1998). Comparison of current control techniques for active filter applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 45(5), 722-729. <http://doi.org/10.1109/41.720328>
- Cavallini, A. y Montanari, G.C. (1994). Compensation strategies for shunt active-filter control. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 9(6), 587-593. <http://doi.org/10.1109/63.334773>
- Grino, R.; Cardoner, R.; Costa-Castello, R. y Fossas, E. (2007). Digital Repetitive Control of a Three-Phase Four-Wire Shunt Active Filter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 54(3), 1495-1503. <http://doi.org/10.1109/TIE.2007.894790>
- Hsu, C.Y. y Wu, H.Y. (1996). A new single-phase active power filter with reduced energy-storage capacity. *IEE Proceedings—Electric Power Applications*, 143(1), 25-30. <http://doi.org/10.1049/ip-epa:19960205>
- Kale, M. y Ozdemir, E. (2005). An adaptive hysteresis band current controller for shunt active power filter. *Electric Power Systems Research*, 73(2), 113-119. <http://doi.org/10.1016/j.epsr.2004.06.006>
- Kanjiya, P.; Khadkikar, V. y Zeineldin, H.H. (2015). Optimal Control of Shunt Active Power Filter to Meet IEEE Std. 519 Current Harmonic Constraints Under Nonideal Supply Condition. *IEEE Transactions on*

- Industrial Electronics*, 62(2), 724-734. <http://doi.org/10.1109/TIE.2014.2341559>
- Kim, H. y Akagi, H. (1999). The instantaneous power theory on the rotating p-q-r reference frames. En Proceedings of the IEEE 1999 International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 1999. PEDS '99 (Vol. 1, pp. 422-427). <http://doi.org/10.1109/PEDS.1999.794600>
- Kim, H.; Blaabjerg, F.; Bak-Jensen, B. y Choi, J. (2002). Instantaneous power compensation in three-phase systems by using p-q-r theory. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 17(5), 701-710. <http://doi.org/10.1109/TPEL.2002.802185>
- Luna, A.; Rocabert, J.; Candela, J.I.; Hermoso, J.R.; Teodorescu, R.; Blaabjerg, F. y Rodríguez, P. (2015). Grid Voltage Synchronization for Distributed Generation Systems Under Grid Fault Conditions. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(4), 3414-3425. <http://doi.org/10.1109/TIA.2015.2391436>
- Rafiei, S.M.R.; Toliyat, H.A.; Ghazi, R. y Gopalarathnam, T. (2001). An optimal and flexible control strategy for active filtering and power factor correction under non-sinusoidal line voltages. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 16(2), 297-305. <http://doi.org/10.1109/61.915499>
- Ranjbar, M.; Masoum, M.A.S. y Jalilian, A. (2009). Comparison of compensation strategies for shunt active power filter control in unbalanced three-phase four-wire systems. En: Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2009. CCECE '09 (pp. 1061-1066). <http://doi.org/10.1109/CCECE.2009.5090291>
- Rashid, M. (2011). *Power electronics handbook*. Third Edition. ISBN: 978-0-12-382036-5 Elsevier. Printed in the USA.
- Rodríguez, C.L.T.; Fuente, D.V.D.L.; Amorós, E.F.; Sanfeliú, G.G. y Moreno, J.G. (2012). Diseño, modelado e implementación de inversor conectado a la red eléctrica a partir de fuentes renovables. *Revista Tecnura*, 16(32), 12-28.
- Ucar, M. y Ozdemir, E. (2008). Control of a 3-phase 4-leg active power filter under non-ideal mains voltage condition. *Electric Power Systems Research*, 78(1), 58-73. <http://doi.org/10.1016/j.epsr.2006.12.008>





Comparative analysis of threshold voltage extraction techniques based in the MOSFET gm/ID characteristic

Comparación de las técnicas de extracción del voltaje de umbral basadas en la característica gm/ID del MOSFET

Arturo Fajardo Jaimes¹

Fecha de recepción: 4 de febrero de 2016

Fecha de aceptación: 15 de febrero de 2017

Cómo citar: Fajardo J., A. (2017). Comparación de las técnicas de extracción del voltaje de umbral basadas en la característica gm/ID del MOSFET. *Revista Tecnura*, 21(52), 32-44. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.2.a02

Abstract

Context: In advanced ultralow-power devices, it is necessary to use the accuracy extraction procedures of the MOSFET threshold voltage to fully characterize the devices. These procedures are based in the measurement of the Trans-conductance efficiency (gm/ID) and its first derivative in function of the voltage gate source (d(gm/ID)/dVGS). In order to increase their independency respect to the non-zero drain source voltage (VDS ≠ 0) it is used a process to correct the error. Theoretically, VDS should be 0 V; however, the VDS is greater than 10 mV in the experimental setup in order to avoid electrical noise, but less than a certain maximum value for allowing the MOSFET operation in the linear region of the weak inversion.

Objective: To compare the extraction procedure proposed by (MC Schneider et al., 2006) and the method proposed by (Rudenko et al., 2011) with a generic, controlled and coherent test scenario.

Method: This paper proposes a test scenario based on the Advanced Compact MOSFET model (ACM) of a long channel MOSFET made in a standard 0.35 μm CMOS process, implemented numerically in MATLAB[®]. The concept of Power Error Correction (PEC) was used to compare the two processes numerically;

it quantifies the sensitivity of the extraction process to the effect by the non-zero voltage value of the VDS in the experimental setup (i.e., NZ-DS effect).

Results: The error correction procedure proposed by (Siebel et al., 2012, Schneider et al., 2006) estimates the NZ-DS effect better than the procedure proposed by (Rudenko et al., 2011), considering the average, maximum and minimum PEC obtained for both extraction methodologies for a long channel MOSFET fabricated in a standard CMOS process of 0.35 μm, when the VDS is less than 50 mV.

Conclusions: The Vth extraction procedure proposed by (MC Schneider et al., 2006) is more robust than the method proposed by (Rudenko et al., 2011) regarding the NZ-DS effect.

Keywords: Threshold Voltage Extraction, MOSFET Modeling, Gm/ID transconductance efficiency.

Resumen

Contexto: En los dispositivos de ultrabaja potencia son necesarios procedimientos precisos de extracción de voltaje de umbral del MOSFET. Estos se basan en la medición de la eficiencia de la transconductancia (gm/ID) y su primera derivada respecto al voltaje puerta-fuente (d(gm/ID)/dVGS). Para

¹ Ingeniero electrónico, magíster en Electrónica. Profesor Asistente Pontificia Universidad Javeriana. Bogota, Colombia. Contacto: fajardo@javeriana.edu.co

umentar en algunas decenas de mV la precisión del voltaje de umbral extraído, se recurre a un proceso de corrección de errores que disminuye la influencia del voltaje drenó-fuente (VDS) que teóricamente debería ser 0 V. Típicamente, en el montaje experimental, el VDS es mayor a 10 mV con el fin de evitar el ruido eléctrico, pero menor a un cierto valor máximo con el fin de permitir que el MOSFET siempre opere en su región lineal.

Objetivo: Comparar el procedimiento de extracción propuesto por Schneider *et al.* (2006) y el método propuesto por Rudenko *et al.* (2011) con un escenario de prueba genérico, controlado y coherente.

Método: Se implementó un escenario de prueba en el software *Matlab*[®] para un MOSFET de canal largo fabricado en un proceso estándar CMOS de 0,35 μm , usando el modelo Advanced Compact MOSFET (ACM). Para comparar los dos procesos de extracción se tomó el concepto de potencia de corrección del error (PEC), el valor de este cuantifica la

sensibilidad del proceso de extracción con respecto al valor no 0V del VDS usado experimentalmente (i.e., efecto NZ-DS).

Resultados: Considerando el promedio, el máximo y el mínimo PEC obtenido para ambas metodologías de extracción, el procedimiento de corrección de errores propuesto en Siebel, Schneider y Galup (2012) y Schneider *et al.* (2006) estima el efecto NZ-DS mejor que el procedimiento propuesto en Rudenko *et al.* (2011) para un MOSFET de canal largo fabricado en un proceso estándar CMOS de 0,35 μm , cuando el VDS es inferior a 50 mV.

Conclusiones: El procedimiento de extracción de V_{th} propuesto por Schneider *et al.* (2006) es más robusto que el sugerido en Rudenko *et al.* (2011) con respecto al efecto NZ-DS.

Palabras clave: extracción del voltaje de umbral, modelamiento de MOSFET, eficiencia transconductancia Gm/ID.

INTRODUCTION

Power consumption awareness began in the nineties. Nowadays, every circuit has to face the power consumption issue in both portable devices (e.g., for increasing the battery life) and high-end circuits (e.g., for avoiding packages and reliability issues). The advances in the solid-state devices had a direct impact in the efficiency and the cost of the electronic equipment (Sarmiento 2004); in particular, high-efficient systems such as inverters (Fajardo *et al.* 2014) and power supplies (Hernández *et al.* 2012) have been explored using high-frequency power MOSFET (i.e., Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor). Considering the micro-scale electronic systems, the power consumption has had a big reduction since the first integrate circuit; furthermore, the power reduction started with the invention of the complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) technology that allows the reduction of the static power consumption. The

designing of integrate circuits using ultra-low power techniques, such as supply voltage reduction, sub threshold operation, and Biasing MOSFETs at very low current are not rare nowadays. Consequently, there have been dedicated proposed models for modeling the MOSFET in all its operation regions, including weak, moderate and strong inversion (Schneider *et al.* 2010).

The estimation of the MOSFET threshold voltage (V_{th}) is critical to model the complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) circuits, particularly on the design of ultra-low-power devices (Rudenko *et al.* 2011), (Siebel *et al.* 2012). The V_{th} is basically the gate source voltage (VGS) level necessary in the MOSFET to start working in Strong Inversion (SI). To identify a hard threshold in the drain current (ID) vs. gate source voltage (VGS) characteristic is difficult, because the continuous nature of the involved physical phenomena. Therefore, many researches have proposed V_{th} definitions and extraction procedures (Siebel *et al.* 2012).

The extraction procedures generally use the ID vs. VGS characteristic of the MOSFET (Ortiz-Conde et al. 2002). Furthermore, most of them use only one regime of operation (i.e., ID–VG methods), the SI region or the Weak Inversion (WI) region in both its linear and saturation operation. However, the Vth extracted data using these approaches is inaccurate because the Vth occurs in the transition region between WI and SI (Schneider et al. 2010).

Recently, new physic-based Vth definitions have been proposed because of the introduction of charge-based models (Schneider et al. 2010). In addition, accurate extraction methods based in the measurement of the transconductance efficiency (gm/ID) and the transconductance efficiency change (d(gm/ID)/dVG) have been proposed by (Siebel et al. 2012, Schneider et al. 2006). Parasitic effects (such as drain or source series resistances and channel mobility degradation) tend to have less influence in these extraction techniques. Furthermore, they are less sensitive to short channel effects such as velocity saturation. However, these charge-based definition and extraction methods can be used for finding the conventional Vth value used in the potential-based models. The charge-based definition of the Vth involves a physically impossible extraction setup because both the gm/ID and the d(gm/ID)/dVG characteristics must be measured with the MOSFET operating at zero drain source voltage (VDS=0). However, the MOSFET in the real setup operates in its linear region with a very low voltage for decreasing the parasitic effects, but it is high enough to sense the ID (Schneider et al. 2010). All of these techniques propose a correction methodology in order to reduce the non-zero drain-to-source (NZ-DS) effect present on the Vth extraction methods, but a direct comparison of these methodologies based in the reported results is too difficult

or even impossible to do. Recently, (Fajardo et al. 2013) proposed the power error correction (PEC) of NZ-DS effect concept to analyze the error correction in these methodologies of Vth extraction.

The fundamental purpose of this paper is to compare the accuracy of the gm/ID method proposed by (Schneider et al. 2006) and the d(gm/ID)/dVG method proposed by (Rudenko et al. 2011), using the power error correction (PEC) concept proposed by (Fajardo et al. 2013). Additionally, this paper develops a comprehensible presentation of the NZ-DS effect using analytical models, and implements a generic, controlled and consistent test scenario in MATLAB® for a long channel MOSFET made in a 0.35 μm CMOS standard process using the Advanced Compact MOSFET (ACM) model.

METHODOLOGY

Advanced Compact MOSFET (ACM) Model.

The ACM model represents the device behavior in all regimes of operation using an analytical equation set (Schneider et al. 2006). The following are the ACM equations explored in this paper (Equations (1) to (5)).

$$ID = \mu \frac{W}{L} \left[\frac{(Q'_{IS}{}^2 - Q'_{ID}{}^2)}{2C'_{ox}n} - \phi_t (Q'_{IS} - Q'_{ID}) \right] \quad (1)$$

$$V_p - VS(D) = \phi_t \left[\frac{Q'_{IP} - Q'_{IS(D)}}{nC'_{ox}\phi_t} + \ln \left(\frac{Q'_{IS(D)}}{Q'_{IP}} \right) \right] \quad (2)$$

$$V_p = \phi_{sa} - 2\phi_F - \phi_t \left[1 + \ln \left(\frac{n}{n-1} \right) \right] \approx \frac{VG - V_{th}}{n} \quad (3)$$

$$\frac{gm}{ID} = \frac{1}{n\phi_t - \frac{(Q'_{IS} + Q'_{ID})}{2C'_{ox}}} \quad (4)$$

$$\frac{d}{dVG} \left(\frac{gm}{ID} \right) = \frac{1}{2C'_{ox}} \left(n\phi_t - \frac{Q'_{IS} + Q'_{ID}}{2C'_{ox}} \right)^{-2} \left(\frac{Q'_{IS}}{n\phi_t - \frac{Q'_{IS}}{C'_{ox}}} + \frac{Q'_{ID}}{n\phi_t - \frac{Q'_{ID}}{C'_{ox}}} \right) \quad (5)$$

Where, μ is the mobility of the carriers in the semiconductor substrate, C'_{ox} is the oxide capacitance per unit area, L and W are the channel length and the channel width of the MOSFET respectively, Q'_{ID} is the drain inversion charge density, Q'_{IS} is the source inversion charge density, Q'_{IP} is the pinch-off charge density, V_p is the channel pinch-off voltage, ϕ_F is the Fermi potential, ϕ_{sa} is the surface potential, V_S is the source bulk voltage, V_D is the drain bulk voltage, V_G is the gate bulk voltage, n is the slope factor, and ϕ_t is the thermal voltage given equation (6) as follows.

$$\phi_t = \frac{kT}{q} \quad (6)$$

Where q is the elemental electron charge, k is the Boltzmann constant, and T the absolute temperature. A script was implemented for solving the equations (1) to (5), assuming that the MOSFET was in non-saturated operation in the WI region. Furthermore, the test scenario considered a long channel NMOS transistor ($W/L=32\mu\text{m}/3.2\mu\text{m}$) at a temperature of 27°C , and the technological parameters of the standard $0.35\ \mu\text{m}$ CMOS process (i.e., acceptor doping concentration $N_A=6 \times 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$, oxide thickness $t_{ox}=7.8\ \text{nm}$, low field mobility $m_0 = 0.36238\ \text{m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, and flat band voltage $V_{FB}=0.8\ \text{V}$). (Schneider et al. 2010) presents an analytic expression for the equilibrium threshold voltage (V_{th}); this expression allows the V_{th} calculus from technological parameters, as shown in (7).

$$V_{th} = V_{FB} + 2\phi_f + \gamma\sqrt{2\phi_f} \quad (7)$$

Table 1. Charge based definition of threshold voltage summary.

Notation	Vth Definition	Gm/ID RPD VDS=0	Value of qI VGS=Vth	Relative difference to classical definition $\phi_s = 2\phi_F$
Vthq1	$Q'_I = -nC'_{ox}\phi_t$	50 %	1	$\phi_t \left(1 + n \ln \left(\frac{n}{n-1} \right) \right)$
Vthq0.5	$\max \left(-\frac{\partial}{\partial V_g} \left(\frac{g_m}{I_D} \right) \right)$	100/3 %	0.5	$\phi_t \left(1 + n \left[\ln \left(\frac{n}{2(n-1)} \right) - 0.5 \right] \right)$

Source: own work, based on (Schneider et al. 2006).

Where, γ is the so-called body-effect factor.

Threshold voltage (Vth) definitions

The V_{th} concept is directly related to the physical phenomenon that prevails in the current flow when the MOSFET goes from WI to SI. The V_{th} in the surface potential based models (Tsividis et al. 1999) is the VGS that produces a surface potential equal to twice the Fermi potential ($\phi_s = 2\phi_F$). On the other hand, in the charge-based models (i.e., EKV, ACM), the V_{th} is the VG value associated to the threshold inversion charge density (Q'_{th}). Additionally, both V_{th} values are related by the analytic expressions (Siebel et al. 2012) summarized in table 1.

The V_{th} extraction is generally based in the gm/ID extraction (Siebel et al. 2012, Schneider et al. 2006) in advanced ultra-low power applications. In order to understand this methodology we must discuss the gm/ID and the $(d(\text{gm}/ID)/dV_G)$ concepts using the charge-based model framework. The gm/ID is a quality factor of how much transconductance (gm) is produced for a given unit of bias current (Binkley 2007). The gm/ID in the bipolar transistor device is maintained at a constant high value over multiple tens of collector current. Unfortunately, the MOSFET device gm/ID is maximum in the WI region (always less than the gm/ID of the bipolar transistor), and drops significantly when operating in the SI region (Schneider et al. 2010). The gm/ID behavior (i.e., high for MI and low for SI and soft in the transition) allows defining directly the V_{th} from a specific inversion charge using the ACM model.

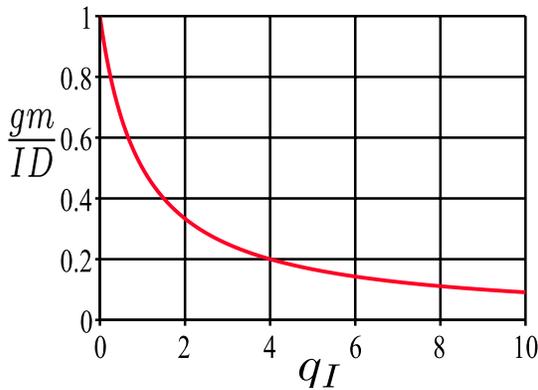
Defining the normalized inversion charge (q_i) by equations (8) and (4), we expressed the gm/ID as a function of the normalized charges in the MOS channel in equation (9). Also, using equations (8) and (2) we found the VDS as a function of the channel charges in equation (10). The normalized gm/ID (gm/ID_n) can be calculated using equation (11), this expression was found using equations (10) and (9), and assuming $VDS=0$ (i.e., MOS capacitor analysis $q_i = q_{ID} = q_{IS}$). As shown in figure 1(a), the gm/IDn characteristic is monolithical and without discontinuities. Therefore, the relative to the peak drop (RPD) can be used as a metric if we choose a RPD of 50% as the transition point between WI and SI, the related inversion charge would be $q_i=1$.

$$q_i = \frac{Q'_I}{Q'_{IP}} \quad ; \quad Q'_{IP} = -nC'_{ox}\phi_t \quad (8)$$

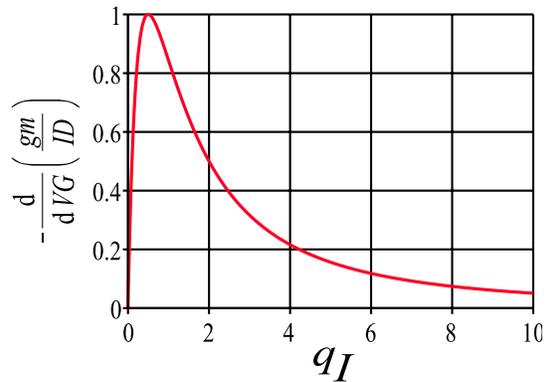
$$\left(\frac{gm}{ID}\right)_{nor} = \frac{gm}{ID} \left(\left(\frac{gm}{ID}\right)_{max}\right)^{-1} = \frac{2}{2 + q_{ID} + q_{IS}} = \frac{2}{2 + 2q_I} \quad (11)$$

$$-\frac{d}{dVG} \left(\frac{gm}{ID}\right) = \frac{1}{(n\phi_t)^2} \frac{\left(\frac{q_{IS}}{1+q_{IS}} + \frac{q_{ID}}{1+q_{ID}}\right)}{(2 + q_{IS} + q_{ID})^2} = \frac{2}{(n\phi_t)^2} \frac{\left(\frac{q_I}{1+q_I}\right)}{(2 + 2q_I)^2} \quad (12)$$

$$\left(-\frac{d}{dVG} \left(\frac{gm}{ID}\right)\right)_{nor} = \frac{d}{dVG} \left(\frac{gm}{ID}\right) \left(\frac{d}{dVG} \left(\frac{gm}{ID}\right)_{max}\right)^{-1} = \frac{27}{4} \frac{q_I}{(1+q_I)^3} \quad (13)$$



a) gm/IDn vs q_i .



b) $d(gm/ID)/dVG_n$ vs. q_i

Figure 1. Transconductance MOSFET Characteristics.

Source: own work.

The gm/IDn and the d(gm/ID)/dVG are plotted in figure 1. As shown in figure 1(b), d(gm/ID)/dVGn has a maximum value between WI and SI (i.e., high and low values of q_i); therefore, this maximum is chosen as a threshold between WI and SI operation. On the other hand, gm/IDn (figure 1(a)) does not have any particular characteristic in the transition.

The common charge-based definition of V_{th} is q_{lth}=q_{lth0.5}=0.5 or q_{lth}=q_{lth1}=1. If we use the q_{lth1} definition, the V_{th} is the voltage that produces the same drift and diffusion components of the drain current. On the contrary, if q_{lth0.5} is used for defining the V_{th}, it represents the voltage that produces the maximum value of the d(gm/ID)/dVG characteristic. The table 1 shows the V_{th} definitions, the used notation, the gm/ID RPD, the value of the q_i at V_{th}, and the voltage difference between the classical and the charge V_{th} definitions.

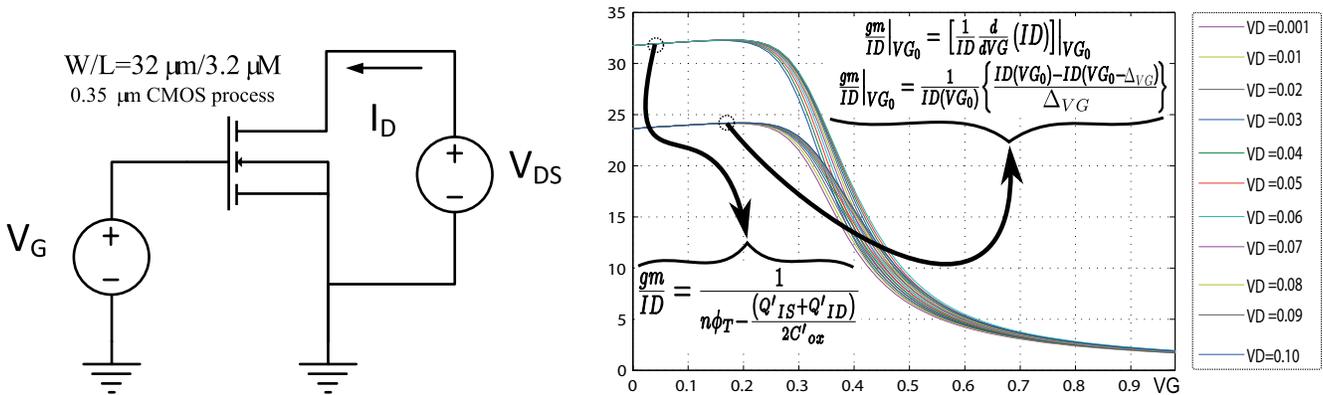
Transconductance efficiency (gm/ID) methods used for V_{th} extraction

Some error source in gm/ID and d(gm/ID)/dVG extraction process

The test setup used for the V_{th} extraction process (applying the gm/ID methods) is shown in figure 2(a). The V_{DS} was replaced from 10mV to

50mV for any V_{DS} value the gm/ID, and the d(gm/ID)/dVG characteristics were extracted as functions of the gate voltage. Additionally to the usual error involved in any empirical measurement, the error introduced by the numerical derivatives calculus of the gm/ID, the d(gm/ID)/dVG characteristics, and the NZ-DS effect must be considered in this experimental setup. To show error influence, some normalized gm/ID curve samples (for several ID values) were calculated using the charge based expressions of the ACM model (equations (1) to (5)); then these curve samples were evaluated using the numerically derivatives of the correspondent drain current samples. The resulting curves were plotted in figure 2(b) where it is possible to see the impact of the numerical error especially for low values of the gate voltage (low measured current).

This work calculates the gm/ID and d(gm/ID)/dVG characteristics using the charge-based expressions which are the equations (4) and (5), so the error generated by the numerical calculus of these characteristics is not present. Furthermore, this controlled environment permits to evaluate in an easy way the PEC for the NZ-DS effect on the accuracy V_{th} extraction for advanced ultra-low power devices proposed by (Siebel et al. 2012, Schneider et al. 2006) because it is the only error source present in the extraction methodology.

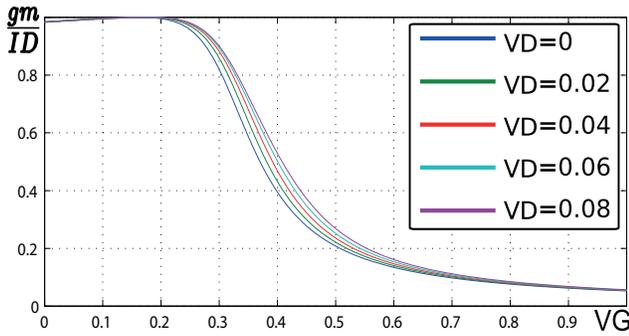


a) Circuit topology for measures.

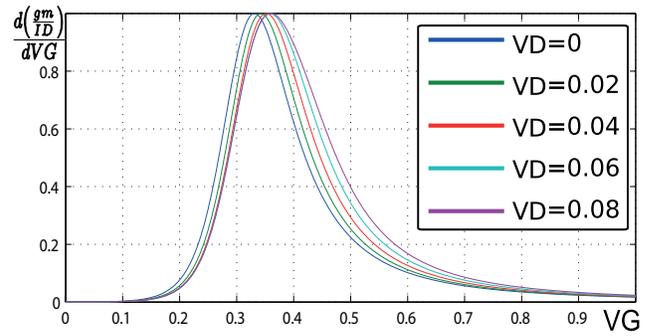
b) Extracted by derivative calculus.

Figure 2. gm/ID characteristic.

Source: own work



a) gm/ID vs. VG.



b) d(gm/ID)/dVG vs. VG.

Figure 3. Some normalized characteristic results.

Source: own work

In order to analyze the NZ-DS effect, figure 3 presents the gm/ID and d(gm/ID)/dVG characteristics calculated with the charge-based expressions. In figure 3(a) it is clear that the NZ-DS effect is increased by the VDS growth, therefore the Vth extracted using the operational definition (RPD of 50% or 75%) increases too. Secondly, figure 3(b) makes it clear that the NZ-DS effect is the variation of the d(gm/ID)/dVG maximum point. In conclusion, the NZ-DS effect increases the extracted Vth; this effect must be corrected in order to have better accuracy of the extraction procedures in some mV.

The Vth extraction procedures based in the gm/ID characteristic.

When the VG=Vth and VS=0 (because our circuit topology $q_{iS} = q_{iTh}$), and using equation (8), we can rewrite equation (10) as equation (16).

$$VD = \phi_t \left[q_{I_{th}} - q_{ID} + \ln \left(\frac{q_{I_{th}}}{q_{ID}} \right) \right] \quad (14)$$

Then, we found the gm/ID value related to the Vth charge condition as a function of the VD. Furthermore, we found the analytical expressions of the normalized gm/ID (i.e., gm/IDn) as a function of the VD using the common charge-based definitions of Vth (i.e., $q_{iTh} = q_{iTh0.5} = 0.5$ and $q_{iTh} = q_{iTh1} = 1$) and equations (11) and (14). These founded expressions are given by equations (15) and (16).

$$\left(\frac{gm}{ID} \right)_{nq0.5} = \frac{2}{2.5 + \left(W_0 \left\{ 0.5 \cdot \exp \left(\frac{\phi_t - 2 \cdot VD}{2\phi_t} \right) \right\} \right)^{-1}} \quad (15)$$

$$\left(\frac{gm}{ID} \right)_{nq1} = \frac{2}{3 + \exp \left(1 - \frac{VD}{\phi_t} - W_0 \left\{ \exp \left(1 - \frac{VD}{\phi_t} \right) \right\} \right)} \quad (16)$$

Where the $gm/IDn_{q0.5}$ and gm/IDn_{q1} are the gm/IDn values related to the VGS (or VG) that creates a superficial inversion charge density of $q_{lth1}^*Q'_{IP}$ and $q_{lth0.5}^*Q'_{IP}$ respectively; $W_0\{*\}$ is the Lambert function (Corless et al. 1996). This expression can be simplified for very low values of VDS as $gm/IDn_{q0.5} = 2/3$ or $gm/IDn_{q1} = 0.5$. Therefore, the extraction procedures consist of determining the gate voltage (i.e., $V_{thq0.5}$ or V_{thq1}) at which the gm/IDn vs. VGS characteristic is equal to 50% or 66.66%. Then it is necessary to correct the NZ-DS effect of the extracted value. (Siebel et al. 2012, Schneider et al. 2006) reports a closed expression for calculating the incremental

error present in the gm/ID characteristic $\Delta(gm/ID)$, these errors for $q_{lth0.5}$ and q_{lth1} are given by equations (17) and (18).

We used the incremental error in the gm/IDn and then extract the V_{th} ($V_{thq0.5}$ or V_{thq1}) by simply determining the VGS at which the gm/IDn characteristics are equal to the ideal condition plus the incremental error (equation (19)).

Figure 4(a) shows the $\Delta(gm/ID)$ behavior for low values of VDS, and figure 5(a) illustrates all the extracting process. On the other hand, (Rudenko et al. 2011) proposes for $V_{thq0.5}$ an error correction based in the incremental error ΔV_{th} , given by equation (20).

$$\Delta\left(\frac{g_m}{ID}\right)_{nq0.5} = \left(\frac{g_m}{ID}\right)_{nq0.5} \cdot \frac{-2}{3} \quad (17)$$

$$\Delta\left(\frac{g_m}{ID}\right)_{nq1} = \frac{2}{3 + \exp\left(1 - \frac{VD}{\phi_t} - W_0\left\{\exp\left(1 - \frac{VD}{\phi_t}\right)\right\}\right)} \cdot 0.5 \quad (18)$$

$$\left(\frac{g_m}{ID}\right)_{nq1(0.5)} = \left(\frac{g_m}{ID}\right)_{nq1(0.5), V_{DS}=0} + \Delta\left(\frac{g_m}{ID}\right)_{nq1(0.5)} \quad (19)$$

$$\Delta V_{th} = n\phi_t \left[\ln(0.5) + \ln\left(\sqrt{1 + \frac{16}{1 + \exp\left(-\frac{2V_D}{3\phi_t}\right)}} - 1\right) + 0.25 \left(\sqrt{1 + \frac{16}{1 + \exp\left(-\frac{2V_D}{3\phi_t}\right)}} - 3\right) \right] \quad (20)$$

ΔV_{th} is shown in figure 4 (b). The error less $V_{thq0.5}$ is equal to the ideal condition plus the incremental error (equation (21)).

$$V_{th0.5} = V_{th0.5, V_{DS}=0} + \Delta V_{th} \quad (21)$$

Where we extracted the $V_{thq0.5}$ from the gm/IDn characteristic (RPD 66.66%) or from $d(gm/ID)/dVG$ characteristic ($V_{th}=VGS$ where $d(gm/ID)/dVG$ is maximum), then we estimate the error with equation (20) and determine the $V_{thq0.5}$ using equation

(21). Figure 5(b) illustrates all the extracting processes for the $d(gm/ID)/dVG$ characteristic.

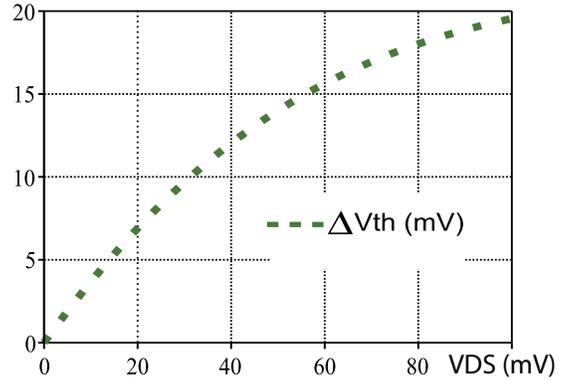
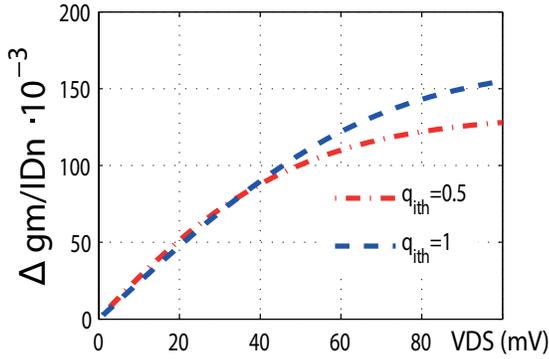
Power Error Correction in V_{th} extraction gm/ID Methods

(Fajardo et al. 2013) defines the PEC with the following equation (22).

$$PEC = 100 \cdot \left(1 - \frac{E_c}{E_0}\right) \quad (22)$$

Where E_c is the error of the extracted V_{th} for a V_{DS} sweep from 0 mV to V_{max} using the correction factor of the method, and E_0 is the mean of the extracted V_{th} for the same V_{DS} sweep without using

the correction factor. The V_{max} value is a technology value for a particular analyzed device; particularly for the long channel NMOS transistor studied in this paper, this value was set to 50 mV.

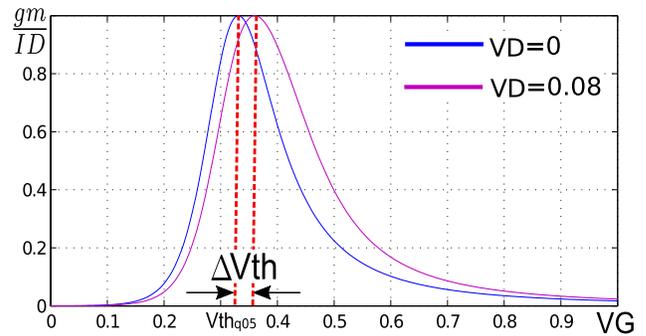
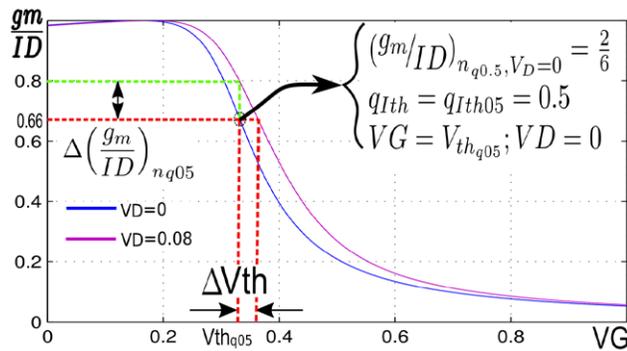


a) $\Delta gm/ID$

b) ΔV_{th}

Figure 4. NZ-DS effect correction factor

Source: own work



a) On the gm/ID characteristic. b) On the $d(gm/ID)/d$ characteristic.

Figure 5. NZ-DS effect

Source: own work

RESULTS

Consistency Analysis of the simulation results and the extraction methods.

First, we extracted the V_{th} from the simulation data using the charge-based expressions (figure 6(a)). The extracted values were summarized in equation (23).

$$v_{thq0.5} = 333.4 \text{ mV} ; v_{thq1} = 370.2 \text{ mV} \quad (23)$$

Where $v_{thq0.5}$ and v_{thq1} are the V_{th} extracted values using the charge-based definition $q_{lth} = q_{lth0.5} = 0.5$ and $q_{lth} = q_{lth1} = 1$, respectively. Second, we extracted the value of the slope factor (n) for these MOSFET operation points using the simulation data

(figure 6(b)), and the extracted values were summarized in equation (24).

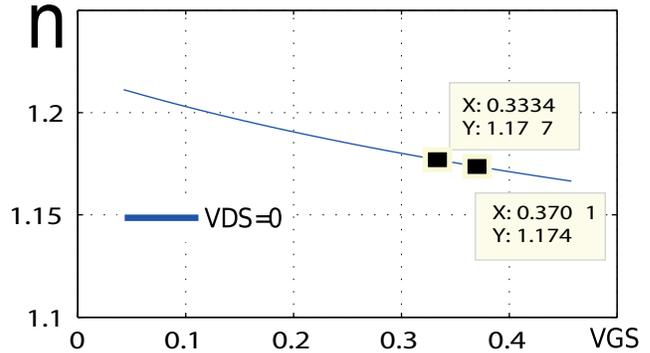
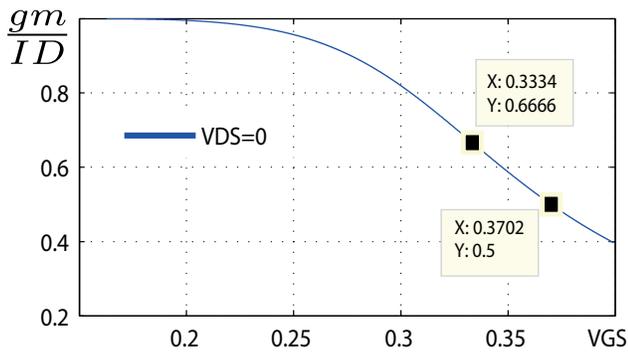
$$n(v_{thq_{0.5}})=1.177 \quad ; \quad n(v_{thq_1})=1.174 \quad (24)$$

We estimated the classical Vth (the Vth used in the potential-based models) of this process from the values in equations (23) and (24) and using the relationship between the classical definition and

the charge-based definition of Vth, summarized in table 1. Equation (25) shows the results.

$$v_{th1} = 286.7 \text{ mV} \quad ; \quad v_{th2} = 285.8 \text{ mV} \quad (25)$$

Where v_{th1} and v_{th2} are the estimated values of the classical Vth and were based on $q_{lth0.5}$ and q_{lth1} respectively.



a) Vth from gm/ID vs. VG with VDS=0.

b) Slope Factor at the extracted Vth values.

Figure 6. Extraction parameters from the numerical simulation.

Source: own work

Finally, we calculated the Vth of this process using equation (7). The resulting value was 283.6 mV. As we expected, the extracted and calculated values of the Vth were almost the same (the error was less than 3mV); therefore, it is possible to affirm that the test scenario for a long channel MOSFET implemented in MATLAB® is consistent.

Vth Results using gm/ID method

Using the generic, controlled and consistent test scenario for the long channel MOSFET fabricated in a 0.35 mm CMOS standard process, we obtained from both gm/ID and d(gm/ID)/dVG the V_{thq} data with and without correction for a parametric sweep of the VDS from 0.1mV to 50mV. Figure 7 presents the Vth extracted from the charge-based expressions (with and without NZ-DS effect). The

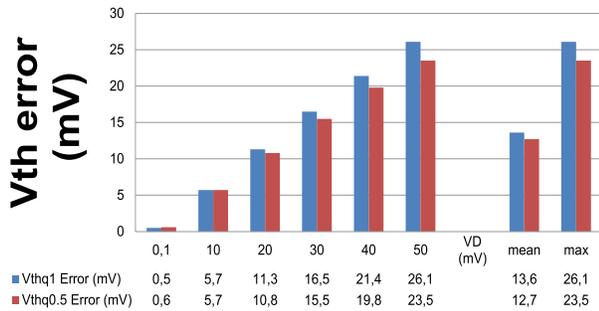
PEC was calculated for the analyzed methodologies using equation (22), and the results were summarized in figure 7. If we consider all the analyzed VDS range (100mV-50mV), the error correction procedure proposed by (Siebel et al. 2012, Schneider et al. 2006) estimates the NZ-DS effect better than the procedure proposed by (Rudenko et al. 2011) in the case of a long channel MOSFET fabricated in a 0.35 mm CMOS standard process, but in the range near the typical voltage used in an experimental setup (VDS=10mV-20mV) the PEC of both methodologies is similar.

Comparative analysis of the PEC.

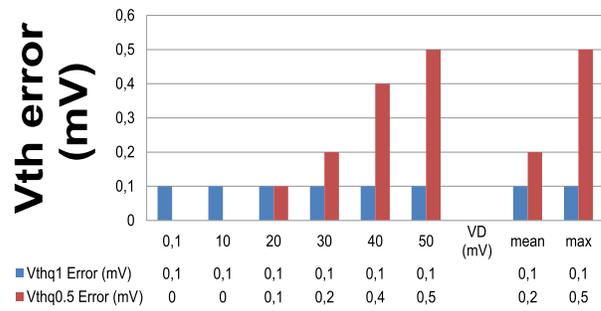
Figure 8 presents the mean, the maximum, and the minimum PEC achieved for each methodology in order to compare the two analyzed Vth extraction

methodologies. Considering this figure, the error correction procedure proposed by (Siebel et al. 2012, Schneider et al. 2006) estimates the NZ-DS effect better than the procedure proposed by (Rudenko et al. 2011) for a long channel MOSFET fabricated in a 0.35 mm CMOS standard process

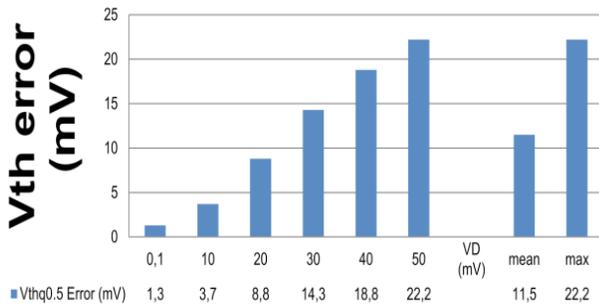
when the VDS is less than 50mV. This methodology permits PEC always better than 80%; therefore, the correction procedure proposed by (Siebel et al. 2012, Schneider et al. 2006) is more robust and reliable than the procedure proposed by (Rudenko et al. 2011).



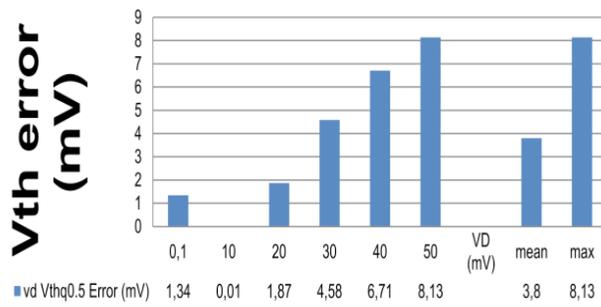
a) gm/ID w/o correction.



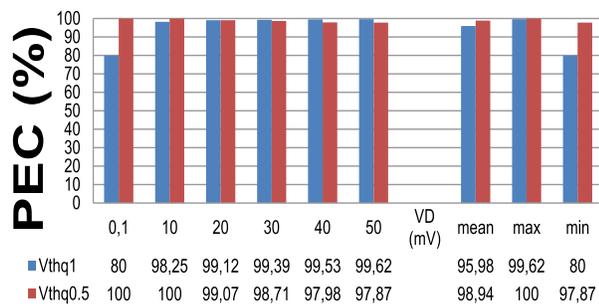
b) gm/ID with correction.



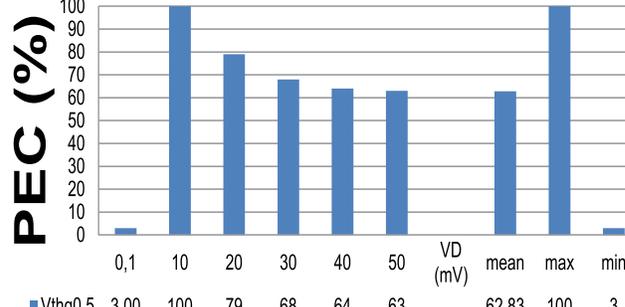
c) d(gm/ID)/dVg w/o correction.



d) d(gm/ID)/dVg with correction.



e) PEC results using gm/ID.



f) PEC results using d(gm/ID)/dVg.

Figure 7. Vth error using gm/ID and d(gm/ID)/dVg with and without NZ-DS correction.

Source: own work

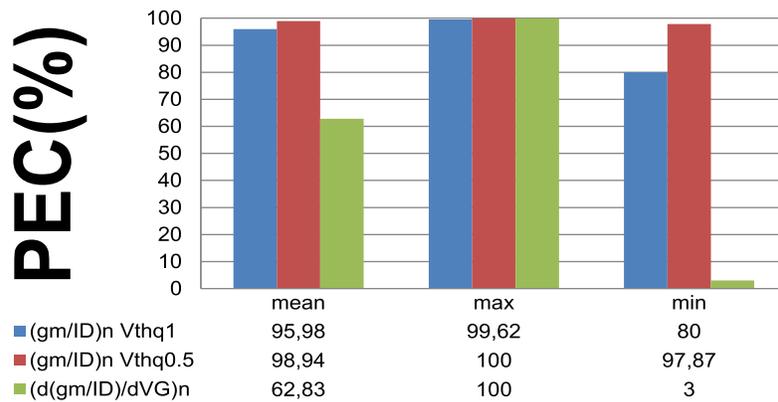


Figure 8. Comparative analysis of the PEC of NZ-DS effect correction

Source: own work

CONCLUSIONS

This paper compares the common extractions techniques proposed by (Rudenko et al. 2011, Siebel et al. 2012) in presence of non-zero drain source voltage (NZ-DS) effect, using the PEC concept proposed by (Fajardo et al. 2013) and a generic, controlled and consistent test scenario for a long channel MOSFET fabricated in a 0.35 mm CMOS standard process. In all the device operation on the linear region, the error correction procedure proposed by (Siebel et al. 2012, Schneider et al. 2006) estimates the NZ-DS effect better than the procedure proposed by (Rudenko et al. 2011), but in the typical voltage used in an experimental setup both methodologies are similar.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was partially supported by COLCIENCIAS, and the Pontificia Universidad Javeriana. Also, the author would like to thank all the students of the Radio Frequency Integrated Circuits Group (GRF-UFSC) for the important discussions.

REFERENCES

- Binkley, D.M. (2008). Tradeoffs and Optimization in Analog CMOS Design. Chichester: John Wiley & Sons -Interscienc.
- Corless, R.M. et al. (1996). On the LambertW Function. *Advances in Computational Mathematics*, 5(1), 329-359.
- Fajardo, A. & Montoro, C.G. (2013). *Correction of the Errors due to the Non Zero Drain-to-Source Voltage in the gm/ID Based Vth Extraction Methods*. Proceedings of the MICROELECTRONICS STUDENTS FORUM (SFORUM in Curitiba,Brazil) <http://www.lbd.dcc.ufmg.br/colecoes/sforum/2013/004.pdf>
- Fajardo, A.F, et al. (2014). Modelado e implementación de un manejador eléctrico para un motor de inducción trifásico. *Revista Tecnura*, 18(39), 94-109.
- Hernández, L.F.; Gomez, D.R. & Hernández, O.M. (2012). Rectificador monofásico con corrección del factor de potencia usando un convertidor Boost. *Revista Tecnura*, 16(33), 23-34.
- Martínez, F.H. (2004). Estudio de eficiencia en los MOSFET e IGBT para su utilización en convertidores de potencia conmutados. *Revista Tecnura*, 15, 85-96.

- Ortiz-Conde, A., *et al.* (2002). A Review of Recent MOSFET Threshold Voltage Extraction Methods. *Microelectronics Reliability*, 42(4), 583-596.
- Rudenko, T. *et al.* (2011). On the MOSFET Threshold Voltage Extraction by Transconductance and Transconductance-to-Current Ratio Change Methods: Part I effect of Gate-Voltage-Dependent Mobility. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 58(12), 4172-4179.
- Schneider, M.C. & Galup-Montoro, C. (2010). *CMOS Analog Design using all-Region MOSFET Modeling*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Schneider, M.C.; Galup-Montoro, C.; Machado, M.B. & Cunha, A.I.A. (2006). Interrelations between Threshold Voltage Definitions and Extraction Methods. *Technical Proceedings of the 2006 NSTI Nanotechnology Conference and Trade Show Volume 3*, 868-871. <http://www.nsti.org/procs/Nanotech2006v3/7/W56.11>
- Siebel, O.F.; Schneider, M.C. & Galup-Montoro, C. (2012). MOSFET Threshold Voltage: Definition, Extraction, and some Applications. *Microelectronics Journal*, 43(5), 329-336.
- Tsividis, Y. & McAndrew, C. (1999). *Operation and Modeling of the MOS Transistor*. New York: Oxford University Press.





Further compression of focal plane array in compressive spectral imaging architectures

Compresión adicional de los datos del plano focal en arquitecturas de sensado comprimido en imágenes espectrales

Jeison Marín Alfonso¹, Leonardo Betancur Agudelo², Henry Arguello Fuentes³

Fecha de recepción: 23 de agosto de 2016

Fecha de aceptación: 15 de febrero de 2017

Cómo citar: Marín A., J.; Betancur A., L. y Arguello F., H. (2017). Further compression of focal plane array in compressive spectral imaging architectures. *Revista Tecnura*, 21(52), 45-52. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.2.a03

Abstract

Context: It is possible to capture High-resolution 3D hyper-spectral images in a single 2D image through techniques based on compressed sensing. A variety of architectures have proposed Compressive Spectral Imaging (CSI) technique during the last years. An optical camera designed to capture spatio-spectral information of the scene prints projections towards a Focal Plane Array (FPA) giving the capability of storing or transmitting them. Afterwards, the original image can be reconstructed via an l_1 -norm-based optimization algorithm. The size in bytes of the FPA measurement is less than the original image; for that reason, this FPA is considered a 2D compressed version of the original 3D image.

Objective: To perform a further compression of the FPA measurement for four CSI architectures, in order to increase transfer rates or to decrease storing sizes.

Method: In this work, the design of the further compression using arithmetic coding is presented for four CSI architectures, and an inverse transformation

is proposed. This transformation is applied to the FPA based on the structure of the optical filters and the coded apertures of the cameras used in the CSI, allowing an increasing in the compression rate.

Results: Results show that the compression rate rises between 1 and 2 points in three of the architectures.

Conclusions: Despite data loss in the process of transformation-quantification-compression-decompression of the FPA, the quality of the reconstructed data cube (expressed in terms of the PSNR between the reconstructed image and the original one) remains close to the original version with no further compression.

Keywords: Compression Techniques, Compressive Sensing, Compressive Spectral Imaging, Focal Plane Array, Hyperspectral Images.

Resumen

Contexto: Las imágenes híper-espectrales 3D de alta resolución pueden ser capturadas en una imagen 2D mediante técnicas basadas en "sensado compresivo" (compressive sensing, en inglés). Entre estas técnicas,

1 Electronic Engineer, master in Electronic, student at doctorate in Telecommunications at Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín, Colombia. Contact: jeison.marin@upb.edu.co

2 Electronic Engineer, master in Telecommunications Engineering, doctor in Telecommunications Engineering. Associated Professor at Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín, Colombia, Contact: leonardo.betancur@upb.edu.co

3 Electrical Engineer, master in Electrical power, doctor in Electrical and Computer Engineering. Titular professor at Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia, Contact: henarfu@uis.edu.co

hay una denominada *Compressive Spectral Imaging* (CSI), de la cual se han propuesto diversas arquitecturas en los últimos ocho años. Una cámara óptica especialmente diseñada captura la información espacio-espectral de la escena e imprime proyecciones en un plano focal 2D (*Focal Plane Array*, FPA). Estas muestras se pueden transmitir o almacenar; luego la imagen original puede ser reconstruida usando comúnmente un algoritmo de optimización de la norma l_1 . El tamaño en bytes del FPA es menor que la imagen original, y éste por lo tanto puede ser considerado una versión comprimida en 2D de la imagen original en 3D.

Objetivo: Realizar una compresión adicional del FPA para cuatro arquitecturas CSI, para incrementar las velocidades de transmisión o disminuir tamaños de almacenamiento.

Método: En este trabajo se presentan los resultados de esta compresión adicional usando la codificación

aritmética y se propone una transformación inversa que se aplica al FPA con base en la estructura de los filtros ópticos y los códigos de apertura de las cámaras usadas en CSI, lo cual permite aumentar su factor de compresión.

Resultados: Los resultados muestran que el factor de compresión aumenta entre 1 y 2 puntos en tres de las arquitecturas.

Conclusiones: A pesar de que hay pérdidas de datos en el proceso de transformación-cuantificación-compresión-descompresión del FPA, para cada arquitectura CSI usada, la calidad del cubo de datos posteriormente reconstruido expresada en el PSNR entre la imagen original y la reconstruida, no difiere significativamente de la versión original.

Palabras clave: algoritmos de compresión, imagen hiper-espectral, plano focal, sensado compresivo.

INTRODUCTION

Compressive Spectral Imaging (CSI) is a technique that represents the spectral and spatial information of a multispectral image through a 2D set of code projections where the image is modeled by a 3D cube $F \in \mathbb{R}^{M \times N \times L}$ where $M \times N$ corresponds to the spatial dimensions and L is the number of spectral bands.

In the past few years, several CSI architectures have been proposed such as the spatio-spectral encoded compressive HS imager (SSCSI) (Lin, Liu, Wu, & Dai, 2014); the coded aperture snapshot spectral imagers (CASSI) (Arce, Brady, Carin, Arguello, & Kittle, 2014); the CASSI with colored coded apertures (Arguello & Arce, 2014); and the snapshot colored compressive spectral imagers (SCCSI) (Correa, Arguello, & Arce, 2015). CSI architectures are used in different fields as computer tomography (Espitia, Mejía, & Arguello, 2016), or agricultural crops (Camacho, Velasco, Vargas, & Arguello, 2016), among others applications in science and industry. In most CSI architectures this 2D set is a

representation of a 3D cube in one Focal Plane Array (FPA) with fewer measurements than the original data cube. From this 2D set is possible to recover the spectral image through the compressed sensing techniques (Figueiredo, Nowak, & Wright, 2007). If the imaging platform is far from the central station, it is usually better to transmit the FPA data to the station and then recover the data cube, so that the receiver handles the computational load.

In CSI, the FPA measurements can be seen as a compressed version of the spectral data cube; however, a further compression to the compressed measurements can be useful and desirable for taking full advantage of the communication channel, reducing both transmission time and cost. This further compression can be performed with different coding schemes, such as Huffman and Arithmetic coding (Rissanen & Langdon, 1979).

According to compressive sensing theory, a low correlation in the FPA is desirable to guarantee low coherence between the sensing basis and the representation basis (Candes & Wakin, 2008). Additionally, it states that it is much better to have a

high correlation among data (high redundancy) because it would mean that the entropy is lower and, according to the Shannon theorem, a higher compression rate can be achieved. In CSI, the FPA measurements have lower correlation than the original data cube (Li, Xiong, Arguello, & Arce, 2014), due to the effects of the dispersive element depending on the CSI architecture. In the cases of CASSI (Arce, Brady, Carin, Arguello, & Kittle, 2014), CASSI with colored coded aperture (Arguello & Arce, 2014), and SCCSI (Correa, Arguello, & Arce, 2015) this dispersive element is usually a prism.

Also, depending on the CSI architecture, lower correlation occurs for many reasons. First, due to the effects of the block-unblock lithographic masks or spatial light modulators in the CASSI and the CASSI with colored coded aperture cases (Arce, Brady, Carin, Arguello, & Kittle, 2014) (Arguello & Arce, 2014). Second, due to the diffraction grating in conjunction with a static coding mask in the SSCSI case (Lin, Liu, Wu, & Dai, 2014). Third, the SCCSI case is produced by the color filter array (Correa, Arguello, & Arce, 2015). In all these cases, the effects of the different elements can be modeled by arrays, and the FPA measurements can be accurately represented as a linear combination of the vectors of these arrays and the data cube voxels.

This paper presents a methodology to achieve a higher compression ratio for the FPA compressive measurements. This is possible through a transformation using the structure of the different arrays that modeled the coded aperture or the color filters in the CSI architectures and considering the dispersive process occurred. In this methodology (depending on the CSI architecture) a transformation matrix is generated to modify the FPA compressive measurements. The modified FPA compressive measurements possesses a higher compression rate than the original FPA, but in some cases it is better to perform a loss-tendency compression to reduce computational complexity due to the nature of the data. However, the system performance in the CSI architectures is not significantly affected by this, as simulations show.

This process is proved in the following CSI architectures: CASSI, CASSI with colored coded aperture (SSCSI), and SCCSI. For each one, a transformation matrix is generated.

METHODOLOGY

Compressive FPA measurements in CSI architectures

The essential information of spectral images can be captured using Compressive Spectral Imaging (CSI) techniques. This makes it possible to use a sensing strategy that allows representing the image by a small number of compressed measurements. This capability is obtained thanks to two characteristics of signals under a basis of representation: sparsity and incoherence (Candes & Wakin, 2008). The data capturing is possible because of the development of systems that allow to sense with a few measurements and condense the information contained in a data cube, that corresponds to one focal plane array measurement (FPA) of the scene (Arce, Brady, Carin, Arguello, & Kittle, 2014).

One of the first CSI architectures is the coded aperture snapshot spectral imagers (Arce, Brady, Carin, Arguello, & Kittle, 2014). In this architecture, a block-unblock lithographic mask named coded aperture encodes the spectral image; then, a dispersive element acts on the image, and finally it is projected to the FPA. This projection can be modeled as shown in equation (1).

$$\mathbf{Y}_{jl} = \sum_{k=0}^{L-1} \mathbf{F}_{j(l+k)(k)} \mathbf{T}_{j(l+k)} + \mathbf{w}_{jl} \quad (1)$$

Where \mathbf{F} is the data cube with L spectral bands and $\mathbf{N} \times \mathbf{N}$ pixels of spatial information; \mathbf{Y}_{jl} is the intensity measurement of the detector at the \mathbf{j}, \mathbf{l} position. The detector dimension is $N \times (N + L - 1)$; \mathbf{T}_{jl} is the binary coded aperture, and \mathbf{w}_{jl} is the noise of the system (Arce, Brady, Carin, Arguello, & Kittle, 2014).

Note that each point of FPA intensity is the result of a linear combination of data cube spectral

voxels in all spectrum bands and points of the coded aperture, so the structure of this code determined the distribution of intensities in the FPA. In other CSI architectures, a similar pattern is observed for the FPA construction. Arguello and Arce in (Arguello & Arce, 2014) replaced the traditional block-unblock coded apertures by multi-patterned arrays of selectable optical filters or colored arrays. In that work, the discretized coded aperture \mathbf{T} is a three-dimensional structure, and the i^{th} discretized FPA measurement can be expressed as equation (2).

$$\mathbf{Y}_{jl}^i = \sum_{k=0}^{L-1} \mathbf{F}_{j(l-k)(k)} \mathbf{T}_{j(l-k)(k)}^i + w_{jl}. \quad (2)$$

In the case of the SCCSI architecture, the FPA in its discreet form can be modeled as shown in equation (3).

$$\mathbf{Y}_{jl} = \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{u=0}^2 \mathbf{V}_{j,l,k,u} \mathbf{F}_{j,(l-k-u),k} \mathbf{C}_{j,l,k}, \quad (3)$$

Where $\mathbf{C}_{j,l,k}$ corresponds to a colored filter array, $\mathbf{V}_{j,l}$ corresponds to the weights that index the corresponding proportion of energy from each region and (j,l) are the indexes of the spatial coordinates. In this architecture, unlike in CASSI, the dispersive element is located at the entrance of the optical camera and the signal is filtered before forming the FPA (Correa, Arguello, & Arce, 2015).

Finally, in the SSCSI architecture, a light dispersive element is located after the lens. This diffraction grating is followed by yet another lens, and then by a mask that modulates the target image in both spatial and spectral dimensions (center) before projecting it into a sensor image. The coded projection operator is expressed as a sparse modulation matrix ϕ . The FPA, as referred to in that work as spatial-spectral encoded HS projection, is modeled as equation (4).

$$\mathbf{Y} = \sum_{k=1}^p \Phi_k \mathbf{h}_k \quad (4)$$

Where \mathbf{Y} is the vectorized sensor image; \mathbf{h} is the vectorized target hyperspectral image; and ϕ is the modulation matrix (Lin, Liu, Wu, & Dai, 2014).

Matrix transformation for further compression

FPA projections can be additionally compressed using transformation techniques. The more similar the statistical distribution and the correlation between the FPA data with the hyperspectral data cube, the higher the compression ratio (Li, Xiong, Arguello, & Arce, 2014). In all the presented CSI architectures, sampling aperture that filters the input image has a known structure.

It can be noted in equations (1) to (4) that the lineal combinations between elements of the hyperspectral data cube and the used aperture (or filter) compose the array \mathbf{Y} . For this reason, the matrix \mathbf{Y} can be filtered again by an inverse process that eliminates (in average) the effect of the aperture.

This aperture is represented by matrices \mathbf{T} of equations (1) and (2), \mathbf{C} of equation (3) and ϕ of equation (4). If the values of these apertures are taken as weights that multiply the data cube voxels, each pixel of \mathbf{Y} can be divided by those weights, conforming a mean filter. A transformed version of matrix \mathbf{Y} can generally be obtained for each architecture, dividing it by another matrix of the same size formed only by the sum of the weights of each pixel, as shown in equations (5) to (8) for CASSI, CASSI with colored coded apertures, SCCSI and SSCSI, respectively.

$$\Gamma_{jl}^{\text{CASSI}} = \frac{\sum_{k=0}^{L-1} \mathbf{F}_{j(l+k)(k)} \mathbf{T}_{j(l+k)} + w_{jl}}{\sum_{k=0}^{L-1} \mathbf{T}_{j(l+k)}} \quad (5)$$

$$\Gamma_{jl}^{\text{COLORED}} = \frac{\sum_{k=0}^{L-1} \mathbf{F}_{j(l-k)(k)} \mathbf{T}_{j(l-k)(k)}^i + w_{jl}}{\sum_{k=0}^{L-1} \mathbf{T}_{j(l-k)(k)}^i} \quad (6)$$

$$\Gamma_{jl}^{\text{SCCSI}} = \frac{\sum_{k=0}^{L-1} \sum_{u=0}^2 \mathbf{V}_{j,l,k,u} \mathbf{F}_{j,(l-k-u),k} \mathbf{C}_{j,l,k}}{\sum_{k=0}^{L-1} \sum_{u=0}^2 \mathbf{V}_{j,l,k,u} \mathbf{C}_{j,l,k}} \quad (7)$$

$$\Gamma_{\text{SSCSI}} = \frac{\sum_{k=1}^p \Phi_k \mathbf{h}_k}{\sum_{k=1}^p \Phi_k} \quad (8)$$

Compression process

Figure 1 shows the CSI process with further compression in the FPA. Conventional CSI process is described by following the path 1-2. However, further compression is included using quantification and coding of matrix \mathbf{Y} , following the path 1-3-4-2. This case includes the further compression by performing a traditional arithmetic-coding algorithm, with quantification applied to the cases where the elements of \mathbf{Y} are decimals. For modifying the data the least possible during the quantification process, each value of \mathbf{Y} was rounded to the closest integer possible, so the quantification was not uniformly performed. The FPA measurements are compressed and later uncompressed for reconstructing purposes. In the compression process, the compression ratio (CR) is defined as the ratio between the size of the uncompressed data and the size of the compressed data.

Path 1-5-6-7-8-2 indicates the CSI process with FPA transformation before further compressing. In

order to compress the transformed version of the matrix \mathbf{Y} shown in equations (5) to (8), it has to be taken into account that due to the Hadamard division of the original matrices their elements are decimal numbers. Hence, for the arithmetic coding compression process a stage of quantification is mandatory, and we have a loss-tendency compression. The paths 7 and 8 indicate a decompression process and an inverse transform, respectively, in order to recover the original matrix \mathbf{Y} .

RESULTS

Compression ratio results

Each of the mentioned architectures were tested with a data cube of $256 \times 256 \times 8$ voxels. This data cube corresponds to a hyperspectral image with 8 spectral bands. The SCI algorithms have random coded apertures of filters depending on the architecture. However, in order to compare results between the process with and without further compression,

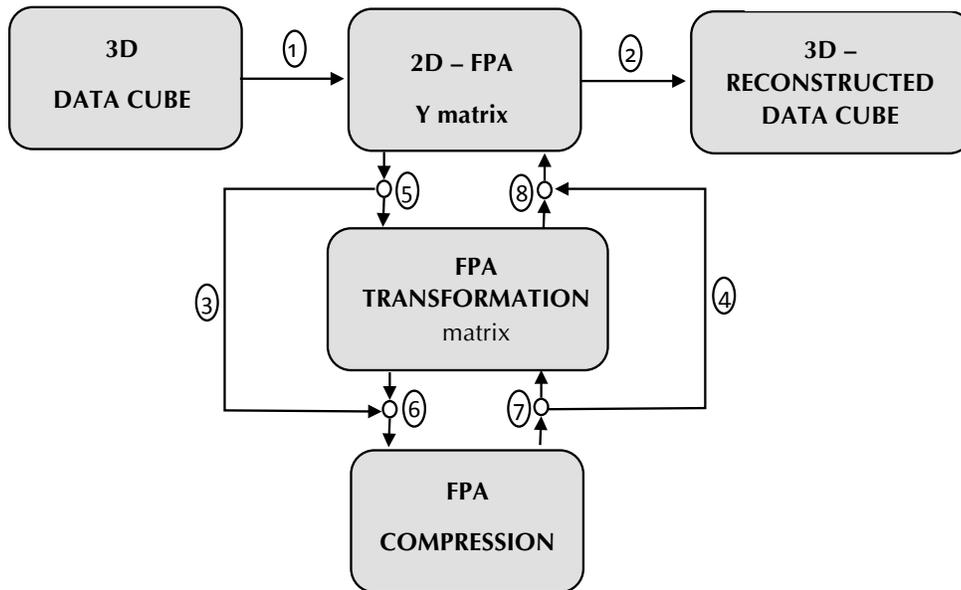


Figure 1. CSI Process without further compression (path 1-2). CSI with further compression without matrix transformation (path 1-3-4-2). CSI with further compression and matrix transformation (path 1-5-6-7-8-2).

Source: own work

a fixed coded aperture was used in all the simulations. For the calculations, the size of the matrix \mathbf{Y} was obtained by taking into account that each FPA pixel was represented with 64 bits in MATLAB.

Table 1 shows the sizes of FPA measurements with and without compression. Note that the original FPA size is 526 KB, except in SSCSI case where the size is 512 KB. First, FPA data is compressed without matrix transformation. The results of FPA compressed size and its CR (Compression Ratio) are shown in columns two to three. After that, the compression was made with the FPA matrix transformation. Results are shown in columns four and five. Note that the CR increases, thereby decreasing the size of the data for each of the CSI architectures.

The matrix was quantified in the compression process, yielding to it being conformed only by integer numbers that can be represented with at least 10 bits.

Data cube reconstruction results

To determine the effect of data loss during the processes of compression and decompression, the inverse problem of reconstructing the data cube from the compressed data was solved for each architecture using the compressed sensing reconstruction techniques. Figure 2 shows the average PSNR in dB between the original data cube and the reconstructed data cube.

The first column shows the results without further compression of the FPA. The second column

shows the results under the described quantification and encoding processes. The third column shows the results of applying the transformation to the FPA before compressing. It is to note how the variations in the PSNR are minimal for each case and the differences between the reconstructed images using and not using further compression are imperceptible to the naked eye.

The PSNR shown in figure 2 is calculated with the minimum loss possible in the quantification process. It is of interest to know how the PSNR is affected when the quantification levels decrease. This translates into an increasing of the losses during the compression and decompression processes. It has to be taken into account that increasing the losses allows a higher compression ratio of the data and yields to a faster transmission of it or lesser storage space needed for it.

Figure 3 shows the behavior of the PSNR as the compression ratio rises. An algorithm was developed to decrease the number of values in the FPA during the quantification in order to increase the compression ratio. The algorithm has the maximal number of allowed different integer elements as input, and chooses n values among the existing ones to round all data values to the closest integer. This algorithm allows to minimize the number of modified data despite the decrease of the non-uniform quantification levels during the process. The results were obtained using the transform of the FPA as described above.

Table 1. Size in KB and compression ratio of the FPA in CSI architectures.

Architecture	Original FPA (KB)	Compressed FPA (KB)	Compression Ratio Compressed FPA	Compressed with FPA transformation (KB)	Compression Ratio Compressed with FPA Transformation
CASSI	526	145.52	3.6145	110.11	4.7772
COLORED	526	146.69	3.5859	110.82	4.7465
SCCSI	526	143.73	3.6596	110	4.7819
SCSSI	512	248.53	2.0601	215.64	2.3743

Source: own work

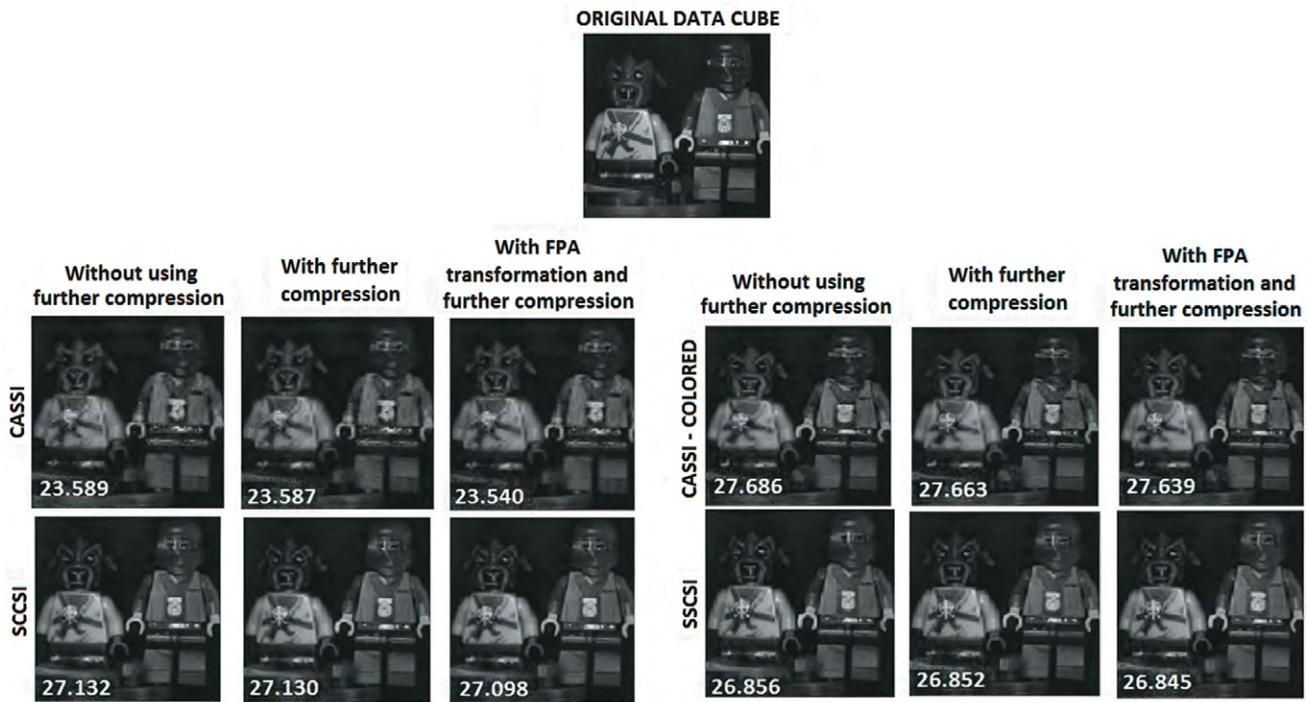


Figure 2. PSNR in dB of the data cube original and reconstructed in SCI Architectures, without and with further compression.

Source: own work

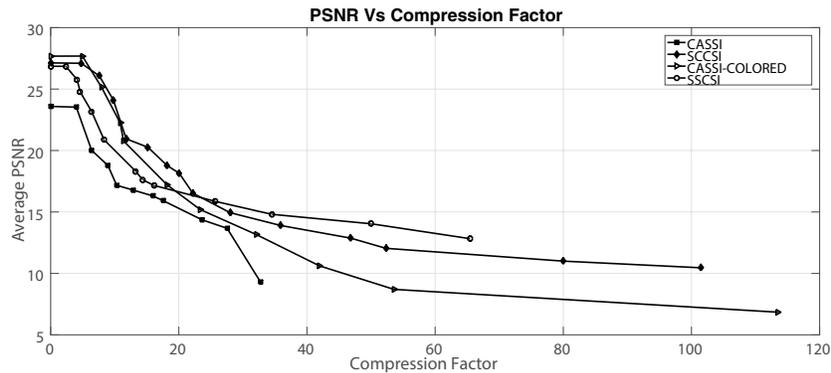


Figure 3. PSNR Vs Compression Ratio in CSI Architectures.

Source: own work

CONCLUSIONS

In this paper we presented an alternative to increase the compression ratio of the FPA in CSI architectures when further compression is desirable. Given that the coded apertures in optical cameras

of these architectures are known, an inverse transformation matrix can be formed based on its structure and makes the FPA further compressed. The compression ratio increased in more than one point in some cases when the transformation was applied. Although in most cases the compression

was loss-tended, this does not significantly affects the performance of the system, given that the PSNR between the original image and the reconstructed image is kept steady even when further compression is included in the processing.

REFERENCES

- Arce, G.; Brady, D.; Carin, L.; Arguello, H. & Kittle, D. (Jan 2014). Compressive Coded Aperture Spectral Imaging: An Introduction. *Signal Processing Magazine, IEEE*, 31(1), 105-115.
- Arguello, H. & Arce, G. (April 2014). Colored Coded Aperture Design by Concentration of Measure in Compressive Spectral Imaging. *Transactions on Image Processing, IEEE*, 23(4), 1896-1908.
- Camacho, A.; Velasco, A.; Vargas, C. & Arguello, H. (2016) A comparative study of target detection algorithms in hyperspectral imagery applied to agricultural crops in Colombia. *Revista Tecnura*, 20(49), 86-99.
- Candes, E. y Wakin, M. (March 2008). An Introduction To Compressive Sampling. *Signal Processing Magazine, IEEE*, 25(2), 21-30.
- Correa, C.V.; Arguello, H. & Arce, G.R. (Oct 2015). Snapshot colored compressive spectral imager. *J. Opt. Soc. Am. A*, 32(10), 1754-1763. <http://josaa.osa.org/abstract.cfm?URI=josaa-32-10-1754>
- Espitia, M.; Óscar, J.; Mejía, M.; Yuri, H. & Arguello, H. (2016). Tomografía computarizada: proceso de adquisición, tecnología y estado actual. *Revista Tecnura*, 20(47), 119-135.
- Figueiredo, M.; Nowak, R. & Wright, S. (Dec 2007). Gradient Projection for Sparse Reconstruction: Application to Compressed Sensing and Other Inverse Problems. *Journal of Selected Topics in Signal Processing, IEEE*, 1(4), 586-597.
- Li, P.; Xiong, H.; Arguello, H. & Arce, G. (March 2014). Embedded Transform Coding Based Lossless Compression in Compressive Spectral Imaging with Coded Aperture. *Data Compression Conference (DCC), 2014*, (pp. 414-414).
- Lin, X.; Liu, Y.; Wu, J. & Dai, Q. (#nov# de 2014). Spatial-spectral Encoded Compressive Hyperspectral Imaging. *ACM Trans. Graph.*, 33(6), 233:1—233:11. <http://doi.acm.org/10.1145/2661229.2661262>
- Rissanen, J. & Langdon, G.J. (March 1979). Arithmetic Coding. *IBM Journal of Research and Development*, 23(2), 149-162.





A quantitative and qualitative performance analysis of compressive spectral imagers

Una comparación cuantitativa y cualitativa de análisis de rendimiento de las cámaras espectrales compresiva

Ferley Medina Rojas¹, Henry Arguello Fuentes², Cristina Gómez Santamaría³

Fecha de recepción: 22 de septiembre de 2016

Fecha de aceptación: 15 de febrero de 2017

Cómo citar: Ferley Medina Rojas; Henry Arguello Fuentes y Cristina Gómez Santamaría. (2017). A quantitative and qualitative performance analysis of compressive spectral imagers. *Revista Tecnura*, 21(52), 53-67. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.2.a04

Abstract

Context: Spectral images (SI) contain spatial-spectral information about a scene arranged in a data cube, which often comprises a significant amount of data. However, traditional (SI) systems acquire data ignoring the high correlation between the measurements and the samples are redundant. Compressive spectral imaging systems compress spectral data in the acquisition step, so it allows reducing redundancy and the data amount. Recently, several spectral imaging systems have become available, providing new functionality for users and opening up the field to a wide array of new applications. For instance, the CASSI, SCSi, SSCS, and HYCA systems are four of the most outstanding systems.

Methods: Some review works have provided comprehensive surveys of the available technologies and have shown how the new capabilities of spectral imaging approaches can be utilized. However, selecting a specific architecture requires a quantitative

and qualitative comparison of these systems in the same scenarios.

Results: This paper analyzes the qualitative and quantitative performance of these four compressive spectral imaging systems to evaluate them in the same scenarios. For that, the architectures are modeled as a system of linear equations; then, image reconstructions are accomplished through the same optimization approach, transmittance, coded aperture, and shot numbers.

Conclusion: Results show that the performance of the SSCSI system attains better quality reconstruction in terms of PSNR.

Keywords: sampling matrix, compressive sampling architectures, spectral image.

Resumen

Contexto: Las imágenes espectrales (SI) contienen información espacio-espectral acerca de una escena disponible en un cubo de datos que usualmente

- 1 Systems engineer, agricultural engineer, specialist in regional development management, specialist in telecommunication networks, master in telematics, candidate for doctor in engineering. Professor of the Universidad Cooperativa de Colombia. Neiva, Colombia. Contact: ferley.medina@campusucc.edu.co
- 2 Electronic engineer, master in engineering, doctor in engineering. Professor of the Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. Contact: henarfu@uis.edu.co
- 3 Electronic engineer, master in engineering, doctor in engineering. Professor of the Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín, Colombia. Contact: cristina.gomez@upb.edu.co

comprende una cantidad significativa de éstos. Los sistemas tradicionales de (SI) adquieren datos redundantes ignorando la alta correlación entre las mediciones y las muestras redundantes. Los sistemas de compresión de imágenes espectrales comprimen los datos espectrales en la etapa de adquisición, lo que permite reducir la cantidad de datos y la redundancia. Actualmente, existen varios sistemas de imágenes espectrales disponibles que proporcionan nuevas funciones para los usuarios y abren un amplio campo de nuevas aplicaciones. Por ejemplo, los sistemas de CASSI, SCSi, SSCS, y HYCA son cuatro de los más destacados.

Método: La revisión de algunos trabajos provee amplios estudios de tecnologías disponibles y muestra cómo se pueden utilizar las nuevas capacidades de los enfoques de formación de imágenes espectrales.

Sin embargo, para la selección de una arquitectura específica se requiere una comparación cuantitativa y cualitativa de estos sistemas en los mismos escenarios.

Resultados: En este trabajo se analiza el rendimiento cualitativo y cuantitativo de estos cuatro sistemas de compresión de imágenes espectrales para evaluarlos en los mismos escenarios. Para ello, cada arquitectura se modela como un sistema de ecuaciones lineales y el proceso de reconstrucción de las imágenes se logra con el mismo enfoque de optimización transmitancia, código de apertura y número de proyecciones.

Conclusión: Se muestra que el sistema SSCSI alcanza el mejor rendimiento en la reconstrucción con el valor más alto PSNR.

Palabras clave: matriz de muestreo, arquitecturas de muestreo compresivo, imágenes espectrales.

INTRODUCTION

Remote-sensed spectral images (SI) contain high-resolution spectral information about materials or vegetation present over the earth (Griffin, May-Hsu, Burke, Orloff, & Upham, 2005), which corresponds to the surface radiance and reflectance. SI images are used in areas such as environment (Mishne, Talmon, & Cohen, 2015), mining (Soydan, Koz, Azebne Düzgün, & Aydın Alatan, 2015), geology (Camacho-Velasco, Vargas-García, Rojas-Morales, Castillo-Castelblanco, & Arguello-Fuentes, 2015), and soil characterization (Ozturk, Esin, & Artan, 2015), (Backhaus, Bollenbeck, & Seiffert, 2011). Specifically, in the agricultural area for monitoring, tracking and controlling the growth of the crop, and identifying weeds, pests, diseases, and nutrient deficiencies (Arafat, Aboelghar, & Ahmed, 2013; Lelong et al., 2010), (Velasco, García, & Fuentes, 2016). Each pixel in an SI can be expressed as a vector $\mathbf{v} = [v_1, v_2, \dots, v_L]$ which contains one or more mixed spectra from different materials of a scene (Golbabaee, Arberet, & Vanderghaynst, 2013). Therefore, it is possible to

measure the similarity between two spectra or detect a target by exploring the data contained in the L-dimensional space by applying detection and classification algorithms (Zare, Bolton, Chanussot, & Gader, 2014).

Spectral remote sensing is a task that contains a large volume of data, regularly redundant. This volume of information demands memory, transmission bandwidth, and information recovery. Recently, compressive sampling (CS) theory has been developed to make efficient signal sampling and reduce redundancy by taking advantage of the correlation between measurements (Baraniuk, 2007).

CS establishes that the Nyquist criteria can be overcome (Morteza, 2015; Nyquist, 1928) by compressing and sampling simultaneously (Hayashi, Nagahara, & Tanaka, 2013). This theory is based on the principles of sparseness and incoherence (Arce, Brady, Carin, Arguello, & Kittle, 2014), (Espitia, Mejía, & Arguello, 2016). In this way, calculating a set of sparse coefficients in some basis (e.g. Wavelet), corresponding to a vector $\{\mathbf{f} = \mathbf{f} \in \mathbb{R}^{N \cdot N \cdot L} \mid [f_1, \dots, f_{N \cdot N}, \dots, f_{N \cdot N \cdot L}]^T\}$, that represents the spectral image where M and N

represent the spatial dimension and L the spectral dimension), allows to recover the signal without distortion (Baraniuk, 2007). The vector \mathbf{f} can also be expressed by $\mathbf{f}=\Psi \mathbf{s}$ where $\mathbf{s} \in \mathbb{R}^{N \cdot N \cdot L}$ contains only $S \ll N \cdot N \cdot L$ non-zero elements and $\Psi \in \mathbb{R}^{N \cdot N \cdot L \times N \cdot N \cdot L}$ is a sparseness operator. The measurements vector $\mathbf{g} \in \mathbb{R}^q$ is obtained as $\mathbf{g}=\mathbf{H}\mathbf{f}$, where $\mathbf{H} \in \mathbb{R}^{q \times N \cdot N \cdot L}$ is a sensing matrix. By choosing q projections of \mathbf{H} and assuming sparseness of \mathbf{f} in the Ψ domain, the signal \mathbf{f} can be recovered from model $\mathbf{g}=\mathbf{H}\Psi^T \mathbf{s}$ (Donoho, 2006).

In recent years, CS was adopted as an SI sampling protocol. The following architectures were selected because they are widely used in CS studies such as Coded Aperture Snapshot Spectral Imaging system (CASSI) (Arguello & Arce, 2010). In this case, the main elements are coded aperture, a dispersive element, and the sensor responsible for capturing the energy of the encoded scene, the coded apertures are matricial arrays composed by translucent optical elements that block or unblock the path of light through the system. Another well-know system is the Spatial Spectral encoded Compressive hyper-Spectral Imaging system (SSCSI) (Lin, Liu, Wu, & Dai, 2014). In this system the spatial-spectral sampling encoded scheme modulates the RGB bands achieving a spatially changing spectral coding that provides a higher degree of randomness in the measured projections, and a coding mask that encodes each spectral channel independently. On the other hand, a recent architecture is the Snapshot Colored Compressive Spectral Imager system (SCCSI) (Correa, Arguello, & Arce, 2014). In this architecture, an array of optical filters encodes the input source, and then a dispersive element disperses it; both processes are integrated along the spectral range sensitivity of the detector. The last architecture presented in this paper is the Hyper-spectral Coded Aperture system (HYCA) (Martin, Bioucas-Dias, & Plaza, 2015), which is a theoretical architecture based

on compression blocks of pixels in the spectral bands according to the compression window size, which allows simultaneous sampling and compression of SI.

This paper analyzes qualitative and quantitative performance of these four compressive spectral imaging systems in the same conditions. For that, the architecture are modeled as a system of linear equations, and then image reconstructions are accomplished with the same optimization approach. This paper is organized as follows: section II shows the formulation of the sampling model for each system, section III presents the description of the reconstruction algorithm; simulation results are presented in section IV. Finally, conclusions are described in section V.

COMPRESSIVE SAMPLING ARCHITECTURES

Compressive sampling architectures can be modeled by the system as $\mathbf{g} = \mathbf{h}\mathbf{f}$, where \mathbf{H} is the sampling matrix that characterizes the system. The parameters of the sampling matrices depend on the specific architecture (CASSI, SSSCI, SCCSI, or HYCA). In this section, the formulation of the sampling model of each system is shown by characterizing sampling matrices, correlation between the spectral and spatial dimensions of the data cube components, coded aperture pattern, and dispersive elements.

Coded aperture snapshots spectral imaging, CASSI

Figure 1 shows the Compressive Spectral Imaging Acquisition system (CASSI) based on coded apertures, represented by $T(x,y)$, which modulates a spatial-spectral scene $f_0(x,y,\lambda)$. The resulting coded field $f_1(x,y,\lambda)$ is dispersed by a dispersive element, resulting in equation (1).

$$f_2(x,y,\lambda) = \iint T(x',y')f_0(x',y',\lambda) \times h(x-x'-s_1\lambda,y-y')dx'dy' \quad (1)$$

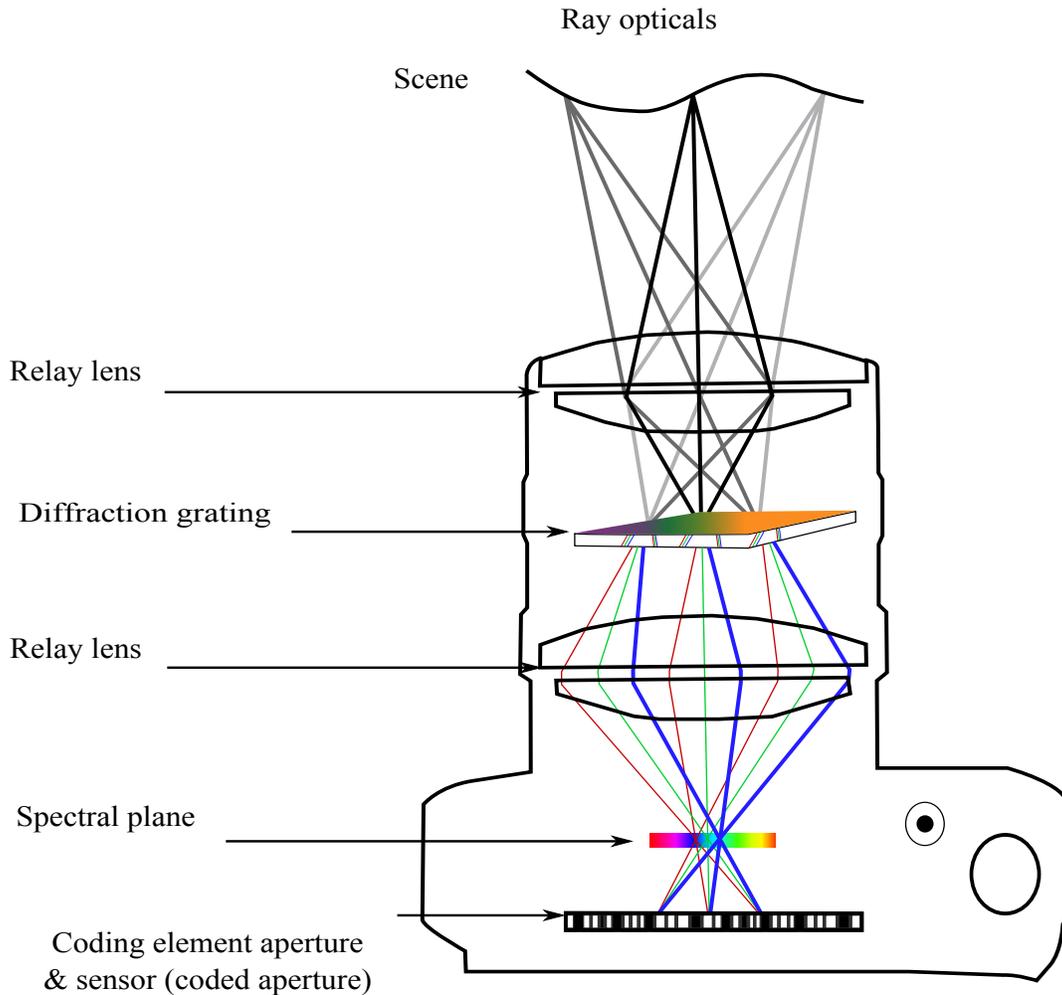


Figure 1. Optics CASSI architecture show scene capture until coding element aperture to create a block or unblock each coded spectral channel.

Source: own work

Where $T(x';y')$ represents the transfer function of the coded aperture, $h(x - x' - s_1\lambda, y - y')$ is the impulse response of the optical system, and $s_1\lambda$ is the dispersion induced by the dispersive element, assumed as linear dispersion. Compressed measurements are acquired when the field $f_2(x, y, \lambda)$ is integrated into the detector (Arguello & Arce, 2010).

Equation (1) can be expressed as a system of linear equation $\mathbf{g} = \mathbf{H}_{\text{CASSI}} \mathbf{f}$ where $\mathbf{H}_{\text{CASSI}}$ represents the CASSI sensing matrix. The matrix $\mathbf{H}_{\text{CASSI}}$

accounts for the effects of the coded aperture and the dispersive element. Figure 2 shows the CASSI sampling matrix $\mathbf{H}_{\text{CASSI}} \in \mathbb{R}^{(N(N+L-1))q \times N^2L}$, where q is the number of coded projections (shots) for $N = 5$, $L = 3$ and $q = 3$. The number of measurements is $p = N(N + L - 1)q$. The diagonal patterns that show in the horizontal direction are the coded aperture pattern, each time with an N unit downward shift, as many times as the quantity of spectral bands.

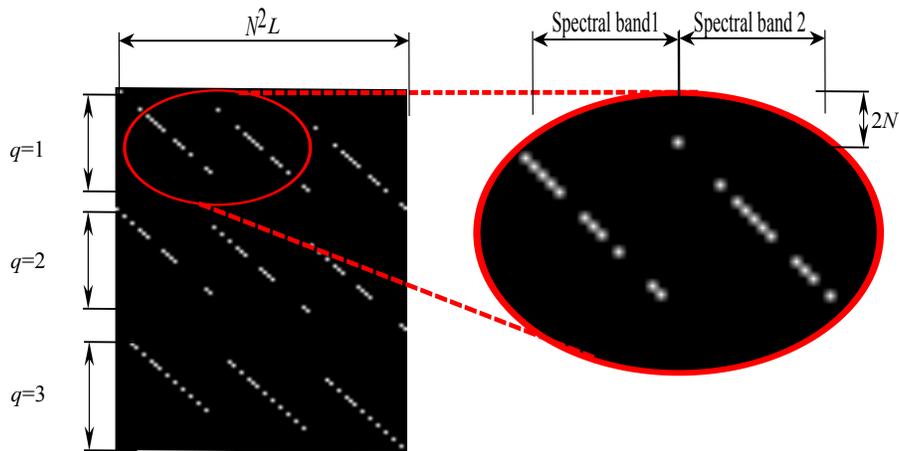


Figure 2. Sampling matrix H_{CASSI} , $N = 5$, $L = 3$ and $q = 3$ and coded aperture pattern with downward shift for each number of spectral bands

Source: own work

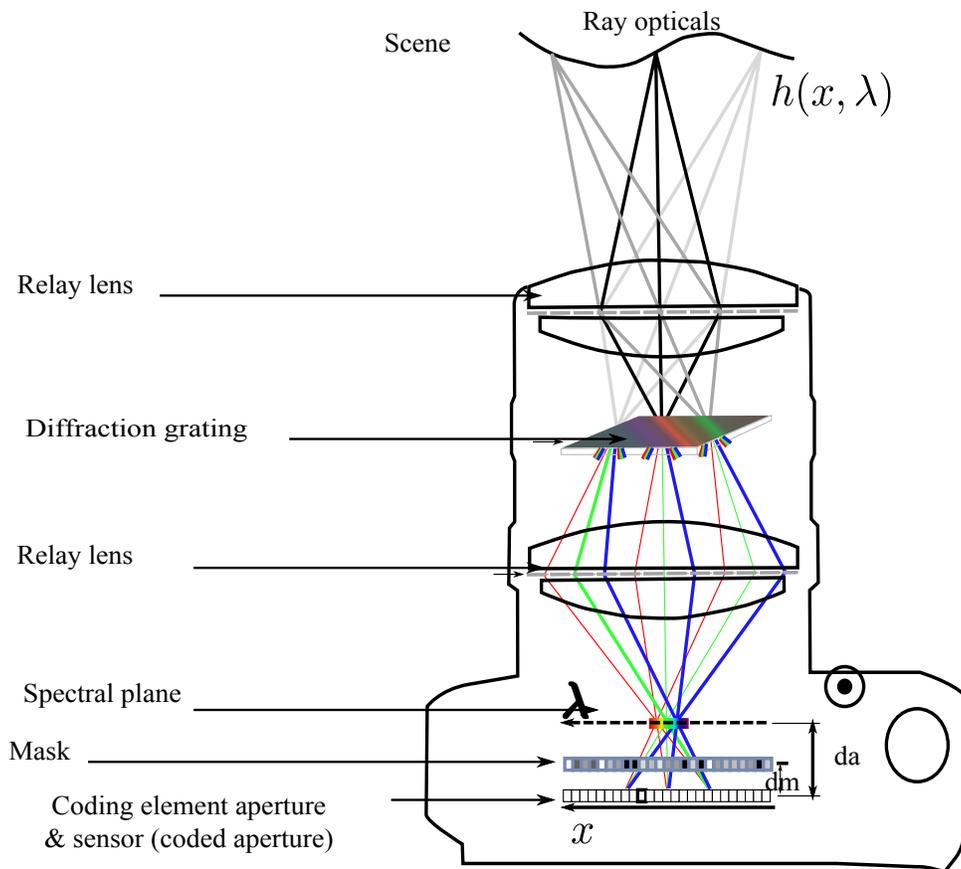


Figure 3. Optics SSCSI architecture show scene capture until coding element aperture to create each coded spectral channel.

Source: own work.

Spatial-spectral encoded compressive HS imager, SSCSI

The Spatial-Spectral encoded Compressive HS imager (SSCSI) is illustrated in figure 3. This system allows the reconstruction of a high-resolution spectral image from a single sensor, due to the design of the optical camera being based on the sampling of spatial-spectral encoded image, which is given by $o(x, y, \lambda)$ for three-dimensional hyper-spectral images (Lin et al., 2014). The image is formed by the projection of the hyper-spectral image through the spectral dimensions Ω_λ ; it can be expressed as equation (2).

$$i(x, y) = \int_{\Omega_\lambda} o(x, y, \lambda) d\lambda \quad (2)$$

The coded sensor image can be expressed as equation (3).

$$i(x, y) = \int_{\Omega_\lambda} f(x + b(a\lambda - x), y) o(x, y, \lambda) d\lambda \quad (3)$$

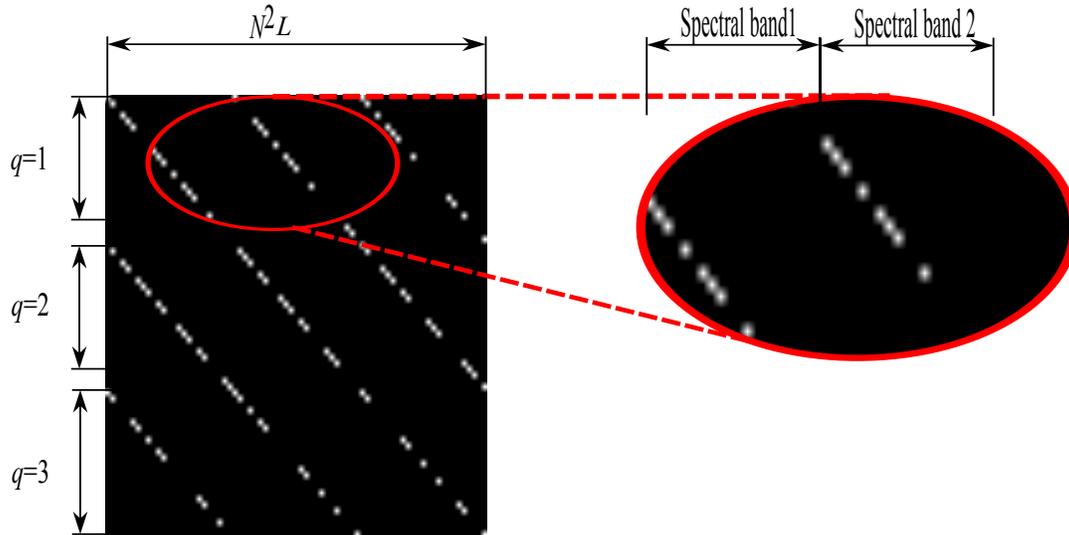


Figure 4. Sampling matrix \mathbf{H}_{SSCSI} , $N = 5$, $L = 3$, $q = 3$ and each coded spectral channel pattern for each number of spectral bands.

Source: own work.

Figure 3 shows the calibration parameter for converting spectral coordinate to spatial coordinate; and b is the distance relation between mask to sensor and between spectral planes to sensor. The equation (2) can be modeled as the matrix system SSCSI $\mathbf{g} = \mathbf{H}_{SSCSI} \mathbf{f}$ where $\mathbf{H}_{SSCSI} \in \mathbb{R}^{N^2 q \times N^2 L}$. The number represents the SSCSI sensing matrix. The matrix $p = N^2 q$ accounts for the effects of the coding mask that encodes each spectral channel independently.

Figure 4 shows the SSCSI sampling matrix $\mathbf{H}_{SSCSI} \in \mathbb{R}^{N^2 q \times N^2 L}$. The number of measurements is $p = N^2 q$. The diagonal patterns repeated in the horizontal direction correspond to each coded spectral channel pattern independently, as many times as the quantity of spectral bands.

Snapshot colored compressive spectral imager, SCCSI

Figure 5 Optics SCCSI architecture shows that the Snapshot Colored Compressive Spectral Imager (SCCSI) replaces the traditional focal plane array

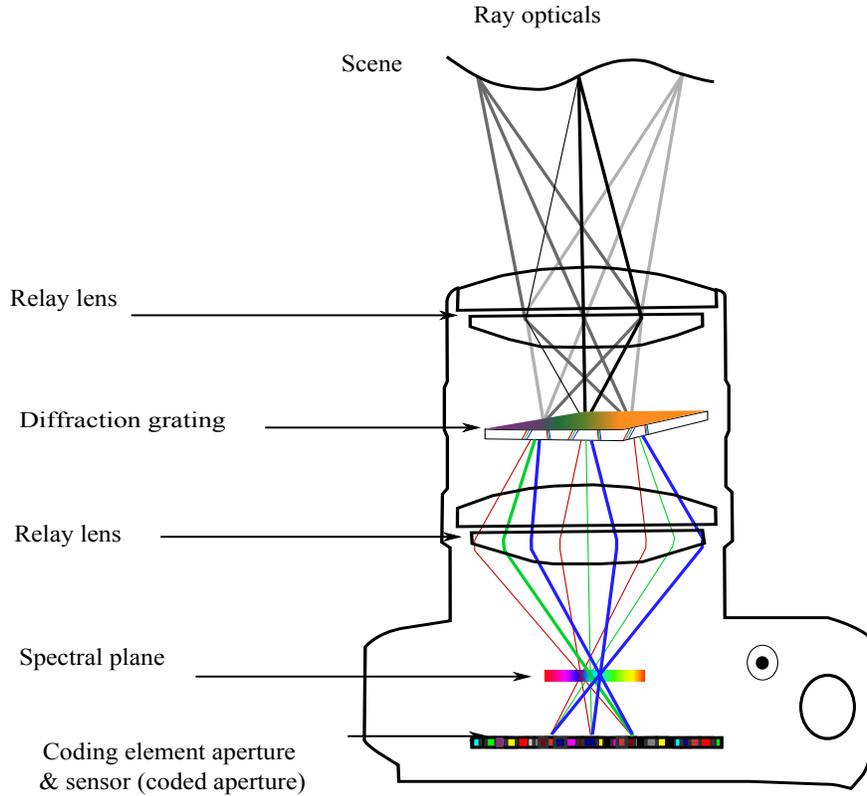


Figure 5. Optics SCCSI architecture show scene capture until coding element aperture to create each coded spectral channel by optical filters array.

Source: own work.

(FPA) by sensors with patterns of optical filters. Furthermore, a dispersive element allows capturing both spatial and spectral information from the spectral image in only one shot. This architecture has an arrangement of optical filters in the detector, with different spectral response, which allows obtaining specific spectral components in each pixel. In this way, the coding scheme is enriched, allowing the

reconstruction problem to be better conditioned. The small number of optical elements makes a compact system that generates a considerable cost reduction and helps its implementation (Correa et al., 2014).

In the SCCSI system, a dispersive element spectrally disperses the multispectral image $f_0(x, y, \lambda)$ is spectrally dispersed by, generating the field $f_1(x, y, \lambda)$ given by equation (4).

$$f_1(x, y, \lambda) = \iint f_0(x', y', \lambda) h(x' - x, y' - y - s_1(\lambda)) dx' dy' \quad (4)$$

Where $s_1(\lambda)$ is the dispersion and h is the impulse response of the system, f_1 is encoded by the optical filters array $C(x, y, \lambda)$ located in the FPA

detector, to obtain a coded and dispersed version of the original signal, expressed as equation (5).

$$f_2(x, y) = \int_{\Lambda} f_1(x, y, \lambda) C(x, y, \lambda) d\lambda \quad (5)$$

Where the system output $f_2(x, y)$ is obtained by integrating product of f_1 . The equation (5) can be expressed as $\mathbf{g} = \mathbf{H}_{SCCSI} \mathbf{f}$ where \mathbf{H}_{SCCSI} represents the SCCSI sensing matrix. The matrix \mathbf{H}_{SCCSI} is determined by the spectral response of the optical filter matrix structure and represents the proper operation of dispersive elements.

Figure 6 shows the sensing matrix of the SCCSI system $\mathbf{H}_{SCCSI} \in \mathbb{R}^{N(N+L-1) \times N^2L}$, for $N = 5$, $L = 3$ and $q = 3$. The number of measurements is $p = N(N + L - 1)q$. The diagonal patterns that repeat in the horizontal direction correspond to spectral response of the optical filter matrix structure pattern every time with a unit N downward shift, as many times as the quantity of spectral bands.

Hyper-spectral coded aperture, HYCA

The methodology based on Hyper-spectral Coded Aperture (HYCA) relies on two characteristics of hyper-spectral images: first, the low dimensional space where the hyper-spectral vector belongs; second, the high correlation between the spectral and spatial dimensions of the data cube components. The vectored data cube is defined as

$\mathbf{f} \in \mathbb{R}^{M \cdot N \cdot L}$, and the measurement vector $\mathbf{g} \in \mathbb{R}^M$ is modeled as equation (5).

$$\mathbf{g} = H(\mathbf{f}) + w \quad (6)$$

Where $H: \mathbb{R}^{N \times N \times L} \rightarrow \mathbb{R}^M$ is an operator that calculates M inner products between the hyper-spectral vector and \mathbf{f} , and w represents the noise level. As H is a linear operator, then $H(\mathbf{f})$ can be rewritten as $\mathbf{H}_{HYCA} \mathbf{f}$ where $\mathbf{H}_{HYCA} \in \mathbb{R}^{M \times (N^2L)}$ is the matrix modeling the linear operator H .

The matrix \mathbf{H} is constructed as equation (7).

$$\mathbf{H}: \text{bdiag}(\mathbf{H}_1, \dots, \mathbf{H}_{N \times N}) \quad (7)$$

Where $\text{bdiag}(\cdot)$ is the block diagonals, and $\mathbf{H}_i \in \mathbb{R}^{q \times L}$ is the matrix that measures each pixel along the spectral dimension (Martin et al., 2015). In contrast to other architectures, HYCA measurement process selects sub-compression matrices using Gaussian or Bernoulli i.e. random projections $A_i \in (H_1, \dots, H_{N \times N})$ as illustrated in figure 7, where the data cube is split into a non-overlapping square window $ws \times ws$, and ws is the window size.

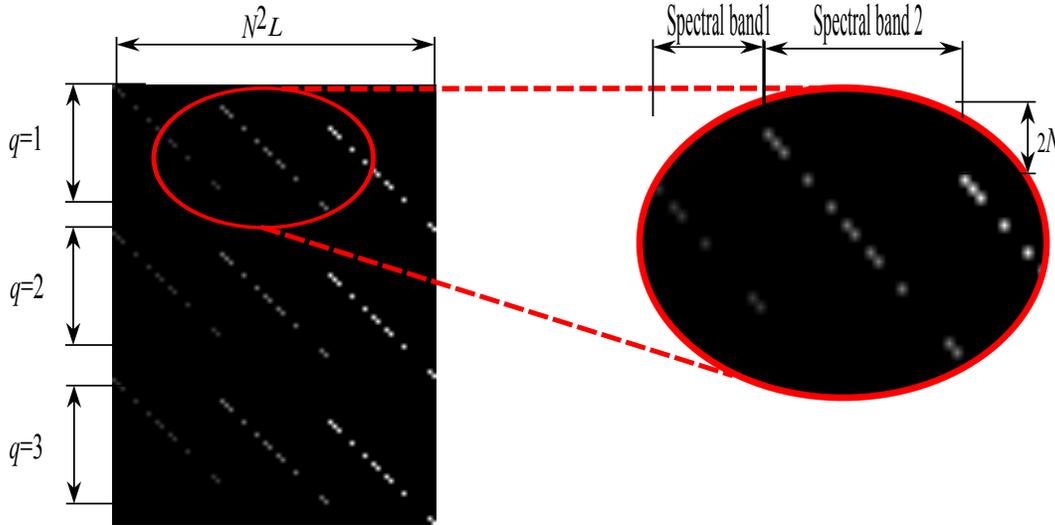


Figure 6. Sampling matrix \mathbf{H}_{SCCSI} , $N = 5$, $L = 3$, $q = 3$ and coded aperture pattern with downward shift for each number of spectral bands.

Source: own work.

Figure 8 shows the sensing matrix of the HYCA system $\mathbf{H}_{\text{HYCA}} \in \mathbb{R}^{N^2q \times N^2L}$, for $N = 5$, $L = 3$ and $q = 3$. The number of measurements is $p = N^2q$. The diagonal patterns that repeat correspond to equation (7).

Coded aperture and transmittance

The coded aperture and transmittance define the information that the architecture has on each scene. Each one of the architectures has their

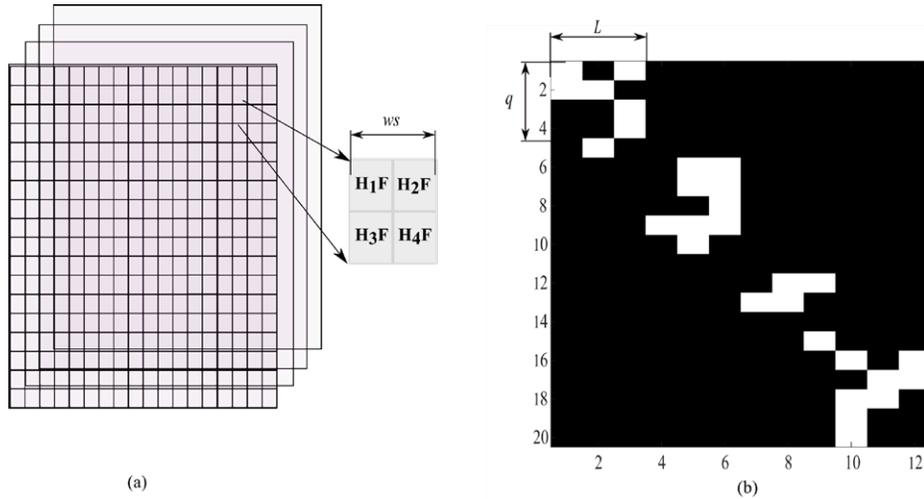


Figure 7. Strategy to take measures hyper-spectral data cube, (a) is the way as the data cube is Split into a non-overlapping square windows $ws \times ws$, (b) code aperture the matrix that measures each pixel along the spectral dimension.

Source: own work

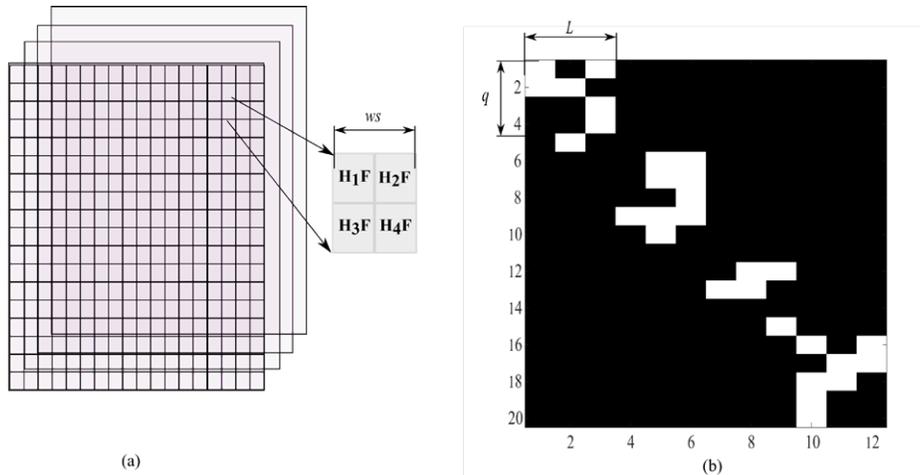


Figure 8. Sampling matrix \mathbf{H}_{HYCA} , $N = 5$, $L = 3$, $q = 3$ and block diagonals matrix that measures each pixel along the spectral dimension.

Source: own work

self-definition of these elements. The coded aperture is an element that encodes the light before it is integrated with the detector. The amount of light that passes is given by the transmittance, as illustrated in figure 9 with different transmittance percentages. Transmittance can be written as equation (8).

$$T_r = \frac{1}{Q} \sum_{i=1}^Q x_i \quad (8)$$

Where is t^{th} element of the coded aperture and, Q is the amount of total elements in the coded aperture. CASSI has values $x_i \in \{0, 1\}$ (Arguello & Arce, 2010); SSCSI, $x_i \in \{0, 1\}$ (Lin et al., 2014); SCCSI, $x_i \in \{0, \dots, 1\}$ (Correa et al., 2014), and HYCA, $x_i \in \{0, \dots, 1\}$ (Martin et al., 2015).

Summary of architectures

Table 1 shows the characteristics of the different architectures, such as the compression, matrix \mathbf{H} and the way each element is coded. Furthermore, the architectures with the best compression rate are SSCSI and, HYCA. However, HYCA is not a real architecture, but a theoretical method.

Image reconstruction

The reconstruction is based on responding a linear undetermined system of equations from estimating \mathbf{f} with a minimization function, which is expressed as equation (9).

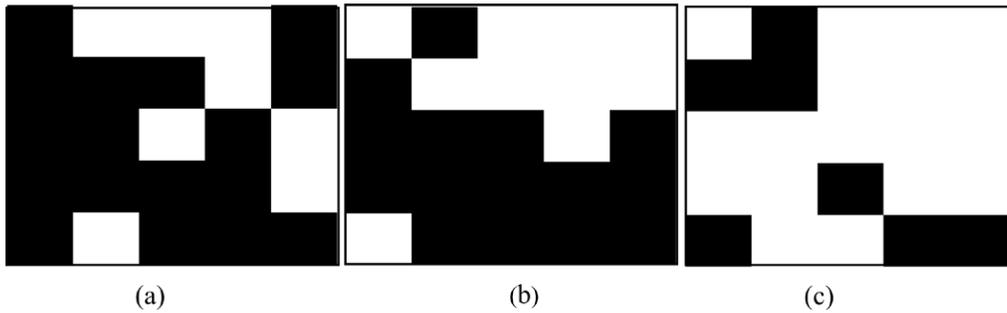


Figure 9. Transmittance percentage, (a) is 30%, (b) is 50%, (c) is 70%.

Source: own work.

Table 1. Features of the compressive sampling architectures

features	CASSI	SSCSI	SCCSI	HYCA
Compression ratio	$\frac{(M(N+L-1))q}{MNL}$	MNLqMNL	MN+L-1qMNL	MNLqMNL
Sensing matrix	$\mathbf{H}_{CASSI} \in \mathbb{R}^{(N(N+L-1))q \times N^2L}$	$\mathbf{H}_{SSCSI} \in \mathbb{R}^{N^2q \times N^2L}$	$\mathbf{H}_{SCCSI} \in \mathbb{R}^{N(N+L-1)q \times N^2L}$	$\mathbf{H}_{HYCA} \in \mathbb{R}^{N^2q \times N^2L}$
Coding element	Block or unblock elements spectral response	Mask modulate the images in spatial and spectral dimensions	the arrangement of optical filters in the detector, with a different spectral response	Approaches of physical spatial/spectral coding

Source: own work.

$$\mathbf{f} = \Psi(\min_s \|\mathbf{g} - \mathbf{H}\Psi\mathbf{s}\|_2^2 + \tau \|\mathbf{s}\|_1) \quad (9)$$

Where the parameter τ is regularization constant and \mathbf{H} can be the mentioned sensing matrices in table 1. The reconstruction requires using algorithms to converge quickly such problems. For

example the GPSR algorithm (Figueiredo, Nowak, & Wright, 2007); the TWIST algorithm, which uses an implicit dispersed dictionary as total variation to solve the optimization problem (Bioucas-Dias & Figueiredo, 2007); the SPARSA algorithm, designed to solve optimization problems on a large scale, and it involves the sum of a term of soft error

Table 2. Mean reconstruction PSNR in [dB] compressive sampling architectures

shots	CASSI		SSCSI		SCCSI		HYCA	
	compression %	PSNR [dB]						
1	13,18	30,69	12,50	32,91	13,18	29,18	12,50	31,49
2	26,36	32,69	25,00	35,06	26,37	30,18	25,00	34,42
3	39,55	33,81	37,50	36,65	39,55	30,53	37,50	37,65
4	52,73	34,96	50,00	37,57	52,73	30,61	50,00	37,59

Source: own work.

and a regularizing term correlated to the GPSR that is not limited to the regularization l_1 (Wright, Nowak, & Figueiredo, 2009).

METHODOLOGY

The simulations for this paper were developed on two test datasets and several experiments with measurements obtained from datasets with different compression rates from 12,50% to 52,73%, in order to analyze the reconstruction performance of each architecture. We used the Indian Pines and Salinas datasets from AVIRIS sensor for the simulations (Indiana's, 1992). Indian Pines dataset had 145 x 145 pixels, 220 spectral bands ranging from 0.2 to 2.4 μm with a spatial resolution of 20 m. Salinas dataset had 512 x 217 pixels, 224 spectral bands, and spectral resolution of 3.7 m. (Grupo de Inteligencia Computacional de la Universidad del País Vasco (UPV/EHU), 2014). We used 8 spectral bands with 128x128 pixels from each dataset. The reconstruction algorithm used was GPSR (Wright et al., 2009) with up to 200 iterations; the

transmittance in the random matrices was 50%, and shots up to $q = 4$.

RESULTS

For simulations, sensing matrices depicted in table 1 performed the compressive measurements. Table 2 details the PSNR as a function of the number shots, the data compression, and the PSNR values obtained in the reconstruction for CASSI, SSSCI, SCCSI, and HYCA measurements. It also shows that SSSCI from 1 to 2 shots has the highest value reached (32,91 [dB] and 35,05 [dB]), while HYCA from 3 to 4 shots has the highest value reached (37,65 [dB] and 37,59 [dB]). Additionally, in all architectures the higher the number of shots, the higher the PSNR of reconstructed images.

Figure 10 and figure 11 show the Indian Pines and Salinas data cube reconstructions for CASSI, SSSCI, SCCSI and HYCA architectures, with their respective PSNR. In addition, the best reconstruction was 35,06 [dB], performed with a 25% compression of the SSSCI data measurements.

Figure 12 and figure 13 show the spectral signatures of the pixels in the spatial coordinates (80, 60) and (110, 96) generated for CASSI, SSCSI, HYCA, and SCCSI architectures of the Salinas and Indian Pines images. CASSI spectral signature has a starting point value at 60% above Indian

Pines spectral signature and ends up at 33% above; HYCA spectral signature has intensity value at 20% below and finishes at 11% above; and SSCSI follows that behavior. In the case of spectral signature of the SALINAS, spectral signature of the CASSI starting point value was 140% above and

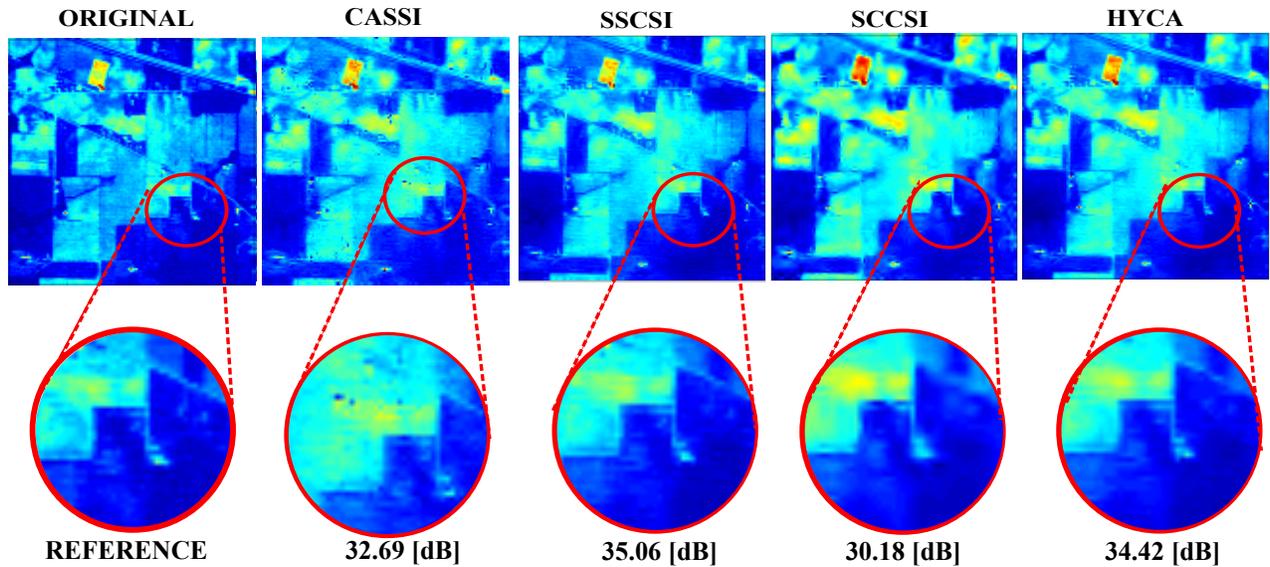


Figure 10. INDIAN PINES image reconstruction with CASSI, SSCSI, SCCSI, HYCA architectures

Source: own work.

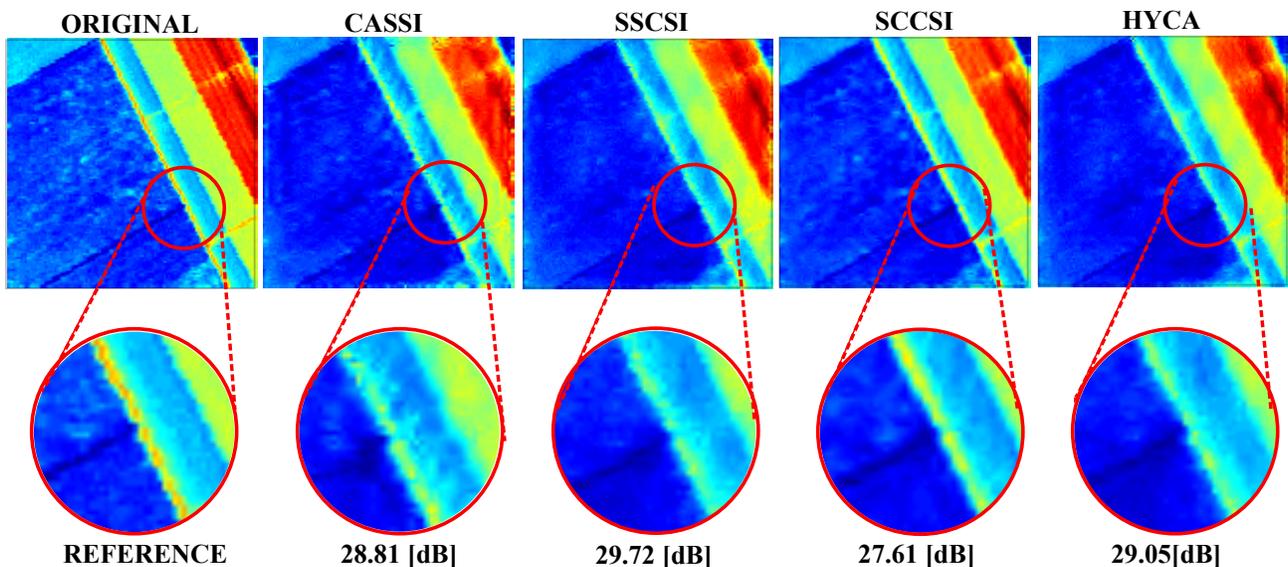


Figure 11. SALINAS image reconstruction with CASSI, SSCSI, SCCSI, and HYCA architectures.

Source: own work.

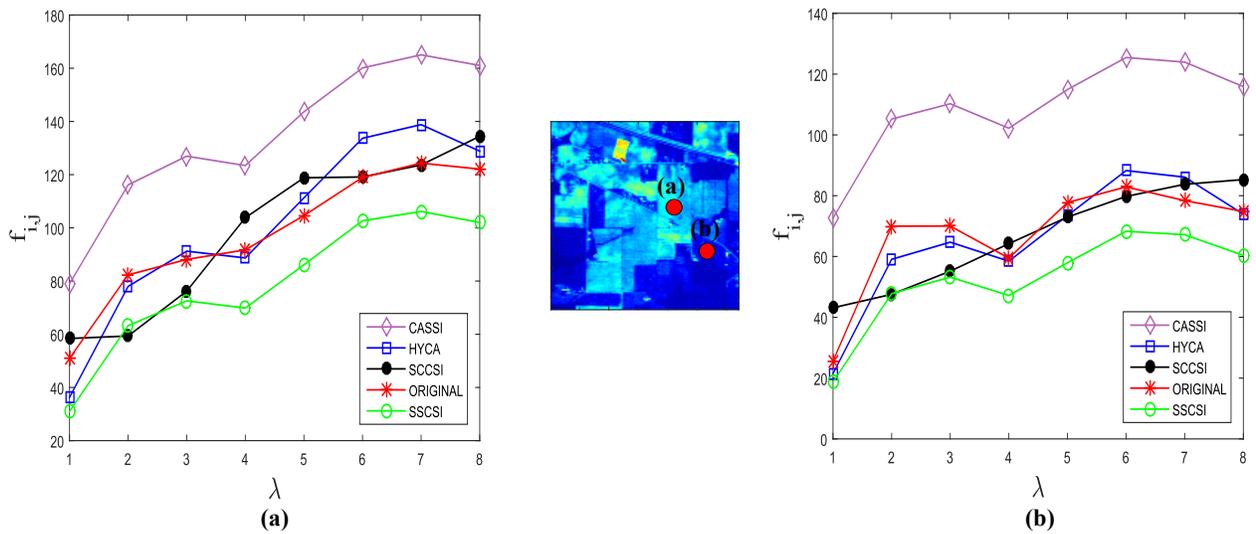


Figure 12. The spectral signature of a pixel in the image Indian Pines in CASSI, SSCSI, SCCSI, and HYCA architectures, (a) is 80,60 point, (b) is 110,96 point.

Source: own work.

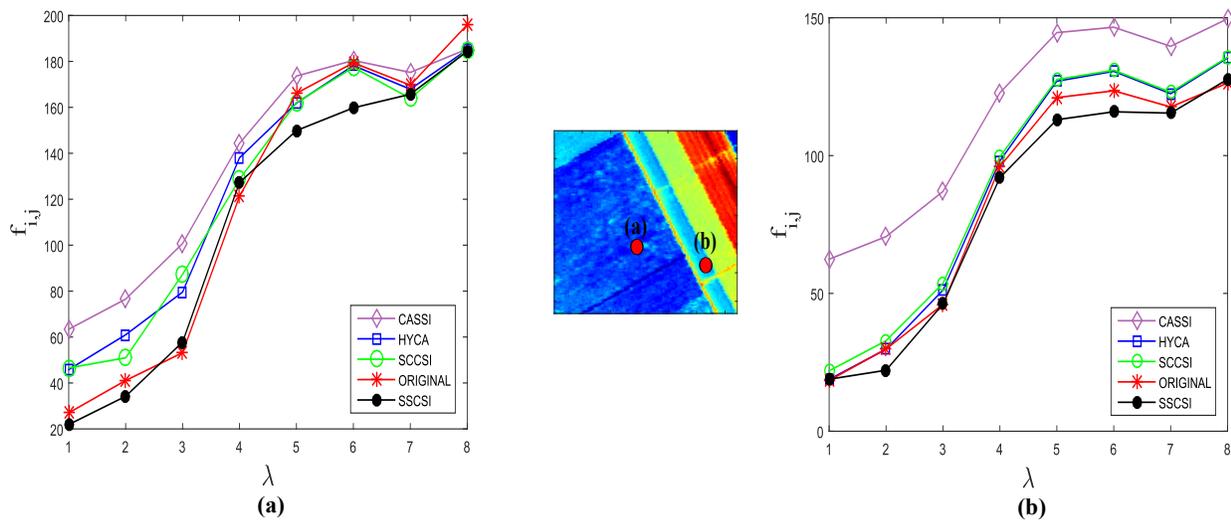


Figure 13. The spectral signature of a pixel the Salinas with CASSI, SSCSI, SCCSI, and HYCA architectures, (a) is 80,60 point, (b) is 110,96 point.

Source: own work.

ends at 10% below; HYCA spectral signature has intensity value at 80% above and finishes at 10% below. This can be generalized for both pixels in both images.

CONCLUSIONS

In this work, we presented a coded aperture pattern, data compression, peak signal-to-noise ratio (PSNR) and dispersive elements analysis of CASSI,

SSCSI, SCCSI, and HYCA compressive sampling systems. In order to compare qualitatively, the sampling matrices of each architectures were depicted. The main difference between the architectures is the way to compress the image; CASSI spatially encodes each spectral band equally, and the measurements are the integration on the detector of a coded and shifted version of the spectral bands. On the contrary, SCCSI codes in a space-spectral way, so coding each band is different. The SSSCI measurements are multiplexed without a shift; and HYCA is a theoretical compression method that poses the spectral attenuation of pixels multiplexed without a shift in the spectral bands.

The construction of the measurements affects the quality of the reconstruction in each architecture, and this is proved in the results of the simulations, in which the same parameters are set up while comparing the different architectures. SSSCI reaches the highest PSNR value (35.06 [dB]) with the 25 % of data compression.

REFERENCES

- Arafat, S.M.; Aboelghar, M.A. & Ahmed, E.F. (2013). Crop Discrimination Using Field Hyper Spectral Remotely Sensed Data. *Advances in Remote Sensing*, 02(02), 63–70. <http://doi.org/10.4236/ars.2013.22009>
- Arce, G.R.; Brady, D.J.; Carin, L.; Arguello, H. & Kittle, D.S. (2014). Compressive coded aperture spectral imaging: An introduction. *IEEE Signal Processing Magazine*. <http://doi.org/10.1109/MSP.2013.2278763>
- Arguello, H. & Arce, G. (2010). Code aperture design for compressive spectral imaging. In *18th European Signal Processing Conference* (pp. 1434–1438). <http://doi.org/10.1086/180230>
- Backhaus, A.; Bollenbeck, F. & Seiffert, U. (2011). Robust classification of the nutrition state in crop plants by hyperspectral imaging and artificial neural networks. In *2011 3rd Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS)* (pp. 1–4). IEEE. <http://doi.org/10.1109/WHISPERS.2011.6080898>
- Baraniuk, R.G. (2007). Compressive Sensing. *IEEE Signal Processing Magazine*, 118–124.
- Bioucas-Dias, J.M & Figueiredo, M.A.T. (2007). A new TwIST: Two-step iterative shrinkage/thresholding algorithms for image restoration. *IEEE Transactions on Image Processing*, 16(12), 2992–3004.
- Camacho-Velasco, A.; Vargas-García, C.A.; Rojas-Morales, F.A.; Castillo-Castelblanco, S.F. & Argüello-Fuentes, H. (2015). Aplicaciones y retos del sensado remoto hiperespectral en la geología colombiana Applications and challenges of hyperspectral remote sensing in the colombian geology Aplicações e desafios do sensoriamento remoto hiperespectral na geologia colombiana. *Revista Facultad de Ingeniería (Fac. Ing.)*, 24(40), 17–29.
- Correa, C.V.; Argüello, H. y Arce, G.R. (2014). Compressive spectral imaging with colored-patterned detectors. In *Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2014 IEEE International Conference on* (pp. 7789–7793).
- Donoho, D.L. (2006). Compressed sensing. *IEEE Transactions on Information Theory*, 52(4), 1289–1306. <http://doi.org/Doi 10.1109/Tit.2006.871582>
- Espitia, M.O.; Mejía, M.Y. & Argüello, F.H. (2016). Tomografía computariza: proceso adquisición, tecnología y estado actual. *Revista Tecnura*, 20(47), 119-135.
- Figueiredo, M.A.T.; Nowak, R.D. & Wright, S.J. (2007). Gradient projection for sparse reconstruction: Application to compressed sensing and other inverse problems. *IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing*, 1(4), 586–597. <http://doi.org/10.1109/JSTSP.2007.910281>
- Foucart, S. & Rauhut, H. (2013). *A Mathematical Introduction to Compressive Sensing*. New York: Springer.
- Golbabaee, M.; Arberet, S. & Vanderghenst, P. (2013). Compressive Source Separation: Theory and Methods for Hyperspectral Imaging. *IEEE Transactions on Image Processing*, 22(12), 5096–5110. <http://doi.org/10.1109/TIP.2013.2281405>
- Griffin, M.K.; May-Hsu, S.; Burke, H.K.; Orloff, S.M. & Upham, C.A. (2005). Examples of EO-1 Hyperion data analysis. *Lincoln Laboratory Journal*, 15(2), 271–298.

- Grupo de Inteligencia Computacional de la Universidad del País Vasco (UPV/EHU). (2014). *Hyperspectral Remote Sensing Scenes*. Retrieved from <http://www.ehu.es/ccwintco/index.php?title=Hyperspectral{ }Remote{ }Sensing{ }Scenes>
- Hayashi, K.; Nagahara, M. & Tanaka, T. (2013). A user's guide to compressed sensing for communications systems. *IEICE Transactions on Communications*, *E96-B(3)*, 685–712. <http://doi.org/10.1587/transcom.E96.B.685>
- Indiana's, A.N.W. (1992). *Indiana's Indian Pines Dataset*. Retrieved from <https://engineering.purdue.edu/~biehl/MultiSpec/hyperspectral.html>
- Lelong, C.C.D.; Roger, J.M.; Brégand, S.; Dubertret, F.; Lanore, M.; Sitorus, N.A.; ... Caliman, J.P. (2010). Evaluation of oil-palm fungal disease infestation with canopy hyperspectral reflectance data. *Sensors*, *10(1)*, 734–747. <http://doi.org/10.3390/s100100734>
- Lin, X.; Liu, Y.; Wu, J. & Dai, Q. (2014). Spatial-spectral encoded compressive hyperspectral imaging. *ACM Trans. Graph.*, *33(6)*, 233:1–233:11. <http://doi.org/10.1145/2661229.2661262>
- Martin, G.; Bioucas-Dias, J.M. & Plaza, A. (2015). HYCA: A New Technique for Hyperspectral Compressive Sensing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *53(5)*, 2819–2831. <http://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2365534>
- Mishne, G.; Talmon, R. & Cohen, I. (2015). Graph-based supervised automatic target detection. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *53(5)*, 2738–2754. <http://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2364333>
- Morteza, H. (2015). Reducing ADC Sampling Rate with Compressive Sensing. *ArXiv Preprint arXiv:1503.00311*, 1–8.
- Nyquist, H. (1928). Certain Topics in Telegraph Transmission Theory. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, *47*, 617–644.
- Ozturk, S.; Esin, Y.E. y Artan, Y. (2015). *Object Detection in Rural Areas using Hyperspectral Imaging*, *96432M*. <http://doi.org/10.1117/12.2195326>
- Soydan, H.; Koz, A.; Azebne Düzgün, H. & Aydin Alatan, A. (2015). Hydrocarbon microseepage mapping using signature based target detection techniques. In *SPIE Remote Sensing* (pp. 96440I-96440I). International Society for Optics and Photonics. <http://doi.org/10.1117/12.2195105>
- Velasco, A.C.; García, C.A. & Fuentes, H.A. (2016). Un estudio comparativo de algoritmos de detección de objetivos en imágenes hiperespectrales aplicados a cultivos agrícolas en Colombia. *Revista Tecnura*, *20(49)*, 86-99.
- Wright, S.J.; Nowak, R.D. & Figueiredo, M.A.T. (2009). Sparse reconstruction by separable approximation. *IEEE Transactions on Signal Processing*, *57(7)*, 2479–2493.
- Zare, A.; Bolton, J.; Chanussot, J. & Gader, P. (2014). Foreword to the Special Issue on Hyperspectral Image and Signal Processing. *Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of*, *7(6)*, 1841–1843. <http://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2341811>





Multichannel assignment using K-Means in cognitive radio networks

Asignación multicanal usando K-Means en redes de radio cognitiva

Hans Marquez¹, Camila Salgado², Cesar Hernández³

Fecha de recepción: 12 de septiembre de 2016

Fecha de aceptación: 15 de febrero de 2017

Cómo citar: Márquez, H.; Salgado, C.; y Hernández C. (2017). Multichannel assignment using K-Means in cognitive radio networks. *Revista Tecnura*, 21(52), 68-78. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.2.a05

Abstract

Context: The developed scheme allows carrying out the assignment of several frequency channels (both contiguous and not contiguous) available to the secondary users that require a higher bandwidth, under an environment of equality.

Objective: The following paper develops a multi-channel assignment which allows taking in a more efficient way the spectral opportunities in cognitive radio networks.

Method: The developed assignment model is composed by the K-Means algorithm, which is in charge of carrying out the grouping of channels through clusters for the best parameters, and another algorithm in charge of establishing an equal criteria for all the secondary users that wish to transmit. The reached results were evaluated with experimental spectral occupancy data taken from the GSM frequency band. The developed model was compared with the MFA-CRN algorithm.

Results: The obtained measurements correspond to the average bandwidth, the average delay, and the fairness calculation in the assignment of several channels. The developed assignment model shows an improvement in the assignment of a higher

transmission average bandwidth for each secondary user while maintaining the fairness criteria in the channel assignments.

Conclusion: Despite the increasing in the number of handoffs, it is also observed that metrics such as average bandwidth, average throughput and average delay are never negatively impacted by this increase in handoffs.

Keywords: K-Means, assignment, multichannel

Resumen

Contexto: El esquema desarrollado permite realizar la asignación de varios canales de frecuencia tanto contiguos como no contiguos que se encuentren disponibles a usuarios secundarios que requieran un mayor ancho de banda, bajo un ambiente de equidad.

Objetivo: El presente trabajo desarrolla un modelo de asignación múltiple de canales que permite aprovechar de forma más eficiente las oportunidades espectrales en redes de radio cognitiva.

Método: El modelo de asignación desarrollado está compuesto por el algoritmo K-Means, encargado de realizar el agrupamiento de canales mediante clústeres para los mejores parámetros y otro encargado

1 Electronic Engineer, master in Information and Communication Sciences. Young researcher at Colciencias, Bogotá, Colombia. Contact: hans.marquez.ramos@gmail.com

2 Electronic Engineer and Telecommunications, master in Information and Communication Sciences. Researcher at Universidad ECCI. Bogotá, Colombia. Contact: lsalgadof@eccci.edu.co

3 Electronic Engineer, master in Information and Communication Sciences, doctor in Engineering. Professor at the Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contact: cahernandezs@udistrital.edu.co

de establecer un criterio de equidad para todos los usuarios secundarios que deseen transmitir. Los resultados alcanzados se evaluaron con datos experimentales de ocupación espectral, capturados en la banda de frecuencia GSM. El modelo desarrollado fue comparado con el algoritmo MFA-CRN.

Resultados: Las mediciones realizadas corresponden al ancho de banda promedio, el retardo promedio y el cálculo de *fairness* en la asignación de varios canales. El modelo desarrollado evidencia

una mejora en la asignación de un mayor ancho de banda promedio de transmisión para cada usuario secundario, manteniendo el criterio de equidad en la asignación de los canales.

Conclusión: A pesar del aumento en el número de handoffs, se observa que métricas como ancho de banda promedio, throughput promedio y retardo promedio no se ven en ningún momento impactadas de manera negativa frente a este aumento de handoffs.

Palabras clave: K-Means, asignación, multicanal

INTRODUCTION

The cognitive radio networks respond to the need of making a flexible use of the spectrum in order to optimize the spectrum resources that are scarce in the wireless networks. This can be understood as an opportunity to improve the type of service for the users of wireless technologies, who will make an opportunistic use of the available spectrum as a consequence of having a better spectral efficiency (Hernández, Páez & Giral, 2017; Chen, Wei, Jin, & Ge, 2013).

These spectral opportunities are variant resources in the frequency-time domain, which the secondary users (SU) can use until the primary user (PU) requires once again the portion of the spectrum that the SU are using in order not to generate interference in the transmissions. According to this restriction, it is necessary that the SU move to another free spectral opportunity. This process of change is called spectral handoff. (Hernández, Márquez & Pedraza, 2017; Tragos, Zeadally, Fragkiadakis, & Siris, 2013)

The procedures described above are based on the assignment of one single channel. However, this paper proposes to carry out a multichannel assignment for the secondary user, allowing real time applications and single-channel for the delay-tolerant applications.

Nevertheless, assigning several channels to one single Secondary User means taking into

consideration a fairness criterion for the fair assignment of resources for each one of the interested SU; it also implies choosing a method which allows carrying out the selection of the best available resources for an efficient assignment of all the users. To solve this problem, it is considered the implementation of the fairness criterion to make a fair assignment of the available resources among all the secondary user, and the K-Means algorithm (Xu, Han, & Nie, 2016) will be used to group the best available resources as a resource classification method.

The current paper is divided as follows: Section 2 presents the related work; Section 3 describes the model development; Section 4 presents the reached results; and Section 5 shows the conclusions.

RELATED WORK

The research by (Nguyen, Madhukumar, Tio, & Ng, 2010) proposes an algorithm that uses K-Means for dynamic grouping the bands (DBC); this implementation allows a reduction in the number of erroneous sub-bands of spurious noise and, hence, reduces the global detection time. Additionally, it presents a problem regarding the local decision combination of Secondary Users. This problem is addressed with a dynamic decision algorithm based on weight that proves superior to other algorithms with the same technique.

On the other hand, (Chen, Hou, Huang, & Jing, 2016) presents a cooperative algorithm for CRN, which makes use of the K-Means technique to carry out an offline training and establishing a set of data for training. This set would be utilized as a basis for the stage of online classification, which carries out a comparison between the received signals against the training data; this is how it decides the channel availability. The fusion center will sequentially make the final decision according to the local detection result of the different sensors. Each sensor is responsible for the analysis of a certain period of the received signal. This algorithm differs from others because the proposed threshold for this algorithm is measured by a similarity of characteristics in multiple dimensions and not for a fixed value. The results evaluate the performance, making a comparison between different methods, and the result shows that this scheme can achieve better performance and work in a more efficient way.

(Kang, Ryu, Lee, & Jeong, 2011) develops a description regarding the performance of the no homogeneity detector (NHD) with several normalization methods for the processing of the radar signals airborne under the heterogeneous disorder environments. Additionally, the threshold is estimated using statistical analysis as the mean, the median and the K-Means algorithm with training data in the NHD process. The data used in the threshold is included in the recalculation of the covariance matrix of the total interference whose accuracy is evaluated through the statistical test of a modified sample matrix inversion (MSMI). The projection statistics (PS) are used to compare the performance of the detection of unique and multiple objectives. The simulation results show that the algorithm for grouping K-means is a method of normalization which can ameliorate the performance of the Space-Time Adaptive Processing (STAP) in a no homogenous environment.

(McLean, Silvius, & Hopkinson, 2013) presents an innovative model that determines the grouping configurations for different network types and in various RF environments. A software based on

K-Means developed by the University of Maryland that demonstrates the possibility of using K-Means in cognitive radio through simulations in Matlab. The configuration shows resistance to the interference. The research also proposes a new metric called Intra-Cluster Spectrum Similarity (ICSS), which evaluates the grouping effectiveness. This metric shows that the developed model has a possibility of improving the reliability in the cognitive radio networks in a dynamic spectrum environment.

The research by (Kumar, Kandpal, Jain, Gangopadhyay, & Debnath, 2016) implements the unsupervised grouping K-Means technique in order to improve the performance of the cooperative spectrum detection in fading channels κ - μ . The simulations take into consideration a BPSK transmission with different parameters of the system in the receiver characterization.

(Zhang, Hu, Bao, & Wu, 2013) proposes an algorithm of a neural network for the spectrum prediction based on K-Means called K-RBF. This algorithm can predict holes in the spectrum through the historical spectrum information of the PU, improving the efficiency of the spectrum detection process. The simulation results show that this algorithm can accurately predict the access to the PU's spectrum.

(Moumena, 2015) presents a detection method based on the union of the compressed sample (CS) and the K-means algorithm to detect the presence of the interference attack signal in the spectrum based on the two proposed hypothesis by H_0 and H_1 (lack of interference and presence of interference). An analog information (AIC) was used in each radio receptor to carry out the compression sampling. The compressed measurements obtained after applying CS to each radio receptor are located in a dimension matrix Y . The obtained results show that the original method works well and has low energy use and low computational complexity.

(Xue & Feifei, 2015) proposes a spectrum detection method based on automatic learning. This method uses a covariance matrix with the received signal samples by several antennas. Before carrying out the detection process, the cognitive radio

(CR) will apply first the K-means grouping algorithm in order to discover the PU transmission patterns. Then, the supervised learning algorithm (Support Vector Machine) will train the CR and determine the PU status. This method does not need any information about the signal, the channel, or the noise power a priori. The simulations show clearly the efficacy of the proposed model.

(Lu, Zhu, Wang, & Fattouche, 2016) proposes a probability vector of low dimension for the machines to learn based on the spectrum cooperative detection in CRN. This approach also considers the K-Means algorithm, and the support vector machine (SVM) with the probability vector. The proposed probability vector can decrease the dimension of the energy vector present of N dimension to two dimensions taking into account a CRN with just one PU and N SU, resulting in a similar or better accuracy in detection, a low duration of training, and a shorter classification time.

Finally, (Bajali, Nagendra, Hota, & Raghurama, 2016) proposes the definition of archetypal clusters

without supervision, where the local energy vectors are decomposed into a collection of extreme points called archetypes. This type of cluster has similarity with the K-Means method. While the latter provides an average view of the data, the former provides an extreme view. The performance of the algorithm is evaluated through detection probability and compliance with the standard IEEE 802.22 (WRAN). In the results, the proposed algorithm is compared with k-means and SVM.

METHODOLOGY

The proposed model is presented in figure 1.

Defining the simulation time and the spectral occupancy data

The model carries out the assignment of resources according to the existing demand taking into account the existing time slots for the simulation. It should be noted that each time slot has a

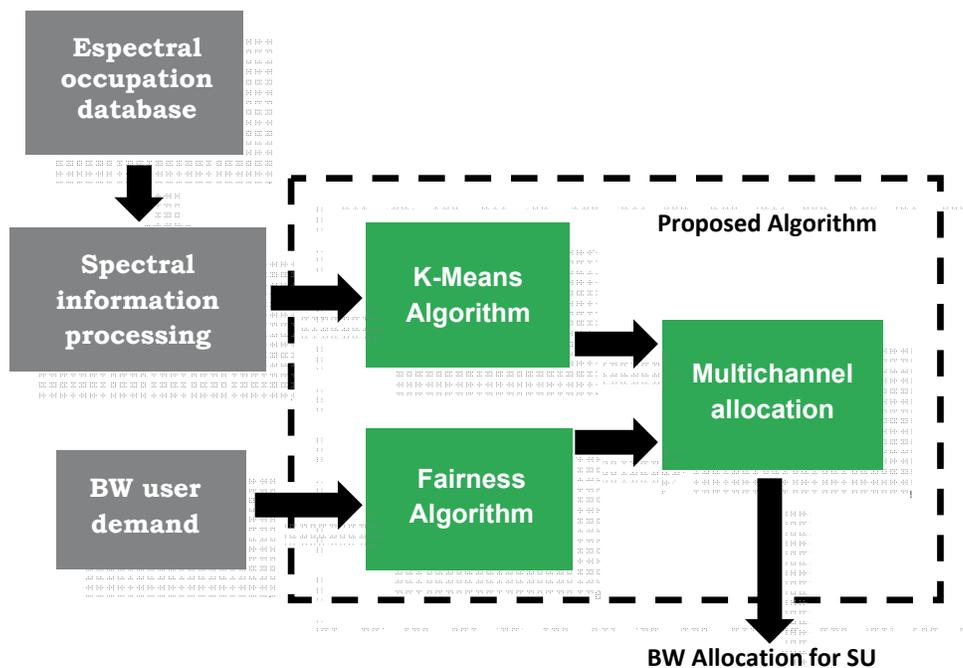


Figure 1. General structure of the proposed model

Source: own the author

duration of 300 ms and the total simulation time is 10 min.

Additionally, the model has a matrix with spectral occupancy data as input data for the GSM frequency bands making a significant differentiation in terms of measured traffic at different time intervals. Such differentiation refers to the volume of information and occupancy shown in each of the channels, which obtains high-traffic and low-traffic data. This differentiation presents the evaluation of the model in two different scenarios, each one with different characteristics.

Choosing the channel selection method

The k-means non-supervised learning algorithm is used for channel selection, which classifies data through a number k of clusters. Thus its goal is to define a k number of centroids for each of the clusters, then it takes each of the data and associates it to the nearest center (Ramler, 2008) (Pandey, 2015). This process is carried out until all the data is assigned to one of the centroids. This procedure is performed iteratively for an n number of times; hence the centroids will vary at each iteration until they reach stability (Vassilvitskii, 2007). Finally, this algorithm aims to minimize an objective function known as a mean-squared error given by equation (1).

$$J(V) = \sum_{c=1}^c \sum_{i=1}^{c_i} (\|x_i - v_j\|)^2 \quad (1)$$

Where $\|x_i - v_j\|$ is the Euclidean distance x_i y v_j , c_i is the number of data in the cluster v_j and c is the centroid number.

Scenario 1: System resources greater than user demands

The resources in a system, such as bandwidth, can be used by a user who requires multi-channel transmissions. However, the condition in equation (2) must be fulfilled so the system can satisfy the demands of all users with both real-time and best-effort applications:

$$\sum_{i=1}^n BW_i \leq \sum BW_s \quad (2)$$

Where BW_i corresponds to the demand for bandwidth by the N users available in the system.

However, more resources can be assigned according to availability. This over-assignment would be given by equation (3).

$$\sum_{t=1}^T BW_t = \sum BW_i \quad (3)$$

Scenario 2: System Resources Minor to Users' Demands

Under this scenario, it is necessary to know that not all the demands of the users will be completely satisfied; however, it should be ensured under a fairness criterion that all users will be able to make use of network resources, even if it is not done in the same time slot but in successive slots. Therefore, equation (4) can be inferred.

$$(x) = \sum_{s=1}^s (U_s) - \sum_{l=1}^s (C_s) \quad (4)$$

Where U_s is the transmission probability of an x user, to whom a cost C_s is assigned; this cost refers to the possibility of having to transmit again in a later time slot due to the limitations of the system resource.

Design model

The proposed model takes a spectral occupancy database and secondary user bandwidth demands as input variables. Before carrying out the channel selection process, the spectral information processing block adapts the spectral occupancy data for the channel grouping block using the K-Means technique. Then, this non-supervised learning technique performs 15 iterations of clustering, seeking to gather the channels in two clusters with the best characteristics such as: average availability time, signal-to-noise ratio and probability of availability.

The channel selection process not only takes into account the K-Means technique, but also that channel allocation must be fair for all secondary

users. For this reason, the “Fairness Algorithm” block is included in the model. This block is also used by the MFA-CRN algorithm (Hernandez, Marquez, & Pedraza, 2016), which tries to generate a fairness of assignment in the bandwidth. It could be defined as a set of active users throughout the assignment mechanism, assigning a resource R_s to each user s so that equation (5) is fulfilled.

$$\sum_{s \in S} R_s \leq R \tag{5}$$

Where R is the total amount of resources of the system. However, when the resource offer is greater than the demand, equation (6) must be fulfilled.

$$\sum_{s \in S} R_s + \sum_{s \in S} \frac{N}{S} + Re \leq R \tag{6}$$

Where N represents the number of surplus resources, and Re is resources reservation.

This implementation must take into account *Fair Queueing*, which must be applied in a means of communication with resource restrictions. This algorithm is fundamental in the proposed model due to high traffic handling. It is possible that the average bandwidth assignment for each secondary user does not satisfy them 100%, the next time slot will carry out an average of weights for each channel as shown in equation (7).

$$\frac{\sum_{i=1}^n x_i w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} + \frac{\sum_{i=1}^n x_r w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \tag{7}$$

Where x_i represents the percentage of channel assignment for elapsed time intervals and w_i represents the weight assigned to each of the channels

according to the assignments made. In addition, x_r represents the percentage of additional channel assignment that arose due to a greater supply of channel demand.

It is possible to adjust the model to make a fair assignment of bandwidth for all secondary users; it is also possible to select channels for the respective allocation with the fair model and the channel grouping algorithm by the K-Means technique.

SIMULATION

The requested bandwidth for each of the SU was quantified based on the number of channels required according to the type of application developed by each user. These demands can be single channel or multiple channels. For the simulation, 4 types of demands were developed (from the most demanding in resources to the least demanding) in order to perform a performance evaluation of the algorithm proposed in these scenarios. The bandwidth of each channel is 100 KHz. The 4 types of demands are shown in table 1.

The 4 SU classes (which demand 10, 4, 2 or 1 channel, respectively) were determined by a transfer rate analysis corresponding to 5 types of services or applications that an SU commonly used today and whose demand is increasing. These services are:

- Streaming Services
- Videoconferencing services
- Web Services
- Voice Services
- Multimedia Services.

Table 1. Types of SU demand

Demand	Description	Users 10 Channels	Users 4 Channels	Users 2 Channels	Users 1 Channel	Total Users
A	Strong over-assignment	5	5	10	20	40
B	Mild over-assignment	10	10	15	30	65
C	Mild Punishment	25	15	25	35	100
D	Strong Punishment	40	15	20	25	100

Source: own the author

RESULTS

Measurements of bandwidth, average delay, failed handoffs, handoffs and throughput were performed for 4 different types of demands in a time range of 10 minutes.

Table 2 shows the way the demands are classified.

Table 2. Types of analyzed demands

Type	Number of users	Supply/demand ratio
DMA	40	240%
DMB	65	132%
DMC	10	67%
DMD	10	50%

Source: own the author

The results are presented through figures 2 to 6.

Figure 2 states that the bandwidth assignment is more effective in DMA and DMB for 1 channel and 2 channels; however, the channel assignment was approximately 25% less to what was requested for the case of 4 channels (figure 2c), and the allocation was between 40% and 80% compared to the required in the case of 10 channels (figure 2d). The factor to keep in mind is the number of users who are requesting channels.

Regarding the delay, it is observed that the behavior is similar in each type of demand versus the number of channels requested. However, the case of the 10-channel delay (figure 3d) determines that the shortest delay is for DMA (strong over-assignment), which indicates that a larger assignment of

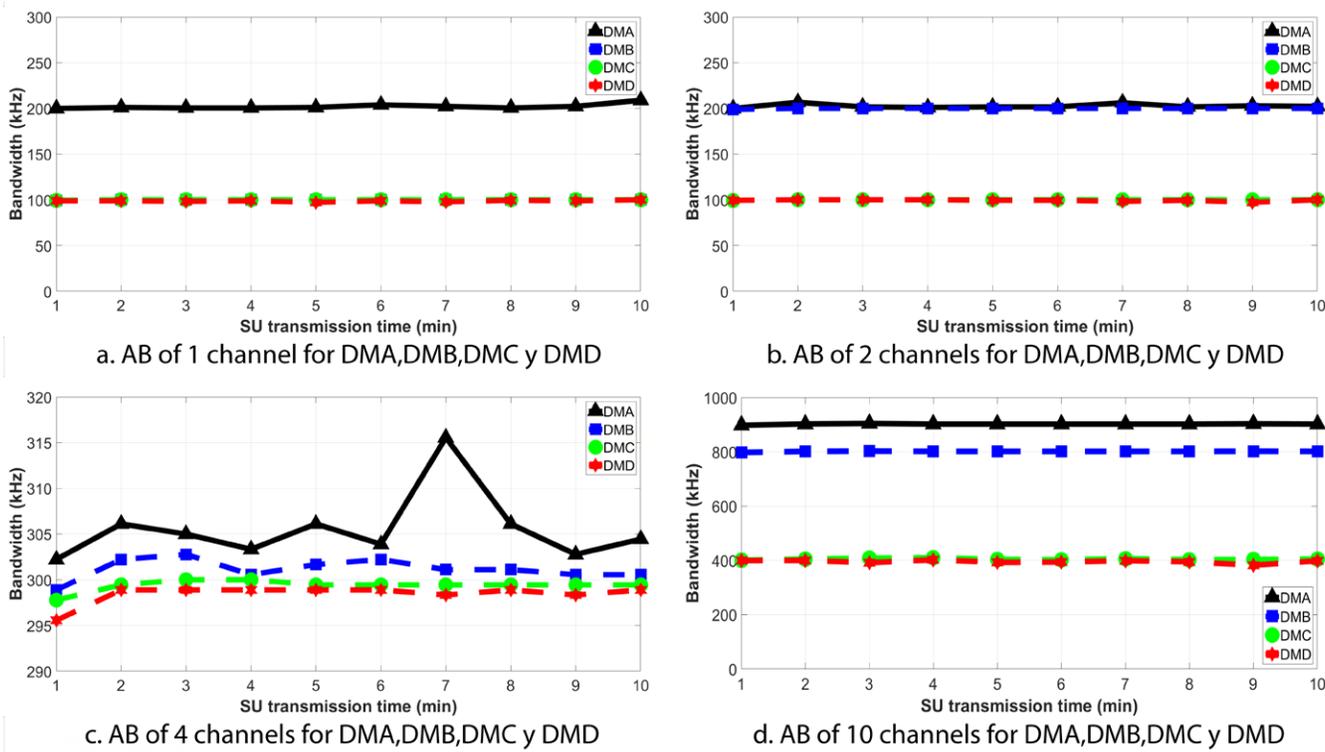


Figure 2. Average bandwidth in high traffic for DMA, DMB, DMC and DMD

Source: own the author

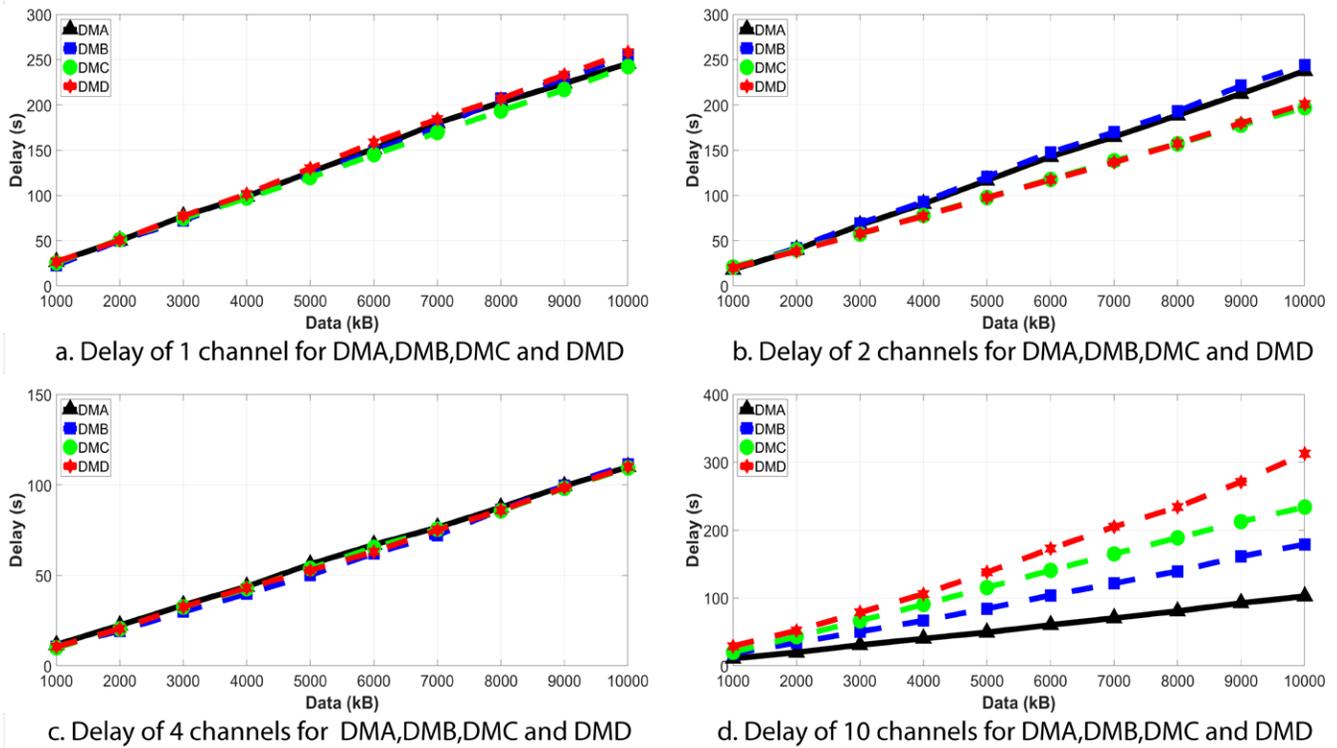


Figure 3. Average delay in high traffic for DMA, DMB, DMC and DMD

Source: own the author

channels to each user will allow the generated delay in the transmission to be positively affected.

Figure 4 shows an increasing in the number of failed handoffs for DMA for 1-, 2-, 4- and 10-channels demand because the algorithm searches for a greater number of channels against what is requested to generate an over-assignment. Although this may look as a negative aspect, it is observed that the delay in transmission (figure 3) is reduced,

and there is a significant increase in throughput (figure 6).

The same occurs in the case of failed handoffs (figure 5). It can be observed that for DMA the number of handoffs was relatively superior to the other types of demands, although it was the one that had better throughput for each type of demand and each type of user (see figure 6).

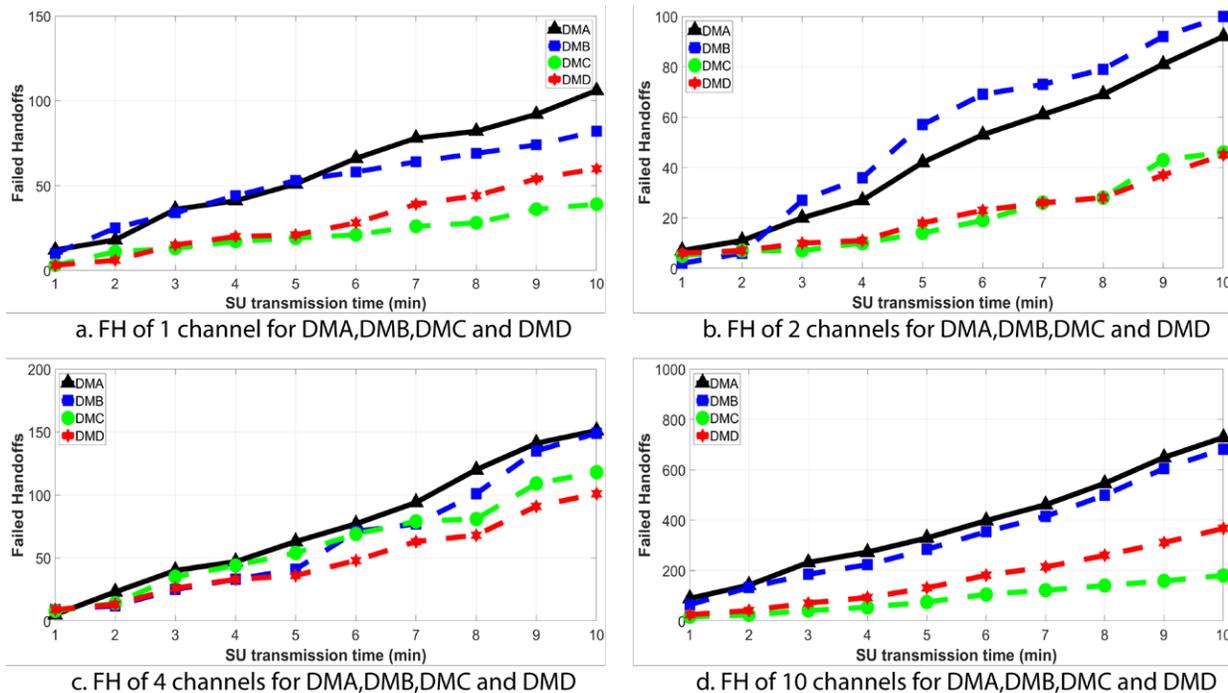


Figure 4. Failed Handoffs in high traffic for DMA, DMB, DMC and DMD

Source: own the author

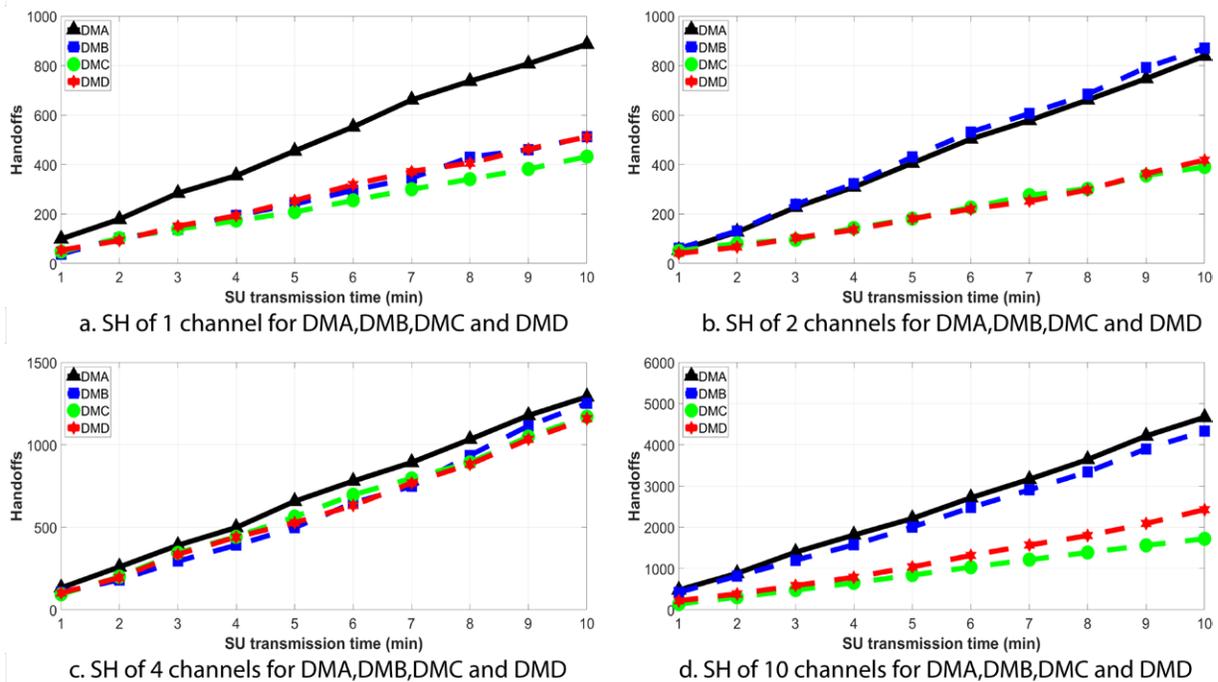


Figure 5. Handoffs in high traffic for DMA, DMB, DMC and DMD

Source: own the author

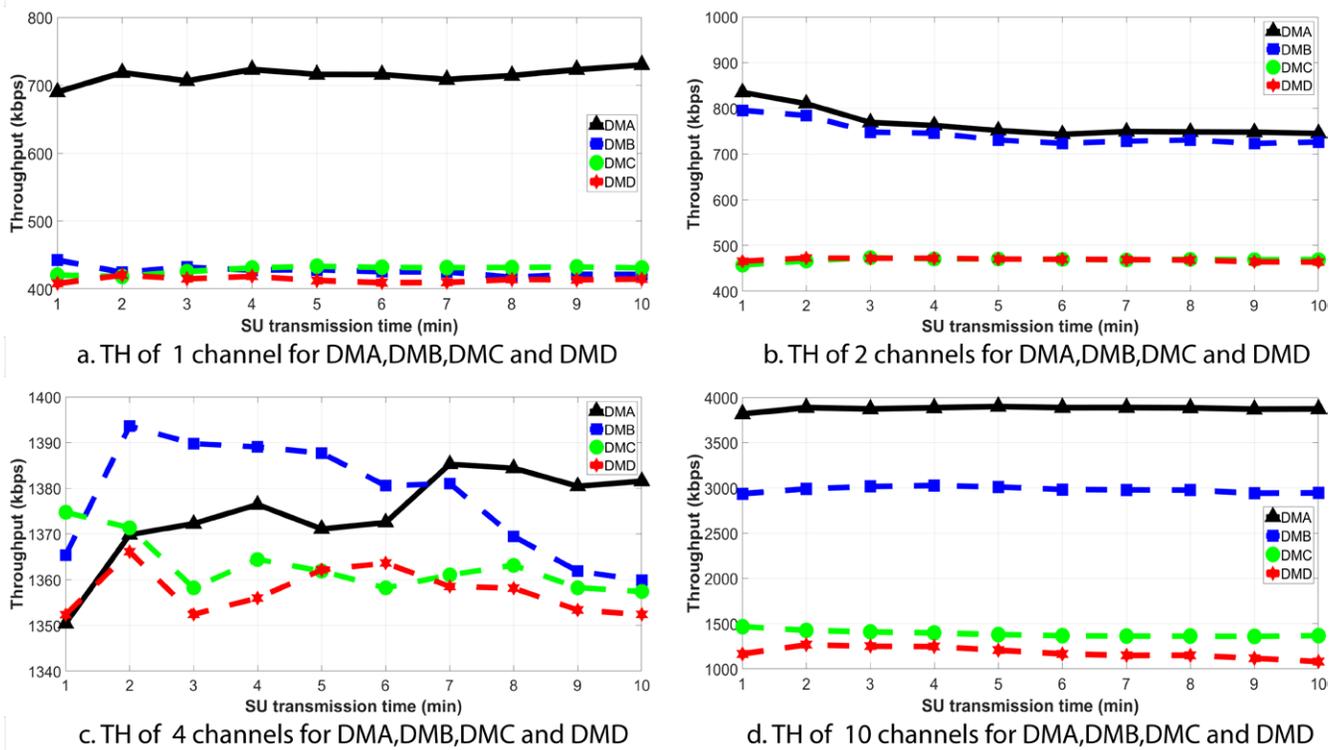


Figure 6. Throughput in high traffic for DMA, DMB, DMC and DMD

Source: own the author

CONCLUSIONES

It is observed that the number of failed handoffs increased in the over-assignment scenarios because the algorithm tries to maintain this over-assignment of channels for the secondary users in the network.

The mean time availability, signal-to-noise ratio and availability probability criteria selected as K-Means grouping criteria were able to generate 2 channel clusters with the best weights that allowed significant throughput for DMA and DMB and also allowed having outstanding performance for DMC and DMD.

In spite of the increasing in the number of handoffs, results show that metrics such as average bandwidth, average throughput and average delay are never negatively impacted by this increasing in the number of handoffs.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to thank Colciencias and the District University Francisco José de Caldas, for the supporting and funding during the course of this research project.

REFERENCES

- Bajali, V., Nagendra, T., Hota, C., & Raghurama, G. (2016). Cooperative spectrum sensing in Cognitive Radio: An Archetypal Clustering approach. *Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)* (pp. 1137-1143). IEEE.
- Chen, C., Wei, X., Jin, Y., & Ge, S. (2013). A Delay Sensitive Time Slots Scheduling in Vehicular Sensor Networks. *Intelligent Networking and Collaborative Systems (INCoS)* (pp. 448-455). IEEE.

- Chen, X., Hou, F., Huang, H., & Jing, X. (2016). Principle component analysis based cooperative spectrum sensing in cognitive radio. *Communications and Information Technologies (ISCIT)* (pp. 602-605). IEEE.
- Hernandez, C., Marquez, H., & Pedraza, L. (2016). Multichannel Allocation Spectrum Model with Fairness Criterion for Cognitive Radio Networks. *Contemporary Engineering Sciences*, 9(31), 1503-1524.
- Hernández, C., Márquez, H. & Pedraza, L. (2017). Modelo de asignación multicanal con equidad para la movilidad espectral en redes de radio cognitiva. Bogotá, Colombia: Editorial UDistrital.
- Hernández, C., Páez, I. & Giral, D. (2017). Modelo adaptativo multivariable de handoff espectral para incrementar el desempeño en redes móviles de radio cognitiva. Bogotá, Colombia: Editorial UDistrital.
- Kang, S., Ryu, J., Lee, J., & Jeong, J. (2011). Analysis of space-time adaptive processing performance using K-means clustering algorithm for normalisation method in non-homogeneity detector process. *IET signal processing*, 113-120.
- Kumar, V., Kandpal, D. C., Jain, M., Gangopadhyay, R., & Debnath, S. (2016). K-mean clustering based cooperative spectrum sensing in generalized κ - μ fading channels. *Communication (NCC), 2016 Twenty Second National Conference*, (pp. 1-5).
- Lu, Y., Zhu, P., Wang, D., & Fattouche, M. (2016). Machine learning techniques with probability vector for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks. *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)* (pp. 1-6). IEEE.
- McLean, R. K., Silvius, M. D., & Hopkinson, K. M. (2013). Method for Evaluating k-Means Clustering for Increased Reliability in Cognitive Radio Networks. *Software Security and Reliability (SERE), 2013 IEEE 7th International Conference* (pp. 99-108). IEEE.
- Moumena, A. (2015). Abnormal behavior detection of jamming signal in the spectrum using a combination of compressive sampling and intelligent bivariate k-means clustering technique in wideband cognitive radio systems. *4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE)* (pp. 1-4). IEEE.
- Nguyen, D. D., Madhukumar, A. S., Tio, S. D., & Ng, B. C. (2010). Cognitive Radios In Cooperative Environment: Detection, Sensing and Clustering of Spectral Bands. *Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall)* (pp. 1-5). IEEE.
- Pandey, R. (2015). Elective Recommendation Support through K-Means Clustering Using R-Tool. *Computational Intelligence and Communication Networks (CICN)* (pp. 851-856). IEEE.
- Ramler, I. P. (2008). *Improved statistical methods for k-means clustering of noisy and directional data*. Proquest.
- Tragos, E. Z., Zeadally, S., Fragkiadakis, A. G., & Siris, V. A. (2013). Spectrum assignment in cognitive radio networks: A comprehensive survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 13(3), 1108-1138.
- Vassilvitskii, S. (2007). *K-Means: algorithms, analyses, experiments*. Stanford University.
- Xu, J., Han, J., & Nie, F. (2016). Discriminatively embedded k-means for multi-view clustering. *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 5356-5364). IEEE.
- Xue, H., & Feifei, G. (2015). A machine learning based spectrum-sensing algorithm using sample covariance matrix. *Communications and Networking in China (ChinaCom), 2015 10th International Conference* (pp. 476-480). IEEE.
- Zhang, S., Hu, J., Bao, Z., & Wu, J. (2013). Prediction of spectrum based on improved RBF neural network in cognitive radio. *International Conference on Wireless Information Networks and Systems (WINSYS)*.





Metodología para el monitoreo estructural y patológico de viviendas afectadas por deslizamientos

Structural and pathological monitoring methodology for homes affected by landslides

Sergio Giovanni Valbuena Porras¹, César Augusto García-Ubaque², Martha Alejandra Granados Soler³

Fecha de recepción: 17 de septiembre de 2016

Fecha de aceptación: 15 de febrero de 2017

Cómo citar: Valbuena P., S.G.; García-Ubaque, C.A. y Granados S., M.A. (2017). Metodología para el monitoreo estructural y patológico de viviendas afectadas por deslizamientos. *Revista Tecnura*, 21(52), 79-87. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.2.a06

Resumen

Contexto: En los últimos sesenta años los procesos de urbanización se han incrementado considerablemente. En gran parte de ellos, el número de habitantes de los denominados *tugurios* asciende a más del 50 % de la población y, adicionalmente, se encuentran localizados en zonas de riesgo.

Objetivo: Determinar y evaluar la progresión mensual del índice de daño (ID) durante un periodo de cuatro meses a un grupo de viviendas ubicado en zona de ladera en el sector Altos de la Estancia en Bogotá, Colombia.

Método: Las viviendas fueron clasificadas de acuerdo con su sistema estructural en seis grupos: mampostería confinada (grupo A), mampostería estructural (grupo B), mampostería no reforzada (grupo C), materiales provisionales (grupo D), pórticos en concreto reforzado (grupo E) y viviendas prefabricadas (grupo F) y se les aplicó la metodología propuesta por el Fondo para la Prevención y Atención de Emergencias (FOPAE).

Resultados: En todos los grupos se observó un incremento constante en el ID; sin embargo, el grupo C presentó los valores más altos en el último muestreo: 2,6 % de las viviendas (ID alto) y 0,87 % (ID muy alto). En los demás grupos el ID observado fue menor y no se encontraron viviendas con registros clasificados como muy altos.

Conclusiones: De acuerdo con los resultados, las viviendas construidas en mampostería no reforzada presentan un mayor grado de deterioro en periodos cortos de tiempo en comparación a aquellas construidas con otros sistemas estructurales.

Palabras clave: deslizamiento, monitoreo estructural, índice de daño, vulnerabilidad, viviendas.

Abstract

Context: In the last sixty years urbanization processes have increased considerably. In many of them, the number of inhabitants of the so-called "slums" amounts to more than 50% of the population. In addition, they are located in areas at risk.

- 1 Ingeniero civil, magíster en Economía. Profesor Asistente Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: svalbuena@udistrital.edu.co
- 2 Ingeniero civil, magíster en Ingeniería Civil, doctor en Ingeniería. Profesor Asociado de la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: cagarciau@udistrital.edu.co
- 3 Tecnóloga en Construcciones Civiles, candidata a Ingeniera Civil. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: mgranados@correo.udistrital.edu.co

Objective: To determine and evaluate the monthly progression of the Damage Index (ID, in Spanish) of a group of houses located in a hillside area in the “Altos de la Estancia” sector in Bogotá, Colombia, during a period of four months.

Method: The houses were classified according to their structural system in six groups: confined masonry (group A); structural masonry (group B); unreinforced masonry (group C); provisional materials (group D); reinforced concrete porches (group E); and prefabricated houses (group F). And we applied the methodology proposed by the Fund for the Prevention and Attention of Emergencies (FOPAE).

Results: There was a constant increase in the ID of all groups. However, group C presented the highest values in the last sampling (2.6% of the households had high ID and 0.87% very high). In the other groups the observed ID was lower and no houses were found with records classified as very high.

Conclusions: According to the results, dwellings built in unreinforced masonry show a greater degree of deterioration in short periods of time compared to those constructed with other structural systems.

Keywords: sliding, structural monitoring, damage index, vulnerability, houses.

INTRODUCCIÓN

En los últimos sesenta años el proceso de urbanización, tanto en América Latina como en el resto del mundo, se ha incrementado considerablemente, de tal manera que más de la mitad de la población total del planeta, es decir aproximadamente 3300 millones de individuos, viven en áreas urbanas y se espera que esta cifra ascienda a 6000 millones para el 2050 (United Nations 2014). En gran parte de estos centros urbanos, particularmente en aquellos que pertenecen a los países en vías de desarrollo, el número de habitantes de los denominados *tugurios* asciende a más del 50 % de la población. En la mayoría de casos, estos carecen del acceso a vivienda, agua y saneamiento, educación o servicios de salud y se encuentran en zonas de riesgo. Comprender esta situación implica, en primera instancia, entender la urbanización como un proceso social e histórico, en el cual las condiciones espacio-temporales propias de cada zona, han traído consigo no solo cambios demográficos y territoriales sino transformaciones en las prácticas sociales y en la manera como los individuos significan los lugares.

En Colombia, si bien hacia la primera mitad del siglo XX la mayoría de la población del país vivía en zonas rurales, la llegada de la idea de la

modernidad que se encontró estrechamente asociada a los ambientes urbanos junto con la construcción de imaginarios sociales –desde los cuales se generó un anhelo por la inserción del país a las sociedades más adelantadas– y la ola de violencia que azotó las zonas rurales durante la segunda mitad del siglo fueron factores determinantes que suscitaron el desarrollo de fuertes corrientes migratorias masivas del campo a la ciudad, las cuales acarrearón importantes modificaciones en los centros urbanos (De la Cueva 1993). Este panorama no ha sido ajeno a la ciudad de Bogotá, la cual al configurarse como capital, se ha convertido en la mayor receptora de población migrante (Bolívar y Erazo, 2013), situación que se evidencia en la diseminación de numerosos asentamientos humanos que en muchos casos se localizan en zonas expuestas a riesgos por inestabilidad de los terrenos, inundaciones, mala disposición de residuos, entre otros (Lattes 2000; Charvériat 2000).

Como ejemplo de lo anterior se encuentra el sector Altos de la Estancia, ubicado en los cerros suroccidentales del Distrito Capital, en la localidad de Ciudad Bolívar. Esta zona era una extensa área rural en la que predominaba el bosque nativo hasta mediados del siglo XX. Sin embargo, fue deforestada para el desarrollo de actividades agrícolas y ganaderas. Desde comienzos de la década

de 1990 experimentó el inicio e intensificación de un proceso de urbanización, caracterizado por la presencia de viviendas que carecían de cualquier tipo de parámetro técnico constructivo, sumado a la ausencia de obras de urbanismo mínimas como redes de acueducto y alcantarillado. Esta situación dio paso a la aparición de vertimientos de aguas servidas y fugas de agua potable que, junto al auge de la explotación minera, desestabilizaron la ladera (Rojas 2004).

En agosto de 1997 se registró el primer movimiento de tierra en esta zona, el cual demandó la reubicación de dos familias, la intervención de la quebrada la Carbonera y la regulación de la actividad minera. No obstante, y a pesar de las medidas tomadas, la inestabilidad del cerro continuaba, ocasionando los dos eventos de mayor magnitud que han sido registrados en esta zona: el primero, en abril del año 2000, el cual afectó a 567 viviendas y causó la declaración de esta área como *zona de alto riesgo*; y el segundo, ocurrido en mayo de 2002, y que formó una grieta de 30 metros, averiando 804 casas (Fopae, 2014). Dichos deslizamientos que se enmarcan entre los cuerpos hídricos La Carbonera, Santo Domingo y Santa Rita, se encuentran activos, son de tipo compuesto, complejo y múltiple, con un área de afectación directa aproximada de 73,17 hectáreas.

Debido al impacto en la población y al riesgo que implica la localización de viviendas en zonas de riesgo a nivel mundial, se han elaborado una serie de instrumentos y metodologías para la investigación, seguimiento y monitoreo de las amenazas. Entre estos destacan las normas australianas (AGS, 2007) y europea (JTC-1 2008). Por su parte, Schuster y Kockelman (1966) proponen una serie de principios generales y metodologías enfocados en la reducción de amenazas de deslizamiento utilizando sistemas de prevención, los cuales demandan tanto la participación de los entes gubernamentales como de las comunidades. No obstante, en muchos casos la eliminación total de los problemas no es posible mediante métodos preventivos, sino que requiere establecer

medidas de control y monitoreo (Suárez, 1998). En Colombia se han desarrollado varios trabajos de tipo metodológico para la evaluación y el control de riesgo por deslizamiento, entre los cuales se pueden mencionar los de la Dirección de Prevención y Atención de Emergencias (2000); Ojeda, Castro, Valencia y Fonseca (2002); Ingeocim (1998), y Yamin, Ghesquiere, Cardona y Ordaz, (2013), incluidos en la *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa* (Ávila et al., 2015).

Para el caso de Altos de la Estancia, debido a que actualmente existen viviendas localizadas en inmediaciones de una zona catalogada como de alto riesgo no mitigable, se pretendió estimar la vulnerabilidad física de las construcciones, determinando si esta se debe a la exposición al fenómeno amenazante, o si por el contrario se encuentra más relacionada con deficiencias en las estructuras físicas, es decir los materiales, procesos constructivos y cumplimiento de normas. Así, pues, se realizó el monitoreo estructural de acuerdo con la metodología propuesta por la empresa Consultores en Ingeniería y Medio Ambiente CI Ambiental SAS, la cual a su vez se encuentra soportada en la metodología propuesta por el Consorcio Altos de la Estancia. Este instrumento incluye un proceso de caracterización inicial de las viviendas, seguido por una valoración periódica del daño estructural que busca determinar los cambios en ID. Este índice permite evaluar la progresión de las lesiones estructurales encontradas, con el objetivo de poder determinar las acciones que deben adoptarse en cada una de ellas.

De acuerdo con la información previa es necesario determinar si las construcciones localizadas en esta área están más expuestas al daño físico, por lo que estas construcciones presentarían un ID más alto que el usual. El objetivo de este estudio es identificar y analizar los cambios físicos que pueden haber sido experimentados por las edificaciones, con relación a la variación del ID y sus posibles causas.

Zona de estudio

Las campañas de monitoreo y seguimiento estructural se realizaron en 484 edificaciones localizadas en los barrios Santa Viviana, Santo Domingo, El Espino I, El Espino, Ismael Perdomo, Mirador de la Estancia, Perdomo Alto y Sierra Morena, ubicados en la zona periférica del polígono denominada “Altos de la Estancia”, en la ciudad de Bogotá. Cada vivienda se inspeccionó de manera individual. Para el análisis e identificación de estas se buscó el Código Homologado de Identificación Predial CHIP correspondiente a cada predio, suministrado por el Catastro Nacional.

METODOLOGÍA

Caracterización de viviendas

Con el fin de facilitar la clasificación de las viviendas presentes en la zona de estudio, se recopiló la siguiente información:

- Información general de la construcción: dirección y localización, el código CHIP y algunos datos de los residentes.
- Características de la edificación, de acuerdo con las siguientes variables:

Sistema estructural

1. Sistema de pórticos.
2. Mampostería estructural.
3. Mampostería confinada.
4. Mampostería no reforzada.
5. Prefabricado.
6. Materiales no convencionales: cualquier tipo de sistema que emplee materiales y configuraciones que no se encuentre dentro de los anteriores.

Calidad de la construcción: se refiere al nivel de cumplimiento de las especificaciones técnicas mínimas de construcción: buena, regular, mala.

Altura de la edificación: número de niveles presentes.

Las viviendas fueron clasificadas en seis grupos, según los siguientes parámetros: grupo A: viviendas con mampostería confinada, grupo B: viviendas con mampostería estructural, grupo C: viviendas con mampostería no reforzada (simple), grupo D: materiales provisionales, grupo E: pórticos en concreto reforzado y grupo F: viviendas prefabricadas.

Evaluación del índice de daño (ID)

Las viviendas seleccionadas fueron inspeccionadas visualmente en campo. Para facilitar la recolección y el registro de los datos obtenidos, se estructuró el “Formato de evaluación del índice de daño de viviendas” (figura 1), el cual se utilizó para evaluar de forma rutinaria y progresiva el estado en que se encontraban las viviendas mediante la observación detallada, con prolongaciones de tiempo mensuales durante un periodo de cuatro meses.

Este formato incluye tres bloques de información:

1. Identificación de la vivienda y generalidades: información necesaria para identificar a qué vivienda pertenece el formato y facilitar su búsqueda.
2. Índice de daño de la vivienda: para el cálculo del índice de daño se recurre al método heurístico, que permite combinar lo cualitativo con lo cuantitativo. De este modo, se definieron las siguientes variables para calcular la vulnerabilidad estructural de las viviendas:
 - a. Condición o estado de la edificación: en la inspección visual se califica de manera cualitativa la condición en la que se encuentran cuatro elementos de las edificaciones: la cimentación, los muros, el entrepiso y la cubierta. Esta calificación se debe hacer según los criterios presentados en la tabla 1, en una escala de bueno, regular y malo. A esta apreciación se le asigna un valor numérico definido según su incidencia en la edificación.

A. IDENTIFICACIÓN DE LA VIVIENDA Y GENERALIDADES					
DIRECCIÓN:	Cll 64 D 76C 26	No y Fecha Evaluación	2/07/2014	No:	2
LOCALIDAD:	CIUDAD BOLIVAR	BARRIO	ESPINO I	MZ: 65 PD: 2	CHIP: AAA0171PFMR
B. INDICE DE DAÑO DE LA VIVIENDA (metodología Consorcio Altos de la Estancia 2009)					
Evaluación de la Amenaza			Evaluación Condición Estructural		
Criterios	Nivel	Criterios	Condición	Daño	
Levantamientos y/o Hundimientos	2 Leve	Cimentación	Buena	1 Ninguno	
Presencia de agua en alrededores	2 Leve	Muros	Regular	2 Leve	
Fisuras o separación terreno - Cimentació	1 Ninguno	Entrepiso	N/A	N/A	
Fisuras o grietas en andén en el entorno	1 Ninguno	Cubierta	Regular	2 Leve	
INDICE DE DAÑO DE LA VIVIENDA			1,99	Media	1,99
C. REGISTRO FOTOGRAFICO					
 <p>FOTO DE LA FACHADA DE LA VIVIENDA</p>		 <p>El piso (contra piso) hecho en tablones donde se logra ver parte del sótano.</p>			
 <p>Bajada y/o entrada al sótano.</p>		 <p>Se observa la cimentación de la vivienda, (captada desde la vivienda vecina). Se ve en buen estado.</p>			
D. EVALUADOR :		nrcifuentesr@correo.udistrital.edu.co			

Figura 1. Formato de evaluación del índice de daño de viviendas

Fuente: elaboración propia.

Tabla 1. Criterios de evaluación del primer factor

Condición Inicial	Primer factor (F1)
Buena	1
Regular	1,05
Mala	1,1

Fuente: elaboración propia.

En caso de que el elemento no pueda ser evaluado, se califica como N/A (no aplica) y como valor de ponderación de 1,1.

b. Daño estructural

Se califica el daño presente en los elementos estructurales evaluados anteriormente, utilizando igualmente una calificación cualitativa, asociada a un criterio y a una ponderación, como se presenta en la tabla 2.

Tabla 2. Criterios para estimar la magnitud del daño

Magnitud del daño	Magnitud del daño (D)
Si no existe daño	1
Si el daño es leve	2
Si el daño es moderado	3
Si el daño es fuerte	4
Si el daño es severo	6

Fuente: elaboración propia.

Como elementos de control y medición se realizó la colocación de testigos (portaobjetos) en las grietas de alguna de las viviendas, con el fin de medir el avance de estas, y la dirección de movimiento en términos de agrietamiento e incrementos, y dirección de estos.

3. Registro fotográfico: con el fin de llevar un registro visual del estado de las viviendas, se llevó un recuento fotográfico detallado y concordante de cada una durante las cuatro visitas.

Calculó del índice de daño (ID)

El ID se obtiene a partir de los de los ponderados de las calificaciones de los daños, afectados por el factor de mayoración de la condición de cada elemento, mediante el siguiente procedimiento:

1. Se define un primer factor (F1), que es igual al valor numérico asociado a la evaluación de la condición de cada elemento estructural (tabla 1).
2. Se calcula un segundo factor para la cimentación (Fc2), los muros (Fm2), el entrepiso (Fe2), la cubierta (Fcu2) (ecuación (1)).

$$F2 = F1 * D \quad (1)$$
3. Se calcula un tercer factor (F3), de acuerdo con la cantidad de pisos que tiene la vivienda
 - a. Si el número de pisos es mayor que 1 (ecuación (2)).

$$F3 = (0,6 * Fe2) + (0,4 * Fcu). \quad (2)$$
 - b. Si el número de pisos es 1 (ecuación (3)).

$$F3 = (Fcu2). \quad (3)$$
 - c. Se calcula el ID que presenta la vivienda usando la siguiente fórmula (ecuación (4)).

$$ID = (0,1 * Fc2) + (0,5 * Fm2) + (0,4 * F3) \quad (4)$$

Por último, se determina dentro de cuál de los siguientes rangos de la tabla 3 se encuentra el ID y obtener un valor cualitativo de la vulnerabilidad de cada vivienda.

Tabla 3. Rango del índice de daño (ID)

Rango del índice de daño (ID)	Vulnerabilidad
$ID < 1$	Muy baja
$1 \geq ID < 2$	Baja
$2 \geq ID < 3$	Media
$3 \geq ID < 4$	Alta
$4 \geq ID < 5$	Muy alta

Fuente: elaboración propia.

RESULTADOS

De las 484 viviendas inspeccionadas, 158 (32,64 %) se incluyeron en el grupo A; 1 (0,21 %) en el grupo B; 231 (47,73 %) en el grupo C; 8 (1,65 %) en el grupo D; 53 (10,95 %) en el grupo E, y 33 (6,82 %) en el grupo F. Del total de viviendas, durante la primera evaluación se encontraron 452 con vulnerabilidad baja (93,39%), 26 con vulnerabilidad media (5,37%) y 6 con vulnerabilidad alta (1,24%). Al final del estudio se observó que la vulnerabilidad fue baja en 386 viviendas (79,75 %), media para 80 (16,53 %), alta para 15, muy alta para 16 (3,51 %) y muy alta para 2 (0,41 %). En la tabla 4, se muestra progresión de la vulnerabilidad durante el periodo evaluado.

Con relación a los sistemas estructurales, inicialmente en el grupo A se observó que 150 viviendas (94,94 %) presentaron vulnerabilidad

Tabla 4. Progresión del índice de daño en las viviendas evaluadas

Campaña	Índice de daño (ID)			
	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
1	452	26	6	
2	432	43	9	
3	415	57	11	1
4	386	80	16	2

Fuente: elaboración propia.

baja; 7 (4,43 %), media, y 1 (0,63 %), alta. En el grupo B, 1 vivienda (100 %) presentó vulnerabilidad baja. En el grupo C, 211 (91,34 %) presentaron vulnerabilidad baja; 17 (7,36 %), media, y 3 (1,30%), alta. En el grupo D,

7 (87,50 %), presentaron vulnerabilidad baja y 1 (12,50 %), alta. En el grupo E, 52 (98,11 %) presentaron vulnerabilidad baja y 1 (1,89 %), media. Por último, en el grupo E, 31 (93,94 %) presentaron vulnerabilidad baja; 1 (3,03 %), media, y 1 (3,03 %), alta. Al final del estudio, en el grupo A, 131 (82,91 %) viviendas presentaron vulnerabilidad baja; 24 (15,19 %), media, y 3 (1,90 %), alta. En el grupo B, 1 (100 %) vivienda presentó vulnerabilidad media. En el grupo C, 178 (77,06 %) presentaron vulnerabilidad baja; 45 (19,48 %), media; 6 (2,60 %), alta, y 2 (0,87 %), muy alta. En el grupo D, 6 (75 %) viviendas presentaron vulnerabilidad baja y 2 (25 %), alta. En el grupo E, 47 (88,68 %) presentaron vulnerabilidad baja y 5 (9,43 %),

media y 1 (1,89 %), alta. Por último, en el grupo F, 24 (72,73 %) viviendas presentaron vulnerabilidad baja; 5 (15,15 %), media, y 4 (12,12 %), alta. En la tabla 5 se puede observar la evolución de la vulnerabilidad por grupo durante el periodo evaluado.

Para el caso del grupo A, las viviendas con vulnerabilidad baja decrecieron en un 3,93 % en los cuatro meses del estudio; en los grupos B y D este decrecimiento fue del 0,21 %; en el C (en donde se registró la mayor variación) fue de un 6,82 %; en el grupo E fue de 1,03 %, y en el F, de 4,45 %. Por su parte, la vulnerabilidad media y alta aumentó en cuatro de los grupos: para el A, en un 3,51 % y un 0,41 %; para el grupo C, en un 5,79 % y un 0,62 %; para el grupo E, en un 0,83 % y un 0,21 %, y para el grupo F, en un 0,83 % y un 0,62 %. En el caso del grupo B, el aumento solo fue en la vulnerabilidad media con un 0,21 % y el grupo D en la vulnerabilidad alta con un 0,21 %.

Tabla 5. Evolución del índice de daño (ID) durante el periodo evaluado

Campaña	1			2			3				4			
	B	M	A	B	M	A	B	M	A	MA	B	M	A	MA
Grupo A	151	7	0	141	17	0	137	20	1	0	131	24	3	0
Grupo B	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
Grupo C	211	17	3	204	24	3	195	31	4	1	178	45	6	2
Grupo D	7	0	1	6		2	6		2	0	6	0	2	0
Grupo E	52	1		52	1		50	3	0	0	24	5	4	0
Grupo F	31	1	1	28	1	4	27	2	4	0	24	5	4	0
Total general	435	26	5	432	43	9	415	57	11	1	386	80	16	2

B = baja; M = media; A = alta; MA = muy alta.

Fuente: elaboración propia.

DISCUSIÓN

Mediante este estudio se quiso realizar una inspección preliminar de las viviendas en cuanto a los elementos que configuran su estructura, con miras a determinar las afectaciones encontradas en estas y establecer un proceso de seguimiento para dichas lesiones. De este modo, fue posible obtener un diagnóstico mediante el cual se evaluaron los inmuebles en función de su índice de daño y se clasificaron según su sistema estructural. Este parámetro fue escogido como categoría de agrupación, debido a que el número de pisos estaba implícito en el cálculo del ID, y no se tuvo en cuenta la calidad de la construcción debido que la evaluación de la misma depende considerablemente de la percepción del evaluador y la metodología no define unos criterios unificados para la calificación cualitativa de la misma.

No obstante, la aplicación de esta metodología se vio limitada debido a que, por tratarse de asentamientos informales que no han seguido ningún patrón de planificación, estos modelos de autoconstrucción en su mayoría carecen tanto de un diseño arquitectónico como estructural, a lo que se suma la incorporación de materiales de distinta índole como madera, tejas, latas, lonas, piezas de demolición, entre otros; factores que no son considerados dentro de los criterios de evaluación establecidos en la metodología. Por otro lado, en gran parte de los predios que debían ser inspeccionados no fue posible acceder debido a las negativas de sus propietarios, situación que suscita que en estos casos la evaluación se llevara a cabo solo de manera exterior.

CONCLUSIONES

Es importante señalar que, en el diseño de metodologías para la caracterización y evaluación de viviendas, debe reconocerse la existencia de una serie de prácticas constructivas que difieren en muchos aspectos de las construcciones formales, dando lugar a que sea necesario incluir otra

serie de variables en la formulación de aquellas, en cuanto a la incorporación de los elementos que caracterizan los contextos espacio-temporales de estos inmuebles y desde los cuales se puede explicar su morfología.

Esta evaluación de daño, en principio, se le adjudica a la falla, pero no se puede desconocer la influencia de las prácticas constructivas; por consiguiente, en instrumentos futuros se deben considerar indicadores que permitan incorporar y evaluar de manera adecuada estos factores.

REFERENCIAS

- Australian Geomechanics Society (AGS) (2007). Guidelines for Landslide Susceptibility, Hazard and Risk Zoning for Land Use Planning. *Aust Geomech*, 42(1), 13-36. doi:10.1016/j.enggeo.2008.03.022.
- Ávila, G.E.; Cubillos, C.E.; Granados, A.E.; Medina, E.; Rodríguez, E.; Rodríguez, C.E. y Ruiz, G.L. (2015). *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa del Servicio Geológico Colombiano*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Bolívar, T. y Erazo, J. (2013). Los lugares del hábitat y la inclusión. Recuperado de: <http://www2.sgc.gov.co/Noticias/archivos/Guia-Metodologica-Servicio-Geologico.aspx>
- Charvériat, C. (2000). *Natural disasters in Latin America and the Caribbean: An overview of risk*. Recuperado de: http://www.econstor.eu/bitstream/10419/88044/1/idb-wp_434.pdf.
- Clark, D. (1998). Interdependent Urbanization in an Urban World: An Historical Overview. *The Geographical Journal*, 164(1), 85-95. doi:10.2307/3060547. The Royal Geographical Society (with the Institute of British Geographers).
- Ayala, J. (2014) Monitoreo de viviendas ubicadas en la zona de Altos de la Estancia en la localidad de Ciudad Bolívar. Tesis de Grado Tecnología en Construcciones Civiles, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.
- De la Cueva, A.A. (1993). Los asentamientos populares y el orden jurídico en la urbanización periférica

- de América Latina. *Revista Mexicana de Sociología*, 55(3), 133. doi:10.2307/3540926.
- Dirección de Prevención y Atención de Emergencias del Distrito (DPAE) (2000). *Términos de referencia para estudios de riesgos por inestabilidad del terreno*. Bogotá.
- Fondo de Atención y Prevención de Emergencias (Fopae) (2014). *Lo que la tierra se llevó. Altos de La Estancia: sueños de vida digna*. Bogotá.
- Frisbie, P. (1975). The Human Consequences of Urbanisation: Divergent Paths in the Urban Experience of the Twentieth Century. *American Journal of Sociology*, 80(4), 1022–1024. doi:10.2307/2777217. The University of Chicago Press.
- Ingeocim Ltda. (1998). *Zonificación por inestabilidad del terreno para diferentes localidades en la ciudad de Santafé de Bogotá*. Bogotá.
- Joint Technical Committee (JTC-1) (2008). Guidelines for Landslide Susceptibility, Hazard and Risk Zoning for Land Use Planning. *Engineering Geology*, 102, 85-98. -doi:10.1016/j.enggeo.2008.03.009.
- Lattes, A. (2001). Población urbana y urbanización en América Latina, en Carrión F. (Ed.), *La ciudad construida, urbanismo en América Latina* (pp. 49-76). Quito, Ecuador: FLACSO Ecuador-Junta de Andalucía.
- Ojeda, J.; Castro, E.; Valencia, A. y Fonseca, S. (2002). Evaluación del riesgo por fenómenos de remoción en masa: guía metodológica. Bogotá: Ingeominas, Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Rojas, Z.C. (2004). *Sin memoria muero: memorias de un proceso de resistencia: Altos de la Estancia, Ciudad Bolívar 2004*. Bogotá.
- Schuster, R.L. y Kockelman, W.J. (1966). Principles of Landslide Hazard Reduction. En: A.K. Turner y L.R. Schuster (eds.). *Landslides Investigation and Mitigation, Special Report 247* (pp. 91-105). Washington, EE. UU.: National Research Council, Transportation Research Board.
- Suárez D., J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Bucaramanga: Ingeniería de Suelos Ltda.
- United Nations (2014). *World Urbanization Prospects, the 2014 Revision*. Nueva York: Department of Economic and Social Affairs. doi:10.4054/DemRes.2005.12.9.
- Yamin, L.E.; Ghesquiere, F.; Cardona, O.D. y Ordaz, M.G. (2013). *Modelación probabilista para la gestión del riesgo de desastres: el caso de Bogotá, Colombia*. Washington DC: World Bank, Universidad de los Andes. Recuperado de: <http://documents.worldbank.org/curated/en/2013/07/18100020/columbia-probabilistic-modeling-disaster-risk-management-modelacion-probabilista-para-la-gestion-del-riesgo-de-desastre>.





Aplicación de modelo ARIMA para el análisis de series de volúmenes anuales en el río Magdalena

Applying ARIMA model for annual volume time series of the Magdalena River

Gloria Amaris¹, Humberto Ávila², Thomas Guerrero³

Fecha de recepción: 29 de agosto de 2016

Fecha de aceptación: 15 de febrero de 2017

Cómo citar: Amaris, G.; Ávila, H. y Guerrero, T. (2017). Aplicación de modelo ARIMA para el análisis de series de volúmenes anuales en el río Magdalena. *Revista Tecnura*, 21(52), 88-101. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.2.a07

Resumen

Contexto: Los efectos del cambio climático, intervenciones humanas y características de los ríos, son factores que incrementan el riesgo en la población y de los recursos hídricos. Sin embargo, impactos negativos como inundaciones y desecación de ríos pueden ser identificados previamente mediante el uso de herramientas de modelación adecuadas.

Objetivos: Se estima un modelo ARIMA para el análisis de series de tiempo de volúmenes anuales (millones de m³/año) en el río Magdalena usando registros de la estación Calamar (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia–Ideam), buscando la compatibilidad entre la hipótesis de modelación y los datos observados en el río.

Métodos: El modelo ARIMA es considerado uno de los enfoques más implementados en hidrología y estudios relacionados con variabilidad climática dado que considera registros no estacionarios.

Resultados: El pronóstico de volumen máximo del río Magdalena para los años 2013 a 2024 oscila

entre 289.695 millones de m³ y 309.847 millones de m³. El pronóstico de volumen mínimo para los años de 2013 a 2024 oscila entre 179.123 millones de m³ y 157.764 millones de m³ con una tendencia de decrecimiento de 106 millones de m³ en 100 años.

Conclusiones: Los resultados de la simulación con el modelo ARIMA, comparados con los datos observados, muestran un ajuste adecuado de los valores mínimos y máximos. Esto permite concluir que, aunque estos modelos no simulan el comportamiento exacto en el tiempo, son una buena herramienta para aproximar eventos mínimos y máximos.

Palabras clave: modelo estadístico, modelo auto regresivo, serie de tiempo.

Abstract

Context: Climate change effects, human interventions, and river characteristics are factors that increase the risk on the population and the water resources. However, negative impacts such as flooding, and river droughts may be previously identified using appropriate numerical tools.

- 1 Ingeniera civil, magíster en Ingeniería Civil, estudiante Doctorado en Ciencias de la Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile. Departamento de Hidráulica y Ambiental. Santiago de Chile. Contacto: geamaris@uc.cl
- 2 Ingeniero civil, especialista en ríos y costas, magíster en Recursos Hídricos, magíster en Estadística, doctor en Recursos Hídricos. Docente de la Universidad del Norte, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Barranquilla, Colombia. Contacto: havila@uninorte.edu.co
- 3 Ingeniero civil, magíster en Ingeniería Civil, docente asistente de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña. Ocaña, Norte de Santander, Colombia. Contacto: teguerrero@ufps.edu.co

Objectives: The annual volume (Millions of m³/year) time series of the Magdalena River was analyzed by an ARIMA model, using the historical time series of the Calamar station (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia- IDEAM), and looking for matching the modelling hypothesis with the data measured in the river.

Methods: The ARIMA model is considered one of the most implemented approaches in hydrology and studies related to climatic variability because it considers non-stationary information.

Results: The maximum volume forecasted of the Magdalena River from 2013 to 2024 oscillates between 289,695 million m³ and 309,847 million m³.

The minimum volume forecast for the same period ranges from 179,123 million m³ to 157,764 million m³, with a decreasing trend of 106 million m³ in 100 years.

Conclusions: The simulated results obtained with the ARIMA model compared to the observed data showed a fairly good adjustment of the minimum and maximum magnitudes. This allows concluding that it is a good tool for estimating minimum and maximum volumes, even though this model is not capable of simulating the exact behaviour of an annual volume time series.

Keywords: statistical model, autoregressive model, time series.

INTRODUCCIÓN

Los efectos del cambio climático, las intervenciones humanas (García y Baena, 2015) y la configuración del canal (Pinilla, Pérez y Benito, 1995) son factores que afectan la hidráulica de los ríos y alteran el equilibrio de la dinámica fluvial mediante variaciones en su morfología, lo cual trasciende a grandes distancias, tanto aguas arriba como aguas abajo de la zona de intervención. Los cambios del régimen hidrológico pueden generar un aumento en el caudal del río o desecamiento en las riveras (Lehner, *et al.*, 2006), lo cual conlleva a impactos negativos en la población, a incrementos en la vulnerabilidad de los recursos hídricos (Ideam, 2001), además de la afectación al funcionamiento y operación de infraestructura hídrica existente y en las prácticas de gestión de recursos hídricos (IPCC, 2007).

Herramientas de modelación y predicción mediante series temporales han sido de gran utilidad para diversas áreas de investigación como: economía (Ocampo, Cabrera y Ruiz, 2006), tecnología (Vargas, Hernández y Aponte, 2012), ingeniería eléctrica (Velásquez, Dyner y Souza, 2008) e ingeniería de los recursos hídricos (Calle, Angarita y Rivera, 2010), demostrando que existe un

comportamiento tendencial de las variables de diversas disciplinas que pueden relacionarse al contar con un registro histórico en una escala definida en el tiempo. Los pronósticos mediante series temporales demuestran la aplicabilidad de modelos de estimación de pronósticos de volumen, caudales o niveles a corto plazo (Pabón, 1997). Los pronósticos mediante estos análisis requieren que los objetivos sean orientados a identificar o prever los efectos generados por variación del comportamiento de los recursos hídricos ligados a la consistencia, veracidad y calidad de la información recopilada.

Las metodologías empleadas para este fin se basan principalmente en identificar, estimar y diagnosticar modelos de series temporales. Las técnicas estadísticas son implementadas en el pronóstico climático a niveles regionales y nacionales (Organización Meteorológica Mundial, 2003), las cuales incluyen análisis de esquemas generales de ciclos atmosféricos, series de tiempo, correlación, regresiones y análisis de variación climática. Entre los modelos de pronóstico más usados que consideran la relación del comportamiento de variables en el tiempo se destacan tres: i) los de regresión lineal simple y múltiple, los cuales describen tendencias lineales para pronóstico partiendo de

variables explicativas; ii) los de series de tiempo, que capturan la aleatoriedad de la demanda a partir del comportamiento histórico identificando patrones elementales de la demanda (Krajewski, Ritzman y Malhotra, 2008), y iii) la técnica de Box y Jenkins (1970), en donde se establece que los datos temporales de una serie indican las características de su estructura probabilística (De Arce y Mahía, 2003).

Teniendo en cuenta la importancia de los análisis de los esquemas que definen los registros históricos, se abordó en esta investigación la temática de modelación y pronóstico. Se evaluaron los registros históricos de volumen del río Magdalena (Colombia) desde 1967 hasta 2015, de la estación Calamar (K+115). Para ello, se elaboró un modelo estadístico para representar apropiadamente la procedencia de la serie de tiempo y, de esta manera, validar que las hipótesis utilizadas en el modelo revelan la compatibilidad con la muestra observada del río, basada en la representación de la evolución de la serie, permitiendo realizar un pronóstico a corto plazo por medio de simulación.

METODOLOGÍA

Existen diversos modelos de series de tiempo (Hildebrand, 1998; Chatfield, 2003; Guerrero, 2003; Bowerman, 2009). Sin embargo, se destaca el modelo ARIMA por su simplicidad y practicidad en la modelación y pronóstico. Este modelo es considerado el enfoque más implementado en hidrología y estudios relacionados con variabilidad climática debido a que considera registros de datos no estacionarios (con tendencia). El modelo ARIMA consiste en la combinación de un término autorregresivo (AR) y un término de promedio móvil (MA) con un elemento diferenciador dado por la letra I basado en un estudio realizado por Yaglom (1955). En general estos modelos se referencian con la palabra ARIMA (p,d,q). Donde (p) se refiere al orden del modelo autorregresivo; (d), al término de diferenciación, y (q), al término de media móvil con

q términos de error. La estructura general de estos modelos $\{Y_t: t \in T\}$ tiene la forma de un ARMA como se muestra en la ecuación (1).

$$Y_t = \phi_1 Y_{t-1} + \dots + \phi_p Y_{t-p} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (1)$$

Donde ϕ corresponde al coeficiente autorregresivo a determinar, θ coeficiente de media móvil a determinar, ε término de error y Y_{t-p} es el registro normalizado de la serie a modelar. Para el término del diferencial se debe considerar una evaluación del orden. Los diferenciales pueden ser de primer o segundo orden, siguiendo la forma mostrada en las ecuaciones (2) y (3) respectivamente.

$$W_t = Y_t - Y_{t1} \quad (2)$$

$$W_t^{(2)} = W_t^{(1)} - W_{t-1}^{(1)}$$

$$W_t = (Y_t - Y_{t-1}) - (Y_{t-1} - Y_{t-2}) \quad (3)$$

$$W_t = Y_t - 2Y_{t-1} + Y_{t-2}$$

$$Z_t = \frac{W_t - \bar{W}}{S_w} \quad (4)$$

Donde W_t es el término diferenciador, Y_t se refiere al registro de la serie normalizado en el tiempo t , el término Z_t se refiere al dato del registro estandarizado en el tiempo t y se obtiene de la ecuación (4), promedio de los registros diferenciados, S_w desviación estándar del registro diferenciado. La metodología de determinación de un ARIMA se muestra en la figura 1.

Para el objeto central de este análisis se llevó a cabo un proceso metodológico que consiste en un análisis preliminar para la determinación de la tendencia de la serie de tiempo anual. Diagnóstico considerando la función de autocorrelación (ACF) y la función de autocorrelación parcial (PACF). Selección del modelo considerando los criterios de información de Akaike (AIC), criterio de Schwarz (SBIC), el error porcentual absoluto medio (MAPE), y criterio de error cuadrático medio (ECM). Ajuste del modelo mediante verificación

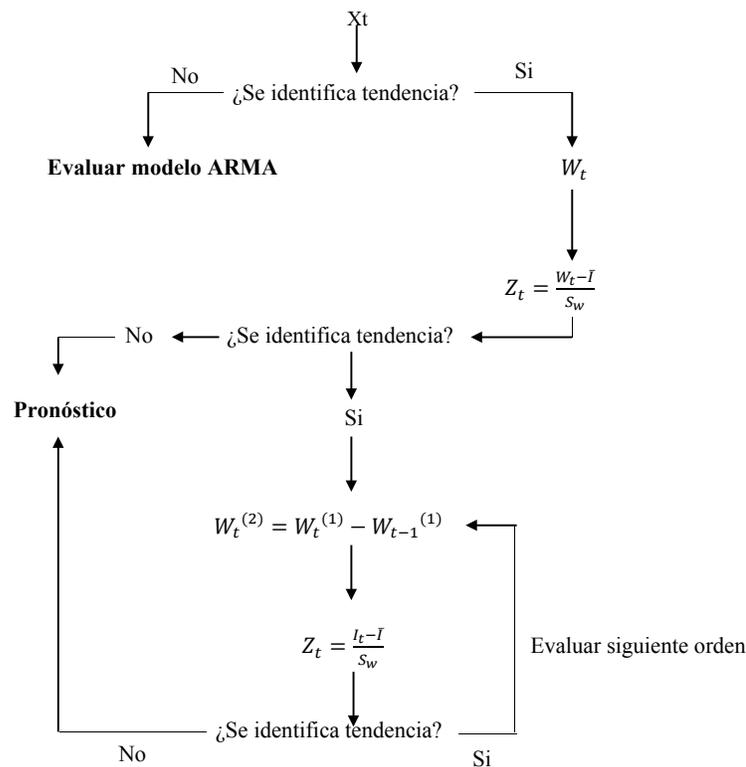


Figura 1. Diagrama de flujo modelo ARIMA

Fuente: elaboración propia.

del comportamiento de los residuos de la serie diferenciada. Simulación de datos y, por último, generación de una serie sintética. Cabe resaltar que en la presente investigación se busca un enfoque de aproximación a una realidad la cual es reconocida como compleja y por tanto no se espera un ajuste exacto.

RESULTADOS

Análisis preliminar para la estimación del modelo

A partir de los registros históricos de volumen anual del río Magdalena, se realizó un análisis preliminar que permitió tener una idea general del tipo de modelo que podría ajustar mejor a la serie. Como primera medida se elaboró un gráfico de los registros del río en el tiempo para verificar

su comportamiento (figura 2). El análisis preliminar permite detectar la necesidad de estabilizar la varianza y la media.

Diagnóstico

Debido a la tendencia que presentan los registros, fue necesario realizar una diferenciación de los datos para eliminarla. Una vez diferenciados los datos, se puede observar que se ha eliminado la tendencia en gran medida (figura 3). Aunque su media no es exactamente cero, es un valor pequeño que puede despreciarse en este caso.

Posteriormente, se analizaron estadísticamente los registros anuales del río Magdalena, mediante la función de autocorrelación (ACF) y función de autocorrelación parcial (PACF). La finalidad de este procedimiento es llevar a cabo un análisis preliminar visual y estadístico que permita identificar

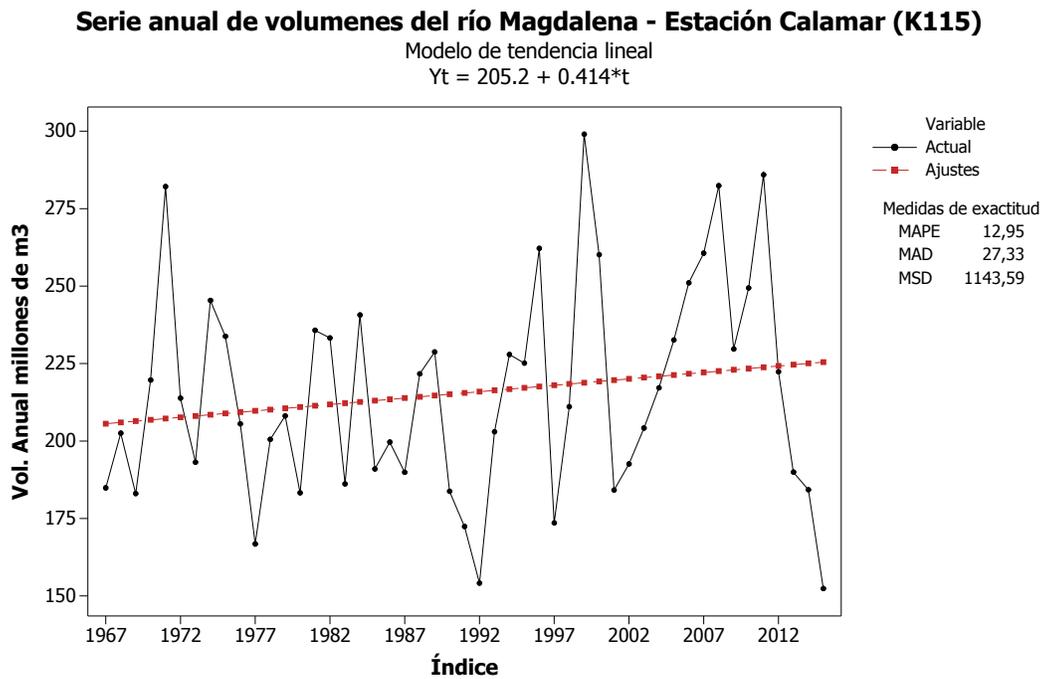


Figura 2. Serie de volumen anual del río Magdalena – Estación Calamar (K115) 1967 – 2015

Fuente: elaboración propia.

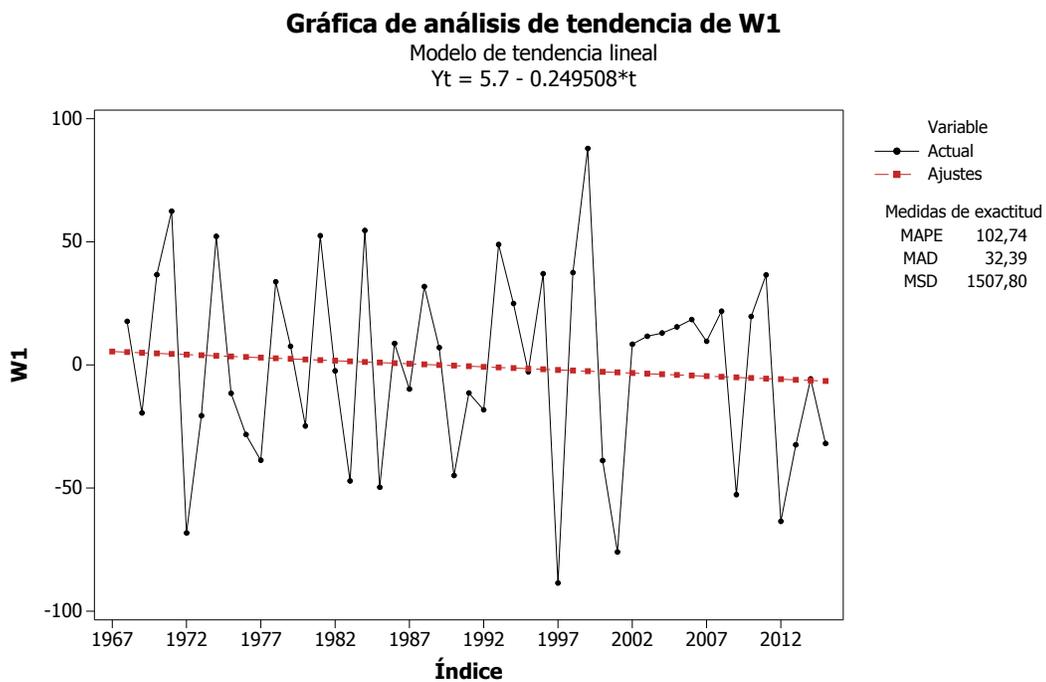


Figura 3. Gráfica de tendencia de la diferencia de orden 1

Fuente: elaboración propia.

un modelo con el mejor ajuste. Para cada función se analizaron 45 desfases. Gráficamente puede observarse que la función de ACF (figura 4) muestra dos barras que sobresalen en el primer segundo desfase con valores ACF de -0,198 (*t* estadístico: -1,37) y -0,381 (*t* estadístico: -2,54), demostrando la representatividad únicamente del segundo desfase. Por su parte, la PACF muestra dos barras sobresalientes en el primer y segundo desfase con un valor de PACF de -0.198 (*t* estadístico: -1,37) y -0,4377 (*t* estadístico: -3,03) respectivamente. La figura 5 muestra las dos barras sobresalientes en los desfases iniciales que decaen hacia cero, lo cual puede indicar una importante influencia del proceso de promedios móviles MA.

Selección del modelo

Después de ver el comportamiento de la serie, se realizan análisis complementarios con el fin de considerar los criterios de información de Akaike

(AIC), criterio de Schwarz (SBIC), el error porcentual absoluto medio (MAPE) y criterio de error cuadrático medio (ECM) (tabla 1). Este análisis permitió seleccionar modelos entre un conjunto finito de modelos basados en la función de probabilidad (Mauricio, 2007), adicionando un término de penalización para el número de parámetros en el modelo, para evitar un sobreajuste en este.

Para la determinación del mejor modelo se hace una comparación entre los mismos modelos evaluados, además de otros que tienen en cuenta el criterio de MAPE, permitiendo con esto seleccionar los que mejor se ajusten a los registros existentes (tabla 2).

De acuerdo con los criterios AIC y SBIC, se selecciona el modelo ARIMA (0, 1, 1), ya que presenta los menores valores en estos criterios (véase valores en negrilla de la tabla 2). Con el criterio MAPE se seleccionó el modelo ARIMA (1, 1, 3) pues presenta el menor valor comparado con los demás modelos (tabla 2), lo que significa que es el modelo que

Tabla 1. Modelos evaluados

	Criterio		
	AIC	SIBC	ECM
ARIMA(0,1,1)	ARIMA(0,1,1)	ARIMA(1,0,1)	
ARIMA(0,1,1)	ARIMA(0,1,1)	ARIMA(2,1,2)	
ARIMA(3,1,3)	ARIMA(0,1,1)	ARIMA(3,1,3)	
ARIMA(3,1,3)	ARIMA(0,1,1)	ARIMA(3,1,3)	
ARIMA(2,1,3)	ARIMA(0,1,1)	ARIMA(2,1,3)	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Comparación de modelos

1	Modelo	RMSE	MAE	MAPE	ECM	AIC	SBIC
(A)	ARIMA (0, 1, 1)	29,490	23,930	11,180	0,2056	6,814	6,855
(B)	ARIMA (0, 0, 1) con constante	29,070	22,660	10,890	-1,6575	6,832	6,914
(C)	ARIMA (2, 1, 3)	27,280	21,810	10,220	0,00509	6,844	7,049
(D)	ARIMA (2, 1, 1)	28,700	22,920	10,730	0,3137	6,853	6,976
(E)	ARIMA (1, 1, 0)	29,460	23,100	11,040	-1,8079	6,859	6,941
(F)	ARIMA (1, 1, 3)	28,290	21,890	10,180	0,9891	6,8713	7,035
(G)	ARIMA (2, 0, 3) con constante	29,280	22,630	10,860	-1,6342	7,0329	7,278
(H)	ARIMA (1, 0, 3) con constante	29,170	22,450	10,660	-1,2543	6,9787	7,183
(I)	ARIMA (2, 1, 2)	28,860	22,620	10,580	0,48820	6,9108	7,074

Fuente: elaboración propia.

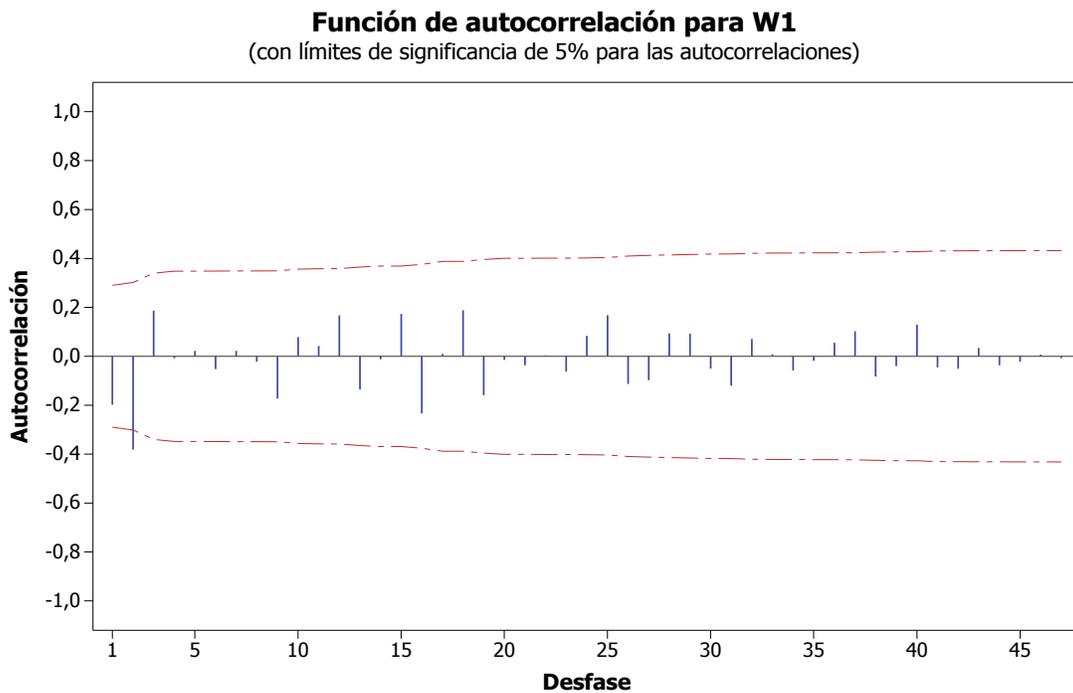


Figura 4. ACF de la serie diferenciada de orden 1 ($W=1$)

Fuente: elaboración propia.

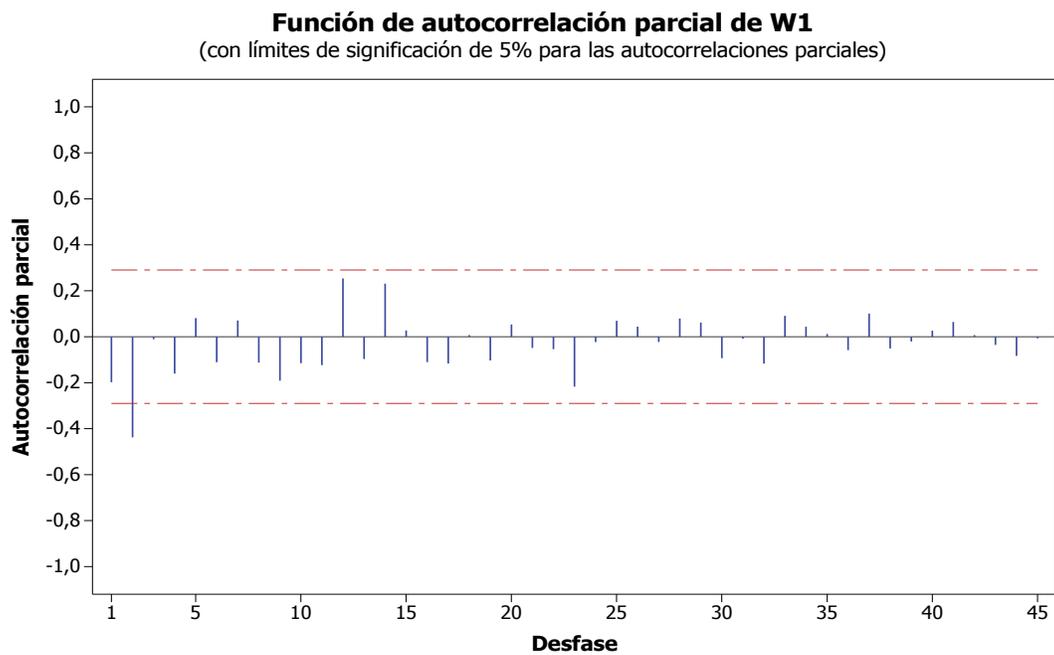


Figura 5. PACF de la serie diferenciada de orden 1 ($W=1$)

Fuente: elaboración propia.

menos se desvía de los datos originales. Y, por último, de acuerdo con criterio ECM el modelo a seleccionar por su menor valor es el ARIMA (2, 1, 3).

Selección del modelo verificando comportamiento de residuos

De los modelos comparados mostrados en la tabla 2, se seleccionaron 3 que cumplen con los criterios de menor AIC, SBIC y ECM: ARIMA (0, 1, 1), ARIMA (1, 1, 3) y ARIMA (2, 1, 3). Para la selección del modelo con mejor ajuste se procede a realizar el análisis de los residuos de cada uno, con el fin

de tomar una decisión acertada en la selección del mismo. A continuación, se muestran los estimados finales de los tres modelos seleccionados.

ARIMA (0, 1, 1)

Los estimados finales de los parámetros para el modelo ARIMA (0, 1, 1), muestran que los residuos cuentan con un proceso aleatorio siguiendo una tendencia normal, media cero, con una ligera tendencia hacia el lado derecho de los ajustes (figura 6). Por otra parte, se destaca la significancia estadística del modelo, dado por el test-t mayor a 1,96 y el *P-value* menor a 0,05 (tabla 3).

Gráficas de residuos para W1

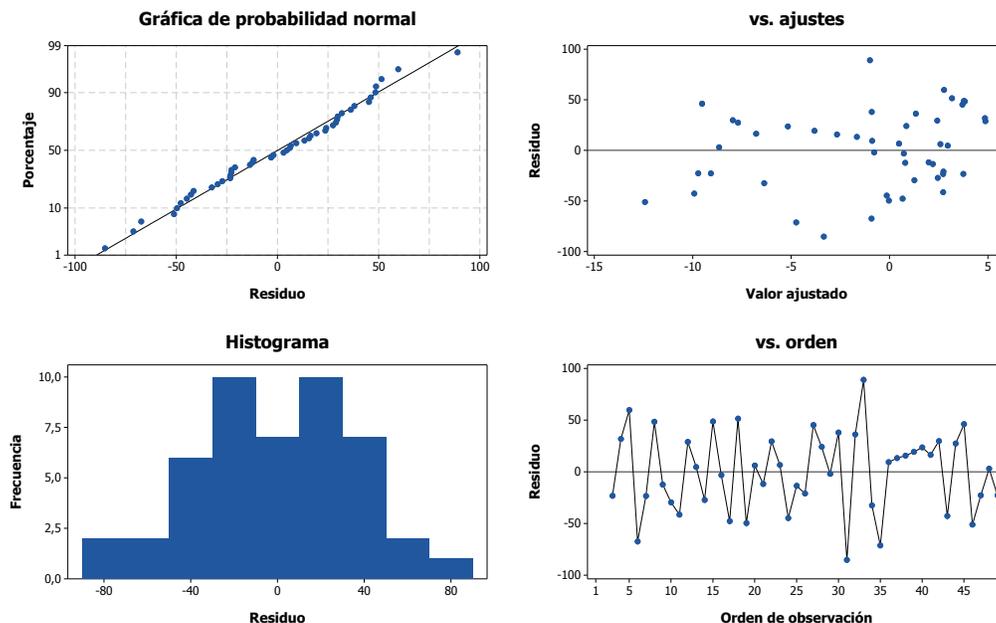


Figura 6. Residuos modelo ARIMA (0, 1, 1)

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Estimados finales de parámetros modelo ARIMA (0, 1, 1)

Tipo	Coef.	De EE	T	P
MA 1	1,050	0,1158	9,130	0,000
Constante	-0,240	0,099	-2,460	0,018
Media	0,9965	0,5061		
Observaciones	48			

Fuente: elaboración propia.

ARIMA (1, 1, 3)

Los estimados finales de los parámetros para el modelo ARIMA (1, 1, 3) indican que los residuos siguen una tendencia normal, los valores ajustados siguen un proceso aleatorio, mostrando mayor dispersión que el modelo ARIMA (0, 1, 1). Sin embargo, los residuos no presentan una simetría (figura 6). Igualmente se destaca la significancia estadística de todos los parámetros del modelo

(MA1 y MA 3), los cuales presentan mayores valores del test-t (tabla 4) para un nivel de confianza mayor al 95 %.

ARIMA (2, 1, 3)

En los estimados finales de los parámetros para el modelo ARIMA (2, 1, 3), los residuos presentan un proceso aleatorio, siguiendo una tendencia normal y media cero (figura 8).

Gráficas de residuos para W1

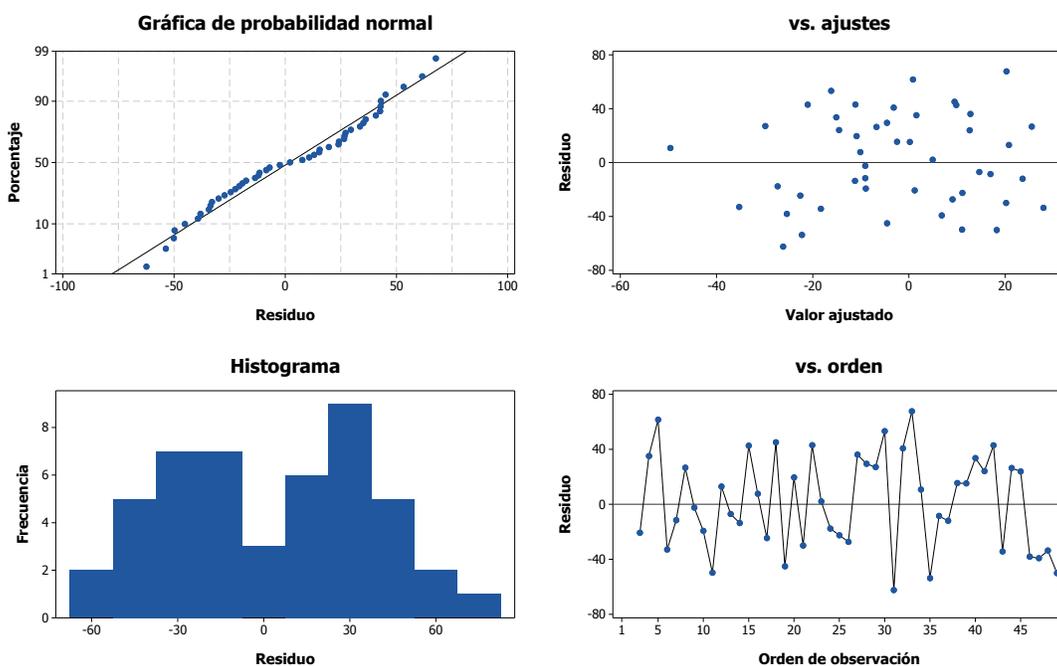


Figura 7. Residuos modelo ARIMA (1, 1, 3)

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Estimados finales de parámetros modelo ARIMA (1, 1, 3)

Tipo	Coef.	SE Coef.	T	P
AR 1	-0,3445	0,3215	-1,07	0,29
MA 1	0,9325	0,2954	3,16	0,003
MA 2	0,5724	0,3532	1,62	0,113
MA 3	-0,5377	0,1644	-3,27	0,002
Constante	-0,1988	0,2696	-0,74	0,465
Observaciones	48			

Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, se destaca que ninguno de los términos AR1, AR2, y MA2 dejan de ser significativos estadísticamente, sugiriendo que el modelo adecuado sigue un comportamiento que es descrito apropiadamente por un MA2 para un nivel de significancia estadística de 95 % (tabla 5).

Ajuste del modelo

A partir de estos resultados, se realiza la verificación del comportamiento de los residuos de los dos modelos que presentan mayor significancia

estadística. Este proceso se lleva a cabo mediante la comparación de los modelos seleccionados y el registro real diferenciado. En la figura 9 se observa que el modelo que mejor ajusta al registro real es el modelo ARIMA (0, 1, 1), indicando un modelo de media móvil de orden 1 con tendencia. Este sigue la forma descrita en la ecuación (5).

$$Y_t = \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} \quad (5)$$

Cabe resaltar que el efecto de la tendencia para este caso será muy bajo, considerando que el coeficiente que acompaña la variable es pequeño (-0,24).

Gráficas de residuos para W1

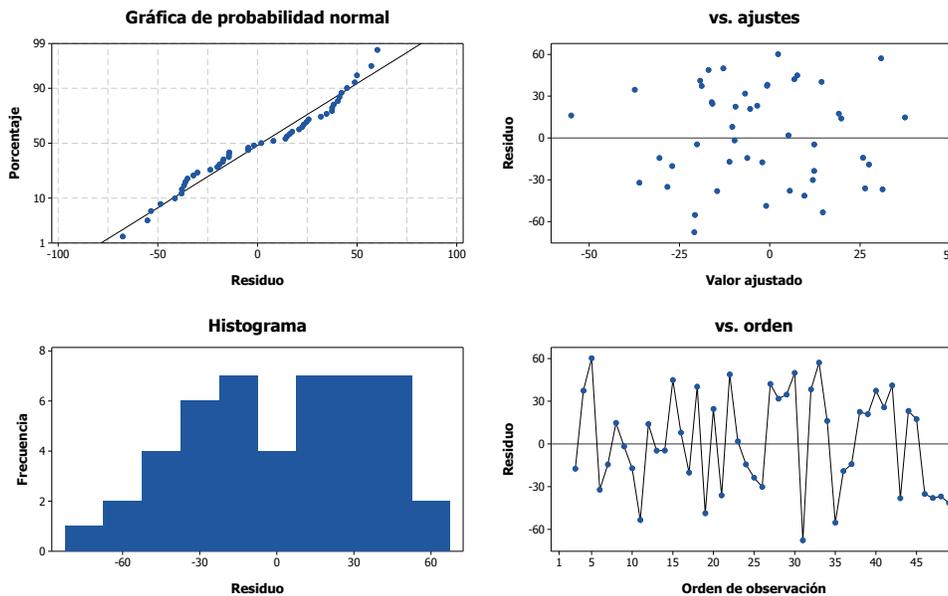


Figura 8. Residuos modelo ARIMA (2, 1, 3)

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Estimados finales de parámetros modelo ARIMA (2, 1, 3)

Tipo	Coef.	SE Coef.	T	P
AR 1	-0.4746	0.3076	-1.54	0.131
AR 2	-0.2547	0.3056	-0.83	0.409
MA 1	0.7771	0.3021	2.57	0.014
MA 2	0.5095	0.3495	1.46	0.153
MA 3	-0.335	0.3208	-1.04	0.302
Constante	-0.3472	0.443	-0.78	0.438
Observaciones	48			

Fuente: elaboración propia.

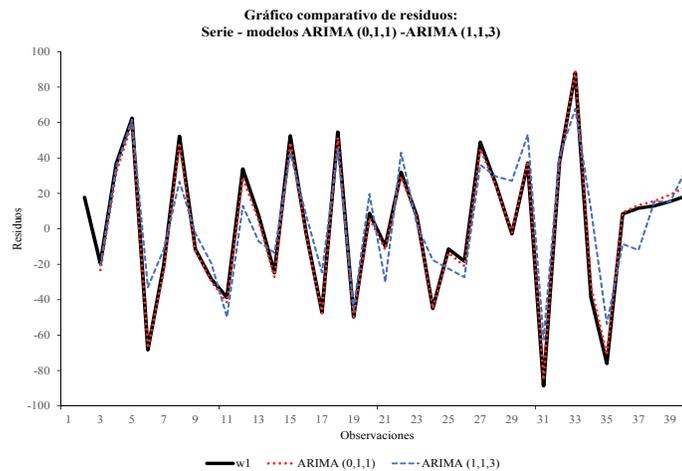


Figura 9. Modelos y serie original

Fuente: elaboración propia.

Simulación de datos

Una vez definido el modelo que representa mejor la serie MA (1) con diferencia $W=1$, se hizo la simulación de los datos a partir de los registros de volumen del río Magdalena, de donde se obtiene una serie sintética de 100 años.

En la tabla 6 se resumen los parámetros considerados en la simulación. La columna 1 y 2 es de carácter informativo, allí se detallan los registros reales de la serie. La columna 3 muestra los datos diferenciados de la serie real obtenidos a partir de la ecuación (2). La columna 4 plantea la

estandarización de los datos diferenciados, calculados a partir de la ecuación (4). La columna 5 presenta datos aleatorios generados con Excel (en total se generaron 100) que permitieran la generación de la serie sintética de 100 años. Las columnas 6 y 7 representan los términos del ruido blanco. La columna 6 presenta el choque, que no es más que el inverso de la distribución normal estándar acumulada, la cual tiene una media de cero y una desviación estándar de uno (aplicación recomendada realizarla en Excel para términos prácticos) necesario para calcular el error o ruido blanco de la ecuación (1) y ecuación (5). En la columna 7

Tabla 6. Parámetros de simulación

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Año	Volumen ($\times 10^6 \text{ m}^3$)	Wreal	Estandariz	Aleat	Choque	et	Zt	Wt
1967	199,112		-0,056	0,555	0,137	0,000	0,056	4,428
1968	200,580	1,468	-0,018	0,581	0,204	0,056	-0,060	-0,175
1969	207,789	7,209	0,127	0,491	-0,023	-0,006	0,477	21,060
1970	239,106	31,317	0,736	0,956	1,702	0,471	-0,730	-26,670
1971	280,733	41,627	0,997	0,153	-1,023	-0,283	0,791	33,488
1972	210,943	-69,790	-1,820	0,971	1,889	0,523	-0,517	-18,260
1973	191,120	-19,824	-0,557	0,470	-0,076	-0,021	0,500	21,967
...

Fuente: elaboración propia.

se indica la estimación del ruido blanco calculada como: choque (columna 6) *, para esta ecuación se utilizó el valor de θ_1 calculado en el ítem anterior para el modelo ARIMA (0, 1, 1) $\theta_1 = 1,05$. La columna 8 indica la solución del modelo MA dado por la segunda parte ecuación (5). La columna 9 muestra la diferenciación de la serie simulada calculada despejando W_t de la ecuación (4).

Por último, de manera esquemática, se relacionó la diferenciación simulada con el primer dato de registro real (1967) y a este se le sumó la diferencia W_t obtenida para cada año con el fin de conocer la serie en función de volúmenes. Los resultados se presentan en la figura 10. De esta se puede decir que

no hay un ajuste preciso. Adicionalmente, se destaca que en el proceso de evaluación y análisis no se discrimina la influencia del fenómeno de El Niño y La Niña. Sin embargo, los análisis se realizaron en años en los que se han presentado dichos fenómenos.

La figura 11 muestra la simulación de la serie en un rango más amplio (100 años) pronosticando un volumen mínimo del río Magdalena de 106 millones de m^3 en 100 años. Esto permite considerar planes de acción a futuro para disminuir la tasa de escasez. Sin embargo, cabe destacar que estos modelos van ligados a los registros de volumen o de niveles disponibles, por tanto, se debe actualizar el modelo año a año para obtener una aproximación más exacta.

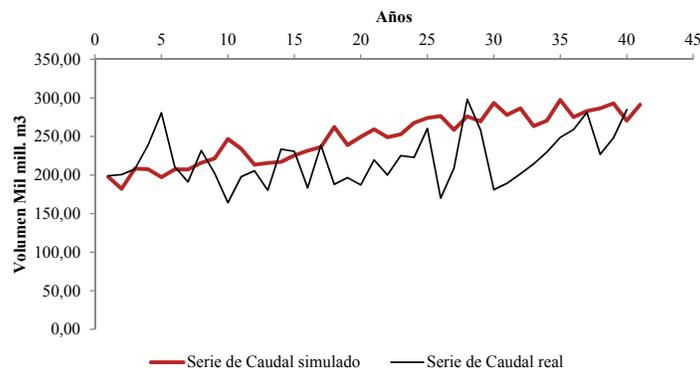


Figura 10. Comparación serie simulada vs. Serie real con los datos sin diferenciar

Fuente: elaboración propia.

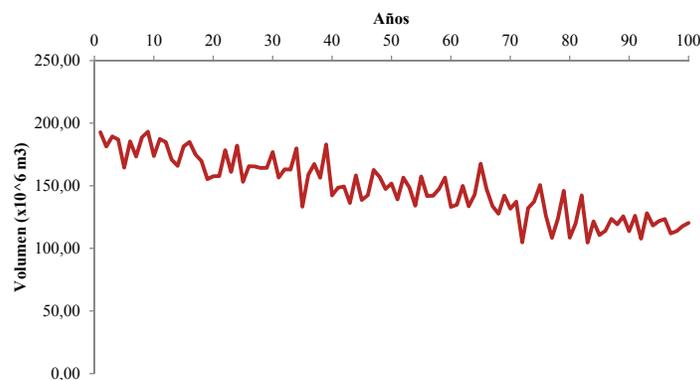


Figura 11. Serie simulada a 100 años

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

La simulación y pronóstico estocástico de caudales se realizó teniendo en cuenta series de tiempo, y se han evaluado los modelos más comunes en este ámbito. Mediante el análisis de los resultados se puede concluir que, para realizar un pronóstico aproximado, se debe elegir el modelo más acertado para el evento que se quiere estudiar. Como insumo de la investigación se elaboró un diagrama de flujo que considera el proceso elemental para el análisis de los modelos ARIMA.

El análisis estadístico permitió tomar una decisión del modelo escogido, el cual cumple con los parámetros requeridos de normalidad, varianza constante y aleatoriedad.

En relación al caso de estudio presentado, el pronóstico de volumen máximo del río Magdalena para el periodo 2013 a 2024 oscila entre 289.695 millones de m³ y 309.847 millones de m³. El pronóstico de volumen mínimo del río Magdalena para el periodo 2013 a 2024 oscila entre 179.123 millones de m³ y 157.764 millones de m³.

La simulación a partir del modelo ARIMA (0,1,1) demuestra que los pronósticos, desde un registro histórico, se adapta muy bien a los niveles máximos y mínimos, y se mantienen en el rango. Se concluye, entonces, que estos modelos no permiten simular el comportamiento exacto en el tiempo, pero es una buena herramienta con la cual se obtiene una aproximación de posibles eventos máximos y mínimos.

Por último, mediante los modelos de predicción estadística y simulación es posible tener aproximaciones de los comportamientos de los ríos para periodos cortos de tiempo, y que estas metodologías constituyen una herramienta que, una vez optimizada, permitirá obtener una aproximación a los cambios de ríos ante las intervenciones humanas o antrópicas. Esto implica que la utilización de modelos estocásticos para estudiar fenómenos naturales, que también son de carácter estocástico/aleatorio, es una herramienta altamente útil para

la planificación, diseño y operación de problemas complejos asociados a los recursos hídricos.

REFERENCIAS

- Bowerman, B. (2009). *Pronósticos, series de tiempo y regresión: un enfoque aplicado*. 4a. ed. México: Centro Ixtapaluca Edo. de México, CENGAGE Learning.
- Box, G. E. P., y Jenkins, G. M. (1970). *Time series analysis: forecasting and control*, 1976. ISBN: 0-8162-1104-3.
- Calle, E.; Angarita, H. y Rivera, H. (2010). Viabilidad para pronósticos hidrológicos de niveles diarios, semanales y decadales en Colombia. *Ingeniería e Investigación*, 30(2), 178-187.
- Chatfield, C. (2003). *The Analysis of Time Series: An Introduction*. 6a. ed. Boca Raton, Florida: Chapman and Hall/CRC.
- De Arce, R. y Mahía, R. (2003). *Modelos Arima. Programa CITUS: Técnicas de Variables Financieras*.
- García M., B. y Baena E., R. (2015). El doble meandro abandonado del Guadalquivir en Cantillana (Sevilla): cambios de trazado y evolución geomorfológica. *Geographicalia*, (53), 101-119. Guerrero, V. (2003). *Análisis estadístico de series de tiempo económicas*. 2a. ed. México, D.F.: Thomson.
- Hildebrand, D. (1998). *Estadística aplicada a la administración y a la economía. Serie de probabilidad y estadística*. 3a. ed. México, D.F.: Addison Wesley Longman..
- Ideam (2001). *Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. Bogotá, D. C.
- Krajewski, L.; Ritzman, L. y Malhotra, M. (2008). *Administración de operaciones*. 8a. ed. México: Pearson Educación.
- Lehner, B.; Döll, P.; Alcamo, J.; Henrichs, T. y Kaspar, F. (2006). Estimating the impact of global change on flood and drought risks in Europe: a continental, integrated analysis. *Climatic Change*, 75(3), 273-299.
- Mauricio, J. (2007). *Introducción al análisis de series temporales*. Madrid: Universidad complutense de Madrid.

- Ocampo, E.; Cabrera, A. y Ruiz, A. (2006). Pronóstico de bolsa de valores empleando técnicas inteligentes. *Revista Tecnura*, 9(18), 57-66.
- Organización Meteorológica Mundial (OMM) (2003). *Servicios de Información y Predicción del Clima y Aplicaciones Agrometeorológicas para los países andinos*. Ginebra- Suiza.
- Pabón, D. (1997). Variabilidad climática. En: *Técnicas agrometeorológicas en la agricultura operativa de América Latina* (pp. 99-103). Ginebra, Suiza: Organización Meteorológica Mundial.
- Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) (2007). *Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Suiza.
- Pinilla, L.; Pérez G., A. y Benito, G. (1995). Cambios históricos de los cauces de los ríos Tajo y Jarama en Aranjuez. *Geogaceta*, 18(10), 101-104.
- Vargas, J.; Hernández, C. y Aponte, G. (2012). Comparación del modelo FARIMA y SFARIMA para obtener la mejor estimación del tráfico en una red Wi-Fi. *Revista Tecnura*, 16(32), 84-90.
- Velásquez, J.; Dynner, I. y Souza, R. (2008). Modelado del precio spot de la electricidad en Brasil usando una red neuronal autorregresiva. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 16(3), 394-403.
- Yaglom, A. (1955). Correlation theory of processes with random stationary nth increments. *Matematicheskii Sbornik (N. S.)*, 37(79), 141-196.





Priorización de despachos con AHP difuso y Topsis

Dispatch prioritization using fuzzy AHP and Topsis

María Isabel Hernández Santibáñez¹, Luisa Fernanda Giraldo Correa²,
Lizeth Alejandra Gaviria Ramírez³, Ángela María Wilches David⁴, Juan Carlos Osorio Gómez⁵

Fecha de recepción: 16 de agosto de 2016

Fecha de aceptación: 15 de febrero de 2017

Cómo citar: Hernández S., M.I.; Giraldo C. L.F.; Gaviria R., L.A.; Wilches D., A.M. y Osorio G., J.C. (2017). Priorización de despachos con AHP difuso y Topsis. *Revista Tecnura*, 21(52), 102-110. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.2.a08

Resumen

Contexto: La limitación de recursos en las organizaciones a la hora de realizar los despachos de producto terminado, desde los centros de producción hacia las zonas de consumo, hace que sea importante definir con claridad las prioridades, de manera que dichos recursos puedan utilizarse eficientemente y garanticen los más altos niveles de satisfacción a los clientes.

Método: En este sentido, se ha desarrollado una propuesta para priorizar los despachos de producto terminado desde un centro de distribución hacia n bodegas que involucra las herramientas multicriterio AHP difuso y Topsis. La propuesta permite definir una serie de criterios a considerar a la hora de realizar los despachos y, mediante la herramienta AHP difuso, ponderar dichos criterios dado que no todos tienen la misma importancia a la hora de tomar la decisión. Por otro lado y considerando que cada punto de destino posee unos valores diferentes de dichos indicadores se utiliza el Topsis para generar un *ranking* que permita establecer la prioridad a la hora de los despachos.

Resultado: La metodología propuesta ha sido aplicada en un caso de estudio y se ha encontrado que permite realizar la priorización de los despachos de manera que las bodegas más importantes, según el conjunto de criterios establecidos, son las primeras que deben ser atendidas.

Conclusiones: Esta metodología puede ser replicable a cualquier organización siempre y cuando se cuente con las personas involucradas y la claridad frente a los objetivos organizacionales de la compañía.

Palabras clave: distribución física de mercancías, logística, toma de decisiones, transporte terrestre.

Abstract

Context: The organizations present a limitation in resources when making finished product shipments from the product centers to the areas of consumption. This limitation makes it important to clearly define priorities so that those resources can be used efficiently and ensure high levels of customer satisfaction.

1 Ingeniera industrial, Universidad del Valle. Cali, Colombia. Contacto: maria.hernandez@correounivalle.edu.co

2 Ingeniera industrial, Universidad del Valle. Cali, Colombia. Contacto: luisa.giraldo@correounivalle.edu.co

3 Ingeniera industrial, Universidad del Valle. Cali, Colombia. Contacto: lizeth.gaviria@correounivalle.edu.co

4 Ingeniera industrial, Universidad del Valle. Cali, Colombia. Contacto: angela.wilches@correounivalle.edu.co

5 Ingeniero industrial, especialista en Logística, magíster en Ingeniería Industrial. Profesor Titular de la Universidad del Valle. Cali, Colombia. Contacto: juan.osorio@correounivalle.edu.co

Method: We developed a proposal to prioritize the shipments of finished product from a distribution center to n warehouses. It involves the fuzzy AHP and Topsis multi-criteria tools. The Fuzzy AHP tool allows defining a series of important criteria when making the dispatches. Additionally, it allows weighing these criteria since not all have the same importance when making the decision. Finally, we used Topsis to generate a ranking that allows us to establish the priority of dispatches, considering that each destination warehouse has different values for those criteria.

Results: The proposed methodology was applied to a case study. We found that it prioritizes the dispatches so that the most important warehouses, according to the set of established criteria, are the first to be met.

Conclusions: The proposed methodology can be replicated in different contexts and for any organization as long as there are people involved and the objectives of the company are clear.

Keywords: decision making, Land transportation, Logistic, Physical distribution of goods.

INTRODUCCIÓN

Según Bravo, Osorio y Orejuela (2009) se puede encontrar en la literatura una gran cantidad de investigaciones que consideran el problema de atender a los clientes ágilmente con un transporte eficiente y oportuno; sin embargo, también afirman que no se han encontrado trabajos donde se hayan definido de manera clara, indicadores que permitan planificar los despachos de la organización, apuntando a aquellas variables claves para el servicio al cliente y la gestión efectiva de los recursos de los que dispone una empresa, de manera que el despacho sea multicriterio. Así, se hace necesario para las empresas contar con herramientas que involucren los diferentes criterios mencionados en el proceso de toma de decisiones.

Este trabajo presenta, entonces, una breve revisión de la bibliografía asociada a la priorización de despachos y el uso de herramientas multicriterio para dicho fin, así como una revisión de las principales aplicaciones de las herramientas AHP y Topsis, las cuales son propuestas para el desarrollo de la metodología planteada. A continuación, se presenta la propuesta metodológica y un ejemplo de aplicación para ilustrar dicha metodología. Por último, se presentan unas conclusiones y recomendaciones sobre futuros desarrollos asociados a esta propuesta.

Revisión de la literatura

Aunque tradicionalmente muchas organizaciones asumen la priorización de los despachos como un problema asociado simplemente a la programación de camiones y a la selección de rutas, esta es una dificultad compleja que reviste atención, puesto que una mala asignación de los despachos puede generar, al mismo tiempo, inconvenientes asociados a excesos de inventarios en centros de distribución o bodegas de poca rotación, y agotados en sitios de alta demanda, o inclusive peor, agotados en zonas de mercado prioritarias en el marco de las estrategias corporativas.

Entre los trabajos revisados se pueden mencionar Bell *et al.* (1983); Goetschalckx (1988); Lambert y Harrington (1989); Innis y La Londe (1994); Brandão y Mercer (1997); Bowersox, Closs y Bixby Cooper (2002); Holweg (2005); Dobie (2005); Bonfill, Espuña y Puigjaner (2007); Shen y Honda (2009); Nielsena, Andersena y Pretolam (2014); Narasimhaa, Kivelevitchb, Sharmaa y Kumar (2013); Cattaruzza, Absi, Feillet y Vidal (2014), y Palhazi, Goos, Sörensen y Arráiz (2014). Sin embargo, dichos trabajos abordan la problemática considerando un solo criterio. Por tal razón, se ha planteado realizar el presente estudio, dado que se considera que tal como lo plantean Bravo, Osorio y Orejuela (2007), la situación es claramente multicriterio.

La metodología propuesta se desarrollará con base en los criterios establecidos por Bravo, Osorio y Orejuela (2007), los cuales se describen a continuación:

- *Demanda*: se refiere a la cantidad demandada por cada una de las bodegas, y se considerará para la prioridad aquella demanda mayor. Algunos métodos de previsión de la demanda uniproducto son abordados en Castro (2003).
- *Variabilidad de la demanda*: hace referencia a la desviación estándar de la demanda promedio semanal, e igual que en el caso anterior, será más prioritaria la bodega cuya variabilidad sea mayor.
- *Cobertura en unidades*: hace referencia a los días de cobertura del inventario actual en función del *lead time* y la demanda promedio medida en las mismas unidades de tiempo del *lead time*. La expresión matemática ha sido diseñada de manera tal que en el momento en que el valor de este indicador sea positivo, se apunta a la posibilidad de desabastecimiento y, por tanto, se hace prioritario el despacho, es decir, que a mayores valores del indicador, más prioritaria es la bodega.
- *Cobertura en días*: el planteamiento es equivalente al anterior, solamente que para este caso se considera el número de días que podría estar desabastecida la bodega si no se envía prontamente; por consiguiente, en la medida que el valor de este criterio sea mayor, será más prioritaria la bodega.
- *Tamaño del faltante*: se calcula como la diferencia entre el inventario de seguridad y el inventario efectivo. Quiere decir, entonces, que en la medida que el valor de este criterio sea mayor, será más prioritaria la bodega.
- *Tamaño del pedido*: equivale a la relación porcentual del inventario máximo definido menos el inventario efectivo sobre el inventario máximo, entonces, si esta relación se acerca al 100 %, mayor será la prioridad de la bodega.
- *Zona de mercado*: considera este criterio el hecho que algunas empresas establecen zonas geográficas estratégicas y, en ese sentido, más importantes dentro de sus planes de expansión

y penetración del mercado. En este caso, se definen unos pesos de importancia, donde las zonas de mayor peso se consideran más prioritarias a la hora de programar el despacho.

Se ha considerado que estos criterios recogen los aspectos más importantes a la hora de definir la prioridad de los despachos, además se encuentra que son complementarios, pero que cada uno tiene su significado independiente y que si se miraran por separado, podrían tomarse decisiones contrarias a si se observan en conjunto, para lo cual se hace necesaria una metodología multicriterio como la propuesta en este trabajo.

En cuanto a trabajos que consideran la problemática multicriterio, se pueden mencionar Bravo, Osorio y Orejuela (2009) y Peña, Osorio y Arias (2010). Sin embargo, estos trabajos abordan la problemática utilizando una sola herramienta multicriterio (AHP y QFD difuso, respectivamente), pero, dada la naturaleza del problema, podría utilizarse exitosamente una combinación de herramientas, que para este caso se cree pueden funcionar bien: AHP difuso para la definición de las ponderaciones de cada uno de los criterios involucrados y la herramienta Topsis para la calificación de las alternativas, de manera que se tenga un *ranking* para que el encargado de realizar los despachos considere la prioridad marcada por dicho *ranking*. Así es posible obtener un mejor resultado para la organización en su conjunto, a partir de una evaluación completa del sistema.

Con respecto a aplicaciones recientes de AHP difuso y Topsis se pueden mencionar: Ball y Korukoğlu (2009); Gumus (2009); Muralidhar, Ravindranath y Srihari (2012); Awasthi y Chauhan (2012); Choudhary y Shanka (2012); Bas (2012), y Vinodh, Prasanna y Prakash (2014).

METODOLOGÍA

Se plantea entonces una metodología que utiliza la combinación del AHP difuso y Topsis para la priorización de los puntos a los cuales realizar los despachos desde el centro de distribución.

Generalidades de la lógica difusa y propiedades de los números difusos pueden revisarse en Villarreal y Arango (2014).

En este caso, primero se han definido los criterios, los cuales como se presentó en el apartado anterior, corresponden a los propuestos por Bravo, Osorio y Orejuela (2007). Dichos criterios son ponderados de acuerdo con la opinión de expertos, mediante la herramienta AHP en conjunto con la lógica difusa. En particular, esta última se utiliza para resolver la ambigüedad que puede estar presente en los juicios emitidos por los expertos. El tratamiento de estos juicios se hace a partir de la siguiente escala lingüística, que tiene la equivalencia con la escala de Saaty (1990) en números triangulares y su respectiva equivalencia verbal (tabla 1).

A partir de las comparaciones por pares establecidas por la metodología AHP, se obtendrá un peso ponderado para cada uno de los criterios, en función del conocimiento y experiencia de las personas que participen y que, se asume, son expertos con amplio conocimiento no solo del proceso de despacho, sino también del direccionamiento estratégico de la organización. Una vez obtenidas las ponderaciones, se procede con la metodología Topsis para establecer el orden de prioridad de las bodegas. Algunas aplicaciones de la herramienta se pueden encontrar en Behzadian, Khanmohammadi Otaghshara, Yazdani e Ignatius (2012), y Joshi y Shankar (2011).

Topsis inicia con la evaluación de cada alternativa (es decir, las bodegas que esperan los productos del centro de distribución). Las evaluaciones conseguidas son normalizadas y considerando los pesos obtenidos con el AHP difuso, se obtiene un *ranking*. Es importante mencionar que existen diferentes aproximaciones para la normalización, y en este caso en particular, se ha utilizado la planteada en la ecuación (1).

$$r_{ij} = \frac{f_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n f_{ij}^2}} \quad (1)$$

Donde:

r_{ij} es el valor normalizado para la calificación de la alternativa i frente al criterio j .

f_{ij} es el valor del indicador de cada alternativa i frente a cada indicador j .

Una vez obtenido el resultado de la aplicación del Topsis, el objetivo radica en realizar los despachos estrictamente en el orden establecido en el *ranking*, y a medida que los recursos se agoten (camiones, producto a ser enviado), programar los despachos subsecuentes corriendo nuevamente el modelo, es decir, calificando otra vez las bodegas y desarrollando la herramienta Topsis. Es importante aclarar que solamente se debe correr de nuevo el Topsis, pues el AHP recoge planteamientos de largo plazo definidos por los expertos.

De acuerdo con esto, puede apreciarse que la metodología tiene dos fases: en la cual se

Tabla 1. Escalas de comparación para el AHP difuso

Escala Saaty	Escala difusa	Escala verbal
1	(1,1,2)	Igual importancia de ambos elementos.
3	(2,3,4)	Moderada importancia de un elemento sobre otro.
5	(4,5,6)	Fuerte importancia de un elemento sobre el otro.
7	(6,7,8)	Muy fuerte importancia de un elemento sobre el otro.
9	(8,9,9)	Extrema importancia de un elemento sobre el otro.
2, 4, 6, 8	(1,2,3), (3,4,5), (5,6,7), (7,8,9)	Valores intermedios.

Fuente: Herrera y Osorio (2006).

ponderan los criterios mediante la utilización de la herramienta AHP difuso, debe hacerse una sola vez y repetirse únicamente cuando las prioridades competitivas o las estrategias de la compañía sufran alguna modificación; y en la segunda, se aplica Topsis, debe realizarse cada vez que se vayan a programar los despachos en la organización.

Con el fin de agilizar el proceso y contribuir con su efectividad, se desarrolló una aplicación en Excel que permite correr la priorización alimentando los resultados de cada una de las bodegas a las que se espera realizar los despachos. Dicha aplicación fue diseñada para el caso de estudio, el cual se presenta en el siguiente apartado.

RESULTADOS

A continuación, se presenta el caso de estudio, el cual es tomado de Bravo, Osorio y Orejuela (2009)

y consiste en un centro de distribución que atiende de 15 bodegas de producto terminado, distribuidas en diferentes zonas geográficas con los datos que se muestran en la tabla 2. A partir de estos, se calculan los indicadores planteados que se pueden apreciar en la tabla 3.

El primer paso de la metodología planteada consiste en la ponderación de los criterios, la cual se realiza a través del AHP difuso aplicado a expertos en el tema, que, para el caso de estudio, correspondería, por ejemplo, al gerente de planta, el gerente de logística y el jefe de despachos. Mediante la utilización de la escala verbal planteada por la metodología propuesta, se obtuvieron las siguientes ponderaciones para los criterios (tabla 4).

Tabla 2. Datos del caso de estudio

Bodega	Lead time de despacho	Demanda promedio semanal	Desviación estándar demanda	Zona geográfica	Inventario	Inventario máximo	Inventario de seguridad
1	1	2500	200	A	460	3209	352
2	2	1400	100	A	172	1986	186
3	3	2000	150	A	324	3194	337
4	1	1800	180	B	380	2419	362
5	2	1800	180	B	154	2698	384
6	1	2400	240	A	331	3165	422
7	1	1700	170	C	99	2242	299
8	1	1600	160	C	296	2110	281
9	2	1460	146	C	156	2149	272
10	2	2200	220	B	495	3239	410
11	3	1650	165	B	412	2702	345
12	1	2700	270	B	263	3591	505
13	3	1670	167	D	344	2735	349
14	1	3100	310	D	746	4123	580
15	1	1300	130	D	300	1729	243

Fuente: Bravo, Osorio y Orejuela (2009).

Tabla 3. Indicadores para el caso estudio

Bodega	Demanda promedio semanal	Desviación estándar demanda	Zona geográfica (%)	Cobertura en unidades	Cobertura en días	Tamaño del faltante	Tamaño del pedido (%)
1	2500	200	0,17	-103	-0,3	-108	0,86
2	1400	100	0,17	228	1,1	14	0,91
3	2000	150	0,17	533	1,9	13	0,9
4	1800	180	0,44	-123	-0,5	-18	0,84
5	1800	180	0,44	360	1,4	230	0,94
6	2400	240	0,17	12	0	91	0,9
7	1700	170	0,26	144	0,6	200	0,96
8	1600	160	0,26	-67	-0,3	-15	0,86
9	1460	146	0,26	261	1,3	116	0,93
10	2200	220	0,44	134	0,4	-85	0,85
11	1650	165	0,44	295	1,3	-67	0,85
12	2700	270	0,44	123	0,3	242	0,93
13	1670	167	0,08	372	1,6	5	0,87
14	3100	310	0,08	-303	-0,7	-166	0,82
15	1300	130	0,08	-114	-0,6	-57	0,83

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Ponderación de los criterios, caso estudio

Criterios	Demanda promedio semanal	Desviación estándar demanda	Zona geográfica	Cobertura en unidades	Cobertura en días	Tamaño del faltante	Tamaño del pedido
Ponderación	10,20%	9,60%	9,25%	24,60%	25,75%	10,70%	9,90%

Fuente: elaboración propia.

Una vez obtenidas estas ponderaciones, las cuales se mantendrán vigentes para la organización mientras no haya cambios en las definiciones estratégicas de la compañía, se continúa con el paso 2 de la metodología, el cual consiste en la aplicación del Topsis para definir la prioridad de los despachos. Para esto, es importante normalizar el indicador, que, para este caso, se desarrolla utilizando la ecuación (1).

Al realizar la metodología Topsis se obtiene el *ranking* que prioriza las bodegas según la importancia establecida para los criterios considerados. Este *ranking* es el resultado final de la metodología propuesta, y define el orden estricto de prioridad para la realización de los despachos desde el centro de distribución. En la tabla 5 se presenta el *ranking* obtenido para el caso de estudio que se viene desarrollando. Estos resultados se discuten a continuación.

Tabla 5. Resultados de la aplicación de la metodología Topsis-AHP FUZZY para la priorización de despachos

Prioridad	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Bodega	3	5	13	9	11	2	7	12	10	6	8	4	1	15	14
Resultado Topsis	80,1	79,3	72,7	68,9	66,0	60,8	54,9	52,3	46,2	37,2	25,3	22,7	21,3	17,3	13,6

Fuente: elaboración propia.

DISCUSIONES

Al observar los resultados presentados en la tabla 5, se aprecia que la bodega más prioritaria y por tanto la primera que debe ser atendida es la No. 5, dado que en el *ranking* ocupa el primer lugar con un valor de 89,3 %, seguida por las 12 y 7, con un valor de 75,6 % y 75 %, respectivamente.

Es importante destacar que una vez atendidas estas bodegas, el inventario efectivo cambiará y, por tanto, los valores de los indicadores, haciendo que las prioridades sean redefinidas y garantizando que con la aplicación continua de la metodología, todas las bodegas sean abastecidas en el corto y mediano plazo.

Sin embargo, atender una bodega no implica que inmediatamente vaya al final del *ranking*, por lo que cada vez que se vaya a realizar un nuevo despacho, debe correrse otra vez la herramienta Topsis dándole un carácter dinámico a la herramienta y al proceso, de manera que se ajuste mejor a las condiciones reales de las bodegas día a día. Se espera entonces que esta metodología se apropie por la organización y se utilice cada vez que se tenga que decidir sobre los despachos a efectuar hacia las bodegas clientes.

Es claro que esta metodología considera una situación simplificada de la realidad, pero su efectividad, a la hora de considerar todos los criterios mencionados, la convierte en un instrumento útil que puede ser ajustado a las necesidades específicas de las organizaciones.

CONCLUSIONES

La priorización de despachos es claramente un problema que debe abordarse desde el punto de vista multicriterio, y si bien no existen muchas referencias asociadas a esta situación, se considera importante desarrollar alternativas como la planteada en este documento, de manera que se fomente la investigación hacia estas aplicaciones.

La utilización del AHP difuso en conjunto con Topsis se plantea como una estrategia adecuada

para el problema en mención, pues permite combinar decisiones y definiciones del largo y corto plazo de manera consistente y coherente, lográndose un resultado robusto pues satisface todos los criterios al considerar las variaciones del día a día en cada una de las bodegas clientes, pero sin perder de vista el direccionamiento estratégico de la organización y sus políticas de expansión comercial.

Aunque son herramientas matemáticas avanzadas, la integración de la propuesta planteada en este artículo puede sistematizarse fácilmente con una herramienta utilizada por casi todas las organizaciones como lo es la hoja electrónica del programa Microsoft Excel®. Es importante continuar desarrollando la herramienta para que sea posible incluir en la decisión el caso de múltiples productos y explorar en la aplicación metodológica otras formas de normalización para la herramienta Topsis.

REFERENCIAS

- Awasthi, A. y Chauhan, S.S. (2012). A hybrid approach integrating Affinity Diagram, AHP and fuzzy Topsis for sustainable city logistics planning. *Applied Mathematical Modelling*, 36, 573-584.
- Ball, S. y Korukoğlu, S. (2009). Operating system selection using Fuzzy AHP and Topsis methods. *Mathematical and Computational Applications*, 14, 119-130.
- Bas, E. (2012). The integrated framework for analysis of electricity supply chain using an integrated SWOT-fuzzy Topsis methodology combined with AHP: The case of Turkey. *Electrical Power and Energy Systems*, 44, 897-907.
- Behzadian, M.; Khanmohammadi Otaghshara, S.; Yazdani, M. y Ignatius, J. (2012). A state-of-the-art survey of TOPSIS applications. *Expert Systems with Applications*, 39, 13051-13069.
- Bell, W.; Dalberto, L.; Fisher, M.; Greenfield, A.; Jai-kumar, R.; Kedia, P.; ...; Prutzman, P. (1983). Improving the Distribution of Industrial Gases with an On-line Computerized Routing and Scheduling Optimizer. *Interfaces*, 13, 4-23.

- Bonfill, A.; Espuña, A. y Puigjaner, L. (2007). Decision support framework for coordinated production and transport scheduling in SCM. *Computers and Chemical Engineering*, 32, 1206-1224.
- Bowersox, D.; Closs, D. y Bixby Cooper, M. (2002). Supply Chain Logistics Management. En: D. Bowersox, D. Closs y M. Bixby Cooper. *Supply Chain Logistics Management* (pp. 1-656). Nueva York: McGraw-Hill.
- Brandão, J. y Mercer, A. (1997). A tabu search algorithm for the multi-trip vehicle routing and scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 100, 180-191.
- Bravo, J.J.; Osorio, J.C. y Orejuela, J.P. (2007). Administración de recursos de distribución: Indicadores para la priorización en transporte. *Estudios Gerenciales*, 102, 101-118.
- Bravo, J.J.; Osorio, J.C. y Orejuela, J.P. (2009). Modelo para la priorización dinámica de despachos de vehículos utilizando el proceso analítico jerárquico. *Revista Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia*, 48, 201-215.
- Castro, C.A. (2003). Una estructura para la selección de modelos de gestión de inventarios de artículos individuales cuando la demanda es determinística. *Revista Tecnura*, 13(7), 83-93.
- Cataruzza, D.; Absi, N.; Feillet, D. y Vidal, T. (2014). A memetic algorithm for the Multi Trip Vehicle Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, 236, 833-848.
- Choudhary, D. y Shanka, R. (2012). An STEEP-fuzzy AHP-Topsis framework for evaluation and selection of thermal power plant location: A case study from India. *Energy*, 42, 510-521.
- Dobbie, K. (2005). A proactive strategy for Motor Freight Carriers. *Transportation Journal*, 44, 37-53.
- Goetschalckx, M. (1988). A decision support system for dynamic truck dispatching. *International Journal of Physical Distribution & Material Management*, 18, 3442.
- Gumus, A.T. (2009). Evaluation of hazardous waste transportation firms by using a two-step fuzzy-AHP and TOPSIS methodology. *Expert Systems with Applications*, 18, 4067-4074.
- Herrera, M.F. y Osorio, J.C. (2006). Modelo para la gestión de proveedores utilizando AHP difuso. *Estudios Gerenciales*, 99, 69-88.
- Holweg, M. (2005). An investigation into supplier responsiveness: Empirical evidence from the automotive Industry. *The International Journal of Logistics Management*, 16, 96-119.
- Innis, D. y La Londe, B. (1994). Customer Service: The Key to Customer Satisfaction, Customer Loyalty, and Market Share. *Journal of Business Logistics*, 15, 1-27.
- Joshi, R.B. y Shankar, R. (2011). A Delphi-AHP-TOPSIS based benchmarking framework for performance improvement of a cold chain. *Expert Systems with Applications*, 38, 10170-10182.
- Lambert, D. y Harrington, T. (1989). Establishing Customer Service Strategies within the Marketing Mix: More Empirical Evidence. *Journal of Business Logistics*, 10, 44-60.
- Muralidhar, P.; Ravindranath, K. y Srihari, V. (2012). Evaluation of Green Supply Chain Management Strategies Using Fuzzy AHP and Topsis. *IOSR Journal of Engineering*, 2, 824-830.
- Narasimhaa, K.V.; Kivelevitchb, E.; Sharmaa, B. y Kumar, M. (2013). An ant colony optimization technique for solving min-max Multi-Depot Vehicle Routing Problem. *Swarm and Evolutionary Computation*, 13, 63-73.
- Nielsena, L.; Andersena, K.A. y Pretolam, D. (2014). Ranking paths in stochastic time-dependent networks. *European Journal of Operational Research*, 236, 903-914.
- Palhazi, D.; Goos, P.; Sörensen, K. y Arráiz, E. (2014). An iterated local search algorithm for the vehicle routing problem with backhauls. *European Journal of Operational Research*, 237, 454-464.
- Peña, M.; Osorio, J.C. y Arias, D. (2010). Formulación de un modelo para priorización de despacho de producto terminado en empresas manufactureras usando QFD – FUZZY. En: *XVI International Conference On Industrial Engineering And Operations Management*.

Saaty, T. (1990). How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9-26.

Shen, S.Y. y Honda, M. (2009). Incorporating lateral transfers of vehicles and inventory into an integrated replenishment and routing plan for a three-echelon supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, 56, 754-775.

Vinodh, S.; Prasanna, M. y Prakash, N.H. (2014). Integrated Fuzzy AHP-TOPSIS for selecting the best plastic recycling method: A case study. *Applied Mathematical Modeling*, 38, 4662-4672.

Villareal, E. y Arango, D.A. (2014). Estrategias para el entrenamiento de redes neuronales de números difusos. *Revista Tecnura*, 18(40), 36-47.





Procesamiento en paralelo y distribuido en dos SGBDS: un caso de estudio

Parallel and distributed processing in two SGBDS: A case study

Francisco Javier Moreno Arboleda¹, Nataly Castrillón Charari², Camilo Taborda Zuluaga³

Fecha de recepción: 8 de agosto de 2016

Fecha de aceptación: 15 de febrero de 2017

Cómo citar: Moreno A., F.J.; Castrillón C., N. y Taborda Z., C. (2017). Procesamiento en paralelo y distribuido en dos SGBDS: un caso de estudio. *Revista Tecnura*, 21(52), 111-129. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.2.a09

Resumen

Contexto: Una de las estrategias para la gestión de grandes volúmenes de datos es la computación distribuida y en paralelo. Entre las herramientas que permiten aplicar estas características se encuentran algunos sistemas de gestión de bases de datos (SGBD), como Oracle, SQL Sever y DB2.

Método: En este artículo se presenta un caso de estudio donde se evalúa el rendimiento de una consulta SQL en dos de estos SGBD. La evaluación se hace mediante diversas formas de distribución de los datos en una red computadores y con diferentes grados de paralelismo.

Resultados: Aunque son necesarias pruebas más exhaustivas y con mayor variedad de consultas, se evidenciaron las diferencias de rendimiento entre los dos SGBD analizados.

Conclusiones: Las diferencias en rendimiento de los dos SGBDs analizados muestran que a la hora de evaluar este aspecto, se deben considerar las particularidades de cada SGBD y el grado de paralelismo de las consultas.

Palabras clave: Bases de datos, paralelismo, computación distribuida.

Abstract

Context: One of the strategies for managing large volumes of data is distributed and parallel computing. Among the tools that allow applying these characteristics are some Data Base Management Systems (DBMS), such as Oracle, DB2, and SQL Server.

Method: In this paper we present a case study where we evaluate the performance of an SQL query in two of these DBMS. The evaluation is done through various forms of data distribution in a computer network with different degrees of parallelism.

Results: The tests of the SQL query evidenced the performance differences between the two DBMS analyzed. However, more thorough testing and a wider variety of queries are needed.

Conclusions: The differences in performance between the two DBMSs analyzed show that when evaluating this aspect, it is necessary to consider the particularities of each DBMS and the degree of parallelism of the queries.

Keywords: Databases, Parallelism, Distributed computing.

- 1 Ingeniero de sistemas, doctor en Ingeniería de Sistemas. Docente de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Medellín, Colombia. Contacto: fjmoreno@unal.edu.co
- 2 Ingeniero de sistemas, doctor en Ingeniería de Sistemas. Docente de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Medellín, Colombia. Contacto: fjmoreno@unal.edu.co
- 3 Ingeniero de sistemas e informática, arquitecto desarrollador de Ceiba Software House. Medellín, Colombia. Contacto: ctabordaz@unal.edu.co

INTRODUCCIÓN

En la última década, los volúmenes de datos generados y procesados por las aplicaciones se han incrementado de manera significativa. Por ejemplo, hay aplicaciones que han generado exabytes (un *exabyte* equivale a 10^{18} bytes) de datos provenientes de sensores, con cientos de millones de datos espaciales, temporales y de redes sociales (Cheng, Caverlee, Lee y Sui, 2011). El procesamiento distribuido y en paralelo es una alternativa para gestionar estos grandes volúmenes de datos, los cuales pueden provenir de aplicaciones como *chats*, *blogs*, servicios de correo, redes sociales (datos como *tuits*), entre otros. En particular Hadoop (<http://hadoop.apache.org>) es uno de los sistemas más usados para este propósito. Por otro lado, están los sistemas de gestión de bases de datos (SGBD) convencionales. Entre estos se destacan por su posicionamiento en el mercado: Oracle, SQL Server y DB2, los cuales incluyen también opciones para explotar el procesamiento distribuido y en paralelo.

En este artículo, se presenta un caso de estudio donde se analiza el rendimiento de Oracle y de SQL Server considerando estas opciones. Este análisis puede ser valioso para los desarrolladores si se consideran: i) los grandes volúmenes de datos estructurados que se deben gestionar hoy; ii) los pocos estudios comparativos al respecto (de hecho, no se encontró ningún trabajo que compare estos SGBD), incluso muy pocos evalúan el desempeño del paralelismo en un solo SGBD y los pocos que lo hacen (Burlison, 2005; Microsoft, 2015; ORACLE, 2014b, 2014c) no son recientes (se hicieron con versiones antiguas del SGBD) o son publicados por la misma compañía fabricante del SGBD, lo que puede restarle objetividad y generar sesgos, y iii) la poca documentación que existe para el diseño de pruebas de distribución y de paralelismo en SGBD. En cuanto a este aspecto, aunque las pruebas consideradas no son complejas ni exhaustivas, sí ofrecen un punto de partida para la elaboración de un conjunto de pruebas en un ambiente

mayor, por ejemplo, en una red (*cluster*) con cientos de procesadores.

El artículo está estructurado así. En Paralelismo: conceptos esenciales, se presentan los conceptos esenciales del paralelismo. En Elementos para el procesamiento de consultas distribuidas y en paralelo en Oracle, se presentan algunos conceptos particulares de Oracle para llevar a cabo consultas distribuidas y en paralelo. En Metodología y experimentos, se presenta el caso de estudio y en Resultados los resultados de los experimentos. En Trabajos relacionados, se exponen trabajos relacionados y en Conclusiones, se concluye el artículo y se plantean trabajos futuros.

Paralelismo: conceptos esenciales

El paralelismo permite que varios procesadores cooperen para la ejecución de un proceso. Usualmente, uno de los procesadores, denominado *coordinador* o *maestro*, distribuye las operaciones y recibe los resultados de los otros procesadores, denominados *esclavos* (Deepak, Kumar, Durgesh y Bhupendra, 2012; ORACLE, 2014b). El coordinador también suele ejecutar las operaciones no paralelas del proceso y puede actuar también como esclavo (Oracle, 2014b).

En Silberschatz, Korth y Sudarsham (2011) el paralelismo se clasifica en paralelismo de *intraoperación* y de *interoperación*. El primero permite que una operación de un proceso se ejecute de forma simultánea mediante n procesadores donde cada uno suele operar sobre un conjunto *diferente* de datos; n se denomina *grado de paralelismo* (Oracle, 2014b) (en inglés se denomina DOP, *degree of parallelism*). Por ejemplo, considérese la siguiente consulta en SQL donde “*cédula*” es un atributo numérico:

```
SELECT *  
FROM empleado  
ORDER BY cedula;
```

Supóngase que se tienen cuatro procesadores P_1 , P_2 , P_3 y P_4 para ejecutar esta consulta

en paralelo. La operación de ordenamiento (“ORDER BY cédula”) se puede ejecutar mediante paralelismo de intraoperación (aquí se supone que *no* existe un mecanismo previo de ordenamiento de las filas de la tabla empleado según el atributo cédula, por ejemplo, mediante un índice B+). En este ejemplo, la operación se va a distribuir entre tres procesadores P_1 , P_2 y P_3 (el P_4 va a actuar solo como coordinador). El coordinador distribuye entonces los datos entre los tres procesadores. Por ejemplo, véase la figura 1, las cédulas entre 1 y 4 para el procesador P_1 , las cédulas entre 5 y 8 para el procesador P_2 y las cédulas entre 9 y 12 para el procesador P_3 . Esta división se conoce como *división por rangos* (Sadat y Lecca, 2009). Cada uno de los tres procesadores (P_1 , P_2 y P_3) ordena localmente sus datos y los envía al coordinador, el cual los imprime (para iniciar la impresión, el coordinador debe esperar los datos ya ordenados de P_1 , luego los de P_2 y finalmente los de P_3).

La tabla “empleado” puede estar en un disco compartido (cada procesador tiene acceso a él); de no ser así, el coordinador debe enviar a cada procesador su correspondiente partición (Akl, 1989).

Por otro lado, el paralelismo de interoperación permite que *diferentes operaciones* de un proceso se puedan ejecutar simultáneamente. El paralelismo de interoperación se clasifica a su vez en *canalizado (pipelining)* e *independiente* (Silberschatz, Korth y Sudarsham, 2011). El paralelismo canalizado permite que una operación B trabaje con los resultados que genera una operación A , así las dos operaciones trabajan simultáneamente (Silberschatz, Korth y Sudarsham, 2011). Por ejemplo, sea A la operación de reunión (*join* representada con el símbolo \bowtie) de dos relaciones r y s , y sea B la operación de impresión de los resultados de la reunión. De esta forma, un procesador se puede encargar de ejecutar la reunión (operación A) y a medida que

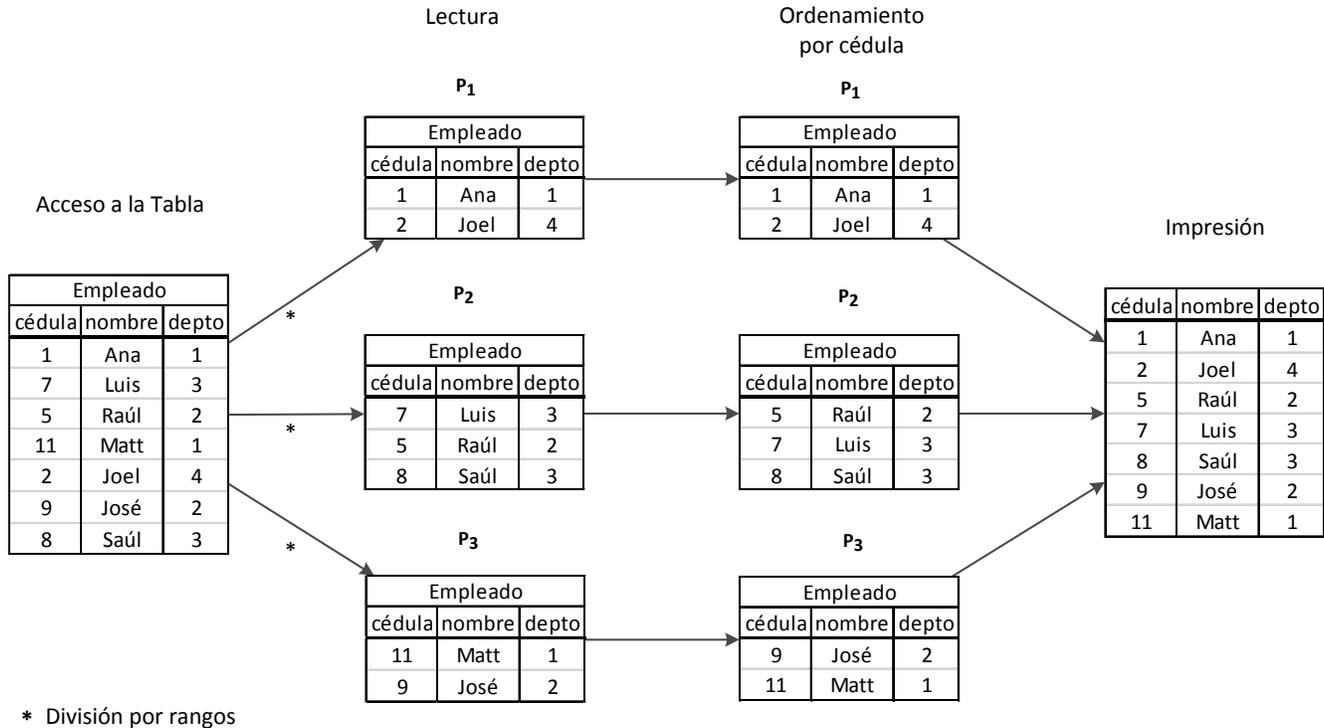


Figura 1. Paralelismo en consulta de ordenamiento

Fuente: elaboración propia

va generando resultados los va enviando al procesador que los imprime (operación *B*).

Por su parte, el paralelismo independiente permite que una operación *A* y una operación *B* se ejecuten simultáneamente, siempre y cuando ninguna de las dos operaciones necesite datos de la otra (Burlson, 2005; Silberschatz et al., 2011). Por ejemplo, considérese la reunión de cuatro relaciones $r \bowtie s \bowtie t \bowtie u$. Aquí, es posible que un procesador ejecute $temp1 \leftarrow r \bowtie s$ (operación *A*) mientras otro procesador ejecuta $temp2 \leftarrow t \bowtie u$ (operación *B*); y el resultado final está dado por $temp1 \bowtie temp2$.

Elementos para el procesamiento de consultas distribuidas y en paralelo en Oracle

A continuación, se explican algunos conceptos necesarios para comprender los experimentos ejecutados.

Database link

En Oracle un *database link* es un elemento de una base de datos (BD) (local) que permite acceder a los datos de otra BD (Burlson-Consulting, 2014). A continuación se crea un *database link* llamado *conexión*:

```
CREATE DATABASE LINK conexion
CONNECT TO username
IDENTIFIED BY password
USING '(DESCRIPTION = (ADDRESS = (PRO-
TOCOL = TCP)
(HOST = 192.168.0.1)(PORT = 1521))
(CONNECT_DATA = (SID = ORCL)))';
```

Donde “username” y “password” corresponden al usuario de la BD remota, la cual está ubicada en la dirección IP 192.168.0.1 en el puerto 1521, y su nombre es ORCL. Por ejemplo, para acceder desde la BD local a una tabla departamento ubicada en la BD remota se ejecuta la siguiente consulta:

```
SELECT *
FROM departamento@conexion;
```

Limpieza de memoria cache

Cuando en un SGBD se ejecuta una consulta, los datos pueden quedar alojados en la memoria caché (de esta forma, si la consulta se repite se pueden evitar accesos a disco); estos datos se deben eliminar para evitar sesgos en los resultados de las pruebas ejecutadas. Por ejemplo, en Oracle se usan las siguientes dos sentencias (Burlson-Consulting, 2008; Oracle, s.f.):

```
ALTER SYSTEM FLUSH SHARED_POOL;
ALTER SYSTEM FLUSH BUFFER_CACHE;
```

La primera sentencia elimina planes de ejecución (Burlson-Consulting, 2013) y la segunda limpia la memoria caché de datos (Burlson-Consulting, 2014).

Hint

En Oracle, un *hint* permite modificar el plan de ejecución de una consulta SQL (Antognini, 2013; Oracle, 2014a). Los *hints* se especifican luego de la cláusula SELECT así:

```
SELECT /*+ hints */ *
FROM ...;
```

Para las consultas de los experimentos se usó el *hint* *PARALLEL*. Este permite especificar el DOP de una consulta:

```
/*+ PARALLEL(DOP) */
```

Si se omite el valor del DOP, por ejemplo, si solo se especifica */*+ PARALLEL */*, Oracle lo establece automáticamente (Harrison, 2000; Oracle, 2014c). Si el DOP es mayor al número de procesadores físicos disponibles entonces el optimizador puede limitarlo o puede generar procesadores virtuales (por ejemplo, un mismo procesador físico puede generar varios procesadores virtuales). En los experimentos, se ofrecen más detalles.

METODOLOGÍA

Las pruebas se ejecutaron en una red inalámbrica con tres computadores, conectados mediante un enrutador. En un computador, denominado central, se crearon dos *database links*, uno (com1) hacia el computador 1, y otro (com2) hacia el computador 2; análogamente en los computadores 1 y 2 se crearon los respectivos *database links* (central1 y central2) hacia el computador central.

Las especificaciones de los tres computadores fueron las siguientes. Cada uno tenía procesador de dos núcleos (dos físicos y dos lógicos, Intel Core i5-4200U @ 1.60-2.30GHz), memoria RAM de 8 GB, sistema operativo Windows 8.1 – 64 bits y SGBD Oracle Database 12c Enterprise Edition. Las especificaciones del enrutador fueron: marca D-Link, tipo DIR-300, velocidad de transferencia de datos 54Mbps y *switch* de cuatro puertos.

Tablas

Las tablas base para los experimentos fueron “empleado” y “departamento”.

CREATE TABLE departamento(codigo **NUMBER**(10) **PRIMARY KEY**,

nombred **VARCHAR**(10) **NOT NULL**);

CREATE TABLE empleado(cedula **NUMBER**(8) **PRIMARY KEY**,

nombre **VARCHAR**(8) **NOT NULL**,

depto **NUMBER**(10) **NOT NULL**,

salario **NUMBER**(10) **NOT NULL**);

La tabla “departamento” se creó solo en el computador central y la tabla “empleado” se creó en los tres computadores. Sin embargo, un empleado solo se almacena en uno de los tres computadores; por ejemplo, la intersección de las cédulas entre las tres tablas de empleados es vacía (tabla empleado particionada) (figura 2).

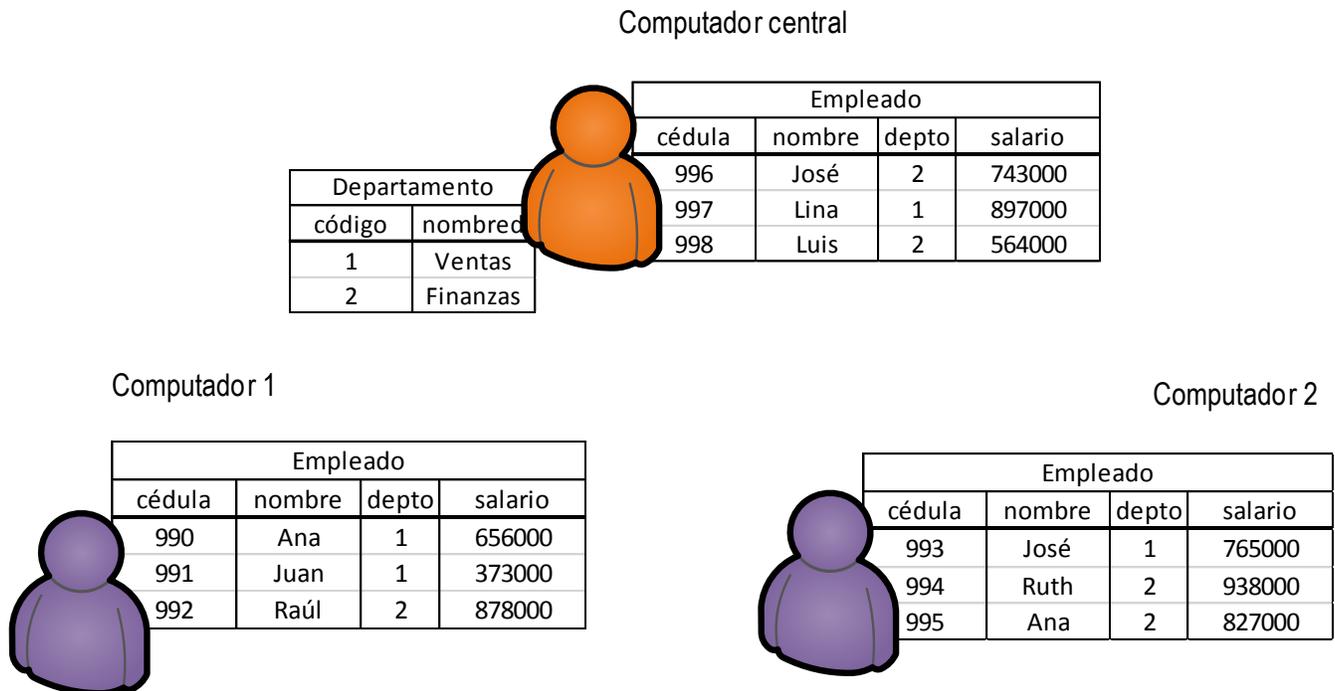


Figura 2. Distribución de datos

Fuente: elaboración propia.

Nótese que las tablas empleado y departamento están relacionadas por medio de los atributos “código” (de departamento) y “depto” (de empleado). No obstante, esta última columna “depto” (de empleado) *no se definió como clave foránea* con respecto a la columna “código de departamento” *debido a que la tabla departamento es remota* con respecto a las tablas de empleados de los computadores 1 y 2.

Consultas

Las consultas de los experimentos *se ejecutaron desde el computador central* y requirieron datos de las tablas de empleados de los computadores 1 y 2. Estos datos pueden ser enviados al computador central para que este ejecute todo el proceso de la consulta o el proceso puede ser *distribuido* y ejecutado entre los tres computadores, y cada computador remoto retornar los resultados de su procesamiento al computador central. Se consideraron cinco consultas las cuales *generan los mismos resultados*, pero difieren según la forma en que se ejecuta el proceso, el cual se controla mediante el *hint* PARALLEL y las vistas (explicadas más adelante) (Cervantes Ramírez, 2012). Las consultas imprimen el código, el nombre y el promedio de los salarios de cada departamento. Además, los resultados se ordenan ascendientemente según el código del departamento (columna “depto”).

Cada consulta se ejecutó con seis muestras de datos (ver tabla 1). Cada consulta con cada muestra

se ejecutó tres veces y se registró el valor promedio de las tres ejecuciones. Por ejemplo, en la muestra 1 se tenía una tabla departamento con 30.000 filas y tres tablas de empleados (una en cada computador) cada una con 300.000 filas.

Consulta 1. Procesamiento centralizado sin paralelismo en ningún computador
Considérese la consulta:

```
SELECT depto, nombred, salarioPromedio
FROM (SELECT depto, AVG(salario) AS
salarioPromedio
FROM (SELECT * FROM empleado@com1
UNION
SELECT * FROM empleado@com2
UNION
SELECT * FROM empleado)
GROUP BY depto), departamento
WHERE depto = codigo
ORDER BY depto;
```

El computador central (desde el cual se emite la consulta) recibe los datos de las tablas empleado del computador 1 y del computador 2, los une (UNION), ejecuta la subconsulta (agrupamiento por “depto”), luego ejecuta la reunión con su tabla “departamento” y ordena por “depto”. Aquí, los computadores 1 y 2 *se limitan* a enviar los datos al computador central donde se ejecutan las operaciones de agrupamiento, reunión y ordenamiento de la consulta.

Tabla 1. Número de filas de las muestras usadas en los experimentos

	Muestra					
	1	2	3	4	5	6
Departamento (solo en el computador central)	30000	60000	90000	120000	150000	180000
Empleado (en cada computador)	300000	600000	900000	1200000	1500000	1800000

Fuente: elaboración propia.

Consulta 2. Procesamiento centralizado con paralelismo en el computador central

Considérese ahora la consulta:

```

SELECT /*+ PARALLEL(3) */ depto, nombred,
AVG(salario)
FROM (SELECT /*+ PARALLEL(3) */ codigo,
nombred, e1.*
FROM empleado@com1 e1, departamento
WHERE e1.depto = codigo
UNION
SELECT /*+ PARALLEL(3) */ codigo, nombred, e2.*
FROM empleado@com2 e2, departamento
WHERE e2.depto = codigo
UNION
SELECT /*+ PARALLEL(3) */ código, nombred, ec.*
FROM empleado ec, departamento
WHERE ec.depto = codigo)
GROUP BY depto, nombred
ORDER BY depto;

```

Esta consulta es similar a la anterior, pero con el *hint* PARALLEL. Esto significa que las operaciones de la consulta se ejecutarán en el computador central *pero con paralelismo* en este (en la consulta anterior con DOP = 3). De nuevo, los computadores 1 y 2, se limitan a enviar sus datos al computador central.

Consulta 3. Procesamiento descentralizado, pero sin paralelismo en ningún computador

Se crea una vista en cada uno de los computadores como se explica a continuación. Considérese la vista creada en el computador 1:

```

CREATE OR REPLACE VIEW no_parallel_view_
c1 AS
SELECT depto, nombred, salarioPromedio
FROM (SELECT depto, AVG(salario) AS
salarioPromedio
FROM empleado
GROUP BY depto
), departamento@central1
WHERE depto = codigo;

```

Aquí, se agrupan los empleados del computador 1 por el atributo “depto” y se ejecuta la reunión con la tabla departamento *enviada desde el computador central* (por ejemplo, *la reunión se ejecuta en el computador 1*). En forma análoga, se crean también las vistas “no_parallel_view_c2” (en el computador 2) y “no_parallel_view_central” (en el computador central).

Luego las vistas son invocadas desde el computador central mediante la consulta:

```

SELECT *
FROM (SELECT depto, nombred,
AVG(salarioPromedio)
FROM (SELECT * FROM no_parallel_view_c1@
com1
UNION
SELECT * FROM no_parallel_view_c2@com2
UNION
SELECT * FROM no_parallel_view_central)
GROUP BY depto, nombred)
ORDER BY depto;

```

La diferencia con la consulta 1 es que los datos a unir (UNION) ya están agrupados (por “depto”) y reunidos con la tabla departamento. Sin embargo, al igual que en la consulta 1, las operaciones de unión (de los resultados de las vistas enviadas por los computadores 1, 2 y de los resultados de la vista local del computador central), agrupamiento (por “depto” y “nombred”) y ordenamiento por “depto” se terminan de ejecutar en el computador central.

Consulta 4. Procesamiento descentralizado y con paralelismo en los computadores 1 y 2

Se crea una vista en cada uno de los computadores como se explica a continuación. Considérese la siguiente vista creada en el computador 1:

```

CREATE OR REPLACE VIEW parallel_view_c1
AS
SELECT /*+ PARALLEL(3) */ depto, nombred,
salarioPromedio

```

```

FROM (SELECT /*+ PARALLEL(3) */ depto,
AVG(salario) AS salarioPromedio
FROM empleado
GROUP BY depto
), departamento@central1
WHERE depto = codigo;

```

Al igual que en la vista de la consulta 3, se agrupan los empleados del computador 1 por el atributo "depto" y se ejecuta la reunión (en el computador 1) con la tabla departamento *enviada desde el computador central*. Sin embargo, la diferencia con la consulta 3 está en el *hint* PARALLEL que fuerza a que la consulta que define la vista se ejecute con paralelismo (con DOP = 3) en el computador 1 (cuando la vista es invocada). De forma análoga ocurre para la vista "parallel_view_c2" del computador 2 y con la vista "parallel_view_central" del computador central.

Luego, las vistas son invocadas desde el computador central, mediante la consulta:

```

SELECT *
FROM (SELECT depto, nombred, AVG
(salarioPromedio)
FROM (SELECT * FROM parallel_view_c1@
com1
UNION
SELECT * FROM parallel_view_c2@com2
UNION
SELECT * FROM parallel_view_central)
GROUP BY depto, nombred)
ORDER BY depto;

```

Nótese que aunque la formulación de esta consulta es prácticamente igual a la de la consulta 3 (solo cambian los nombres de las vistas), aquí las consultas correspondientes a las vistas de los computadores 1 y 2 son ejecutadas *en paralelo en sus respectivos computadores* y sus resultados (ya agrupados por "depto" y ya reunidos con la tabla "departamento", la cual fue enviada desde el computador central a cada uno de estos dos

computadores) son enviados al computador central donde se termina de ejecutar la unión (UNION) de los resultados de las vistas, el agrupamiento final (por "depto" y "nombred") y el ordenamiento por "depto" (*sin* ejecutar paralelismo en el computador central).

Consulta 5. Procesamiento descentralizado con paralelismo en los tres computadores

Se usan las mismas vistas creadas para la consulta 4 y se invocan desde el computador central mediante la siguiente consulta:

```

SELECT /*+ PARALLEL(3)*/ *
FROM (SELECT /*+ PARALLEL(3) */ depto, nombred, AVG (salarioPromedio)
FROM (SELECT /*+ PARALLEL(3) */ * FROM
parallel_view_c1@com1
UNION
SELECT /*+ PARALLEL(3) */ * FROM parallel_
view_c2@com2
UNION
SELECT /*+ PARALLEL(3) */ * FROM
parallel_view_central)
GROUP BY depto, nombred)
ORDER BY depto;

```

La diferencia con la consulta 4 es que aquí el computador central termina de ejecutar la unión (UNION) de los resultados de las vistas, el agrupamiento final (por "depto" y "nombred") y el ordenamiento por "depto" *con paralelismo* (paralelismo ejecutado *en el computador central*), luego de recibir los datos de los computadores 1 y 2 ya agrupados por "depto" y ya reunidos con la tabla departamento (*la cual fue enviada a estos dos computadores desde el computador central*). Nótese que en los computadores 1 y 2 también se ejecuta paralelismo *en cada uno* de ellos para generar sus correspondientes resultados, como en la consulta 4.

En la tabla 2 se ilustra cada una de las cinco consultas.

Tabla 2. Flujo de datos y de operaciones de cada consulta

<p>Consulta 1</p> <p>Centralizado sin paralelismo:</p> <p>UNION Tablas Empleado GROUP BY depto ⌘ Empleado y Departamento ORDER BY depto</p>	
<p>Consulta 2</p> <p>Centralizado con paralelismo (en el computador central):</p> <p>⌘ de cada Tabla Empleado con Departamento UNION reuniones anteriores GROUP BY depto, nombred ORDER BY depto</p>	
<p>Consulta 3</p> <p>Descentralizado sin paralelismo (en cada computador):</p> <p>GROUP BY depto ⌘ con Departamento (computador central)</p> <p>Sin paralelismo (en el computador central):</p> <p>UNION Vistas no_parallel_view GROUP BY depto, nombred ORDER BY depto</p>	
<p>Consulta 4</p> <p>Descentralizado con paralelismo (en los computadores 1 y 2):</p> <p>GROUP BY depto ⌘ con Departamento (computador central)</p> <p>Con paralelismo (en el computador central):</p> <p>UNION Vistas parallel_view GROUP BY depto, nombred ORDER BY depto</p>	
<p>Consulta 5</p> <p>Descentralizado con paralelismo (en los tres computadores):</p> <p>GROUP BY depto ⌘ con Departamento (computador central)</p> <p>Con paralelismo (en el computador central):</p> <p>UNION Vistas parallel_view GROUP BY depto, nombred ORDER BY depto</p>	

Fuente: elaboración propia.

RESULTADOS

En la tabla 3 y en la figura 3 se presentan los resultados de los experimentos.

Tabla 3. Resultados de la ejecución de pruebas

Consulta	Muestra	Tiempo primera ejecución (s)	Tiempo segunda ejecución (s)	Tiempo tercera ejecución (s)	Tiempo promedio ejecuciones (s)
1	1	18,67	17,93	22,05	19,55
	2	31,18	31,75	27,12	30,02
	3	43,63	44,01	43,92	43,85
	4	56,32	54,67	51,89	54,29
	5	83,70	70,82	71,40	75,31
	6	111,43	117,27	114,87	114,52
2	1	17,04	23,21	25,40	21,88
	2	33,44	27,13	32,27	30,95
	3	52,38	46,22	47,62	48,74
	4	56,93	59,60	60,10	58,88
	5	64,87	62,49	67,29	64,88
	6	68,59	69,39	68,71	68,90
3	1	16,71	20,08	18,00	18,26
	2	27,42	29,14	29,53	28,70
	3	34,65	41,62	38,04	38,10
	4	51,55	53,69	50,21	51,82
	5	58,64	65,69	62,28	62,20
	6	75,64	82,78	88,65	82,36
4	1	20,89	20,65	17,54	19,69
	2	28,69	28,35	29,71	28,92
	3	46,08	41,55	42,01	43,21
	4	46,39	45,92	49,61	47,31
	5	58,81	53,16	56,34	56,10
	6	64,69	66,23	67,29	66,07
5	1	17,78	16,29	17,69	17,25
	2	30,02	29,60	29,24	29,62
	3	34,42	37,28	44,89	38,86
	4	50,48	52,27	44,03	48,93
	5	59,53	71,08	66,11	65,57
	6	109,33	89,15	98,81	99,10

Fuente: elaboración propia.

Para el menor tamaño de muestra, el tiempo de ejecución de las cinco consultas fue prácticamente el mismo. A partir de la muestra 5, las consultas 2 y 4 obtuvieron un menor tiempo de ejecución. Con la muestra mayor, la 6, las consultas 1 y 5 registraron los tiempos de ejecución más altos, esto sugiere que el costo del paralelismo puede ser igual o

más alto que el procesamiento secuencial; de hecho, hay operaciones que no conviene ser paralelizadas o que su ejecución secuencial es difícil de superar (Cervantes Ramírez, 2012). Los costos de coordinación y de comunicación, los volúmenes de datos y el número de procesos en paralelo son decisivos a la hora de elegir una alternativa.

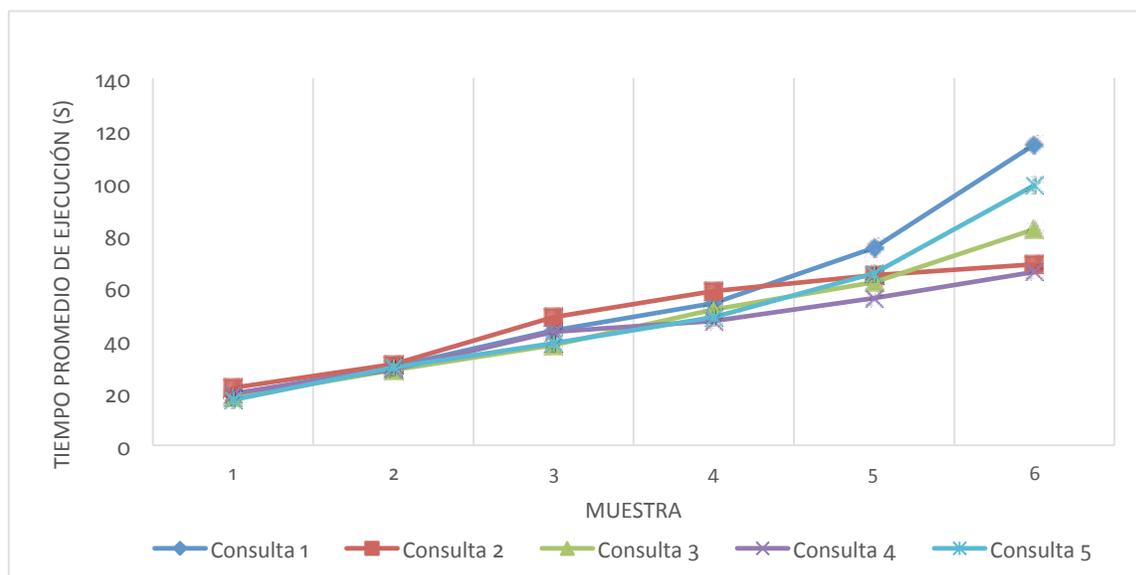


Figura 3. Comparación del tiempo promedio de ejecución de las cinco consultas

Fuente: elaboración propia.

Experimentos con variación en el DOP

Para la ejecución de consultas con paralelismo, se recomienda usar como DOP el número total de procesadores que posee el computador, tanto los físicos como los lógicos (Oracle, 2014b). Otras fuentes recomiendan que el DOP debe corresponder al número total de procesadores – 1, con el fin de dejar un procesador como coordinador de la consulta (Burlerson-Consulting, 2012). Un DOP menor o mayor al recomendado puede afectar negativamente el desempeño de la consulta. Por ejemplo, si se ejecuta una consulta, con un DOP recomendado igual a 4 y luego con un DOP igual a 200, el rendimiento entre las dos consultas será muy distinto: la generación y coordinación

de los 200 procesos de las segunda consulta afectarán negativamente su tiempo de respuesta. Por ello, el DOP óptimo se suele encontrar mediante pruebas para cada *consulta específica* (Baskan y Oracle, 2015; Burlerson-Consulting, 2012). A continuación, se muestran los resultados de los experimentos con tres DOP.

Como se expuso en Metodología y experimentos, cada computador usado en los experimentos posee cuatro procesadores (dos físicos y dos lógicos). Se usaron los siguientes DOP: 3, 6 y 9. Los resultados para DOP = 3 se presentaron en la tabla 3. Los resultados con DOP = 6 y con DOP = 9 se muestran en las tablas 4 y 5. En las figuras 4, 5 y 6 se comparan los resultados para las consultas con paralelismo (consultas 2, 4 y 5).

Tabla 4. Resultados de la ejecución de pruebas con DOP = 6

Consulta	Muestra	Tiempo primera ejecución (s)	Tiempo segunda ejecución (s)	Tiempo tercera ejecución (s)	Tiempo promedio ejecuciones (s)
2	1	14,01	13,71	12,04	13,25
	2	22,50	21,46	21,50	21,82
	3	35,68	31,92	33,73	33,78
	4	43,46	45,60	42,01	43,69
	5	52,53	52,21	52,23	52,32
	6	62,21	62,39	65,84	63,48
4	1	24,97	21,38	20,12	22,16
	2	32,84	32,63	36,17	33,88
	3	36,96	38,69	36,28	37,31
	4	49,69	44,45	45,91	46,68
	5	55,79	59,42	55,89	57,03
	6	68,46	67,20	71,69	69,12
5	1	19,40	16,85	17,88	18,04
	2	26,73	28,25	27,85	27,61
	3	44,75	37,98	39,66	40,80
	4	46,11	48,84	50,03	48,33
	5	65,74	59,44	58,62	61,27
	6	74,35	69,29	76,49	73,38

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Resultados de la ejecución de pruebas con DOP = 9

Consulta	Muestra	Tiempo primera ejecución (s)	Tiempo segunda ejecución (s)	Tiempo tercera ejecución (s)	Tiempo promedio ejecuciones (s)
2	1	12,03	14,95	15,51	14,16
	2	23,37	26,82	24,51	24,90
	3	35,66	33,68	34,23	34,52
	4	42,26	43,84	46,61	44,24
	5	53,21	53,36	53,87	53,48
	6	62,56	60,67	61,47	61,57
4	1	22,60	22,03	23,13	22,59
	2	38,67	35,94	34,22	36,28
	3	47,93	46,93	48,45	47,77
	4	53,02	57,02	54,40	54,81
	5	72,02	70,32	74,45	72,26
	6	82,52	84,25	79,36	82,04
5	1	22,38	23,29	23,20	22,96
	2	32,30	34,68	33,61	33,53
	3	47,68	42,83	50,00	46,84
	4	61,28	60,78	62,34	61,47
	5	75,78	69,42	68,67	71,29
	6	81,87	81,34	84,06	82,42

Fuente: elaboración propia.

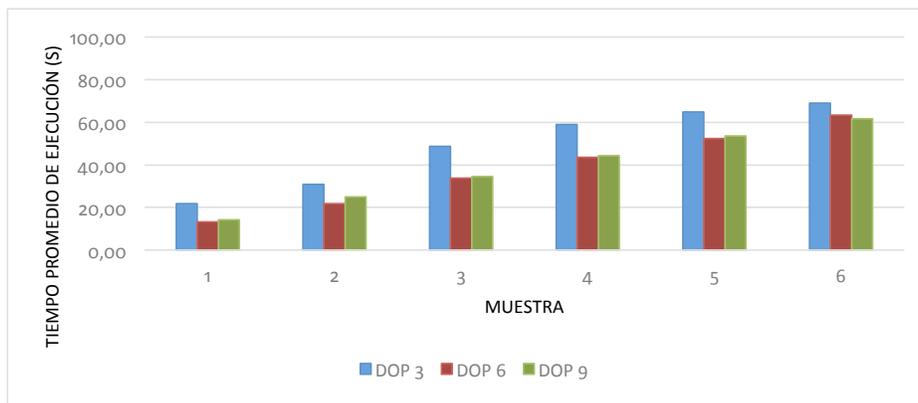


Figura 4. Comparación de los tiempos obtenidos en la consulta 2 para da DOP

Fuente: elaboración propia.

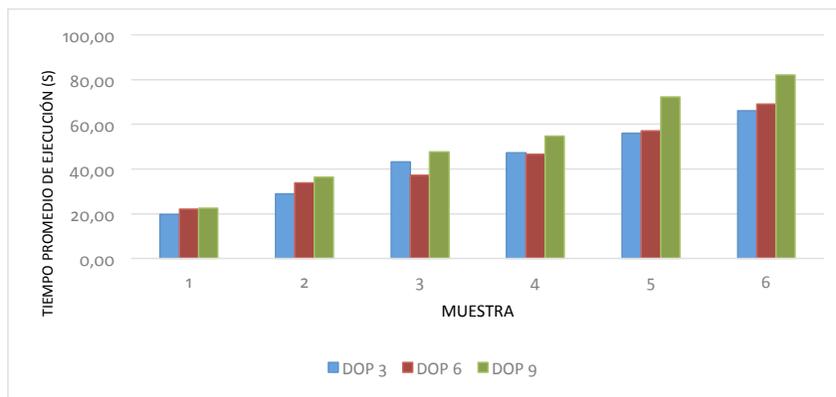


Figura 5. Comparación de los tiempos obtenidos en la consulta 4 para cada DOP

Fuente: elaboración propia.

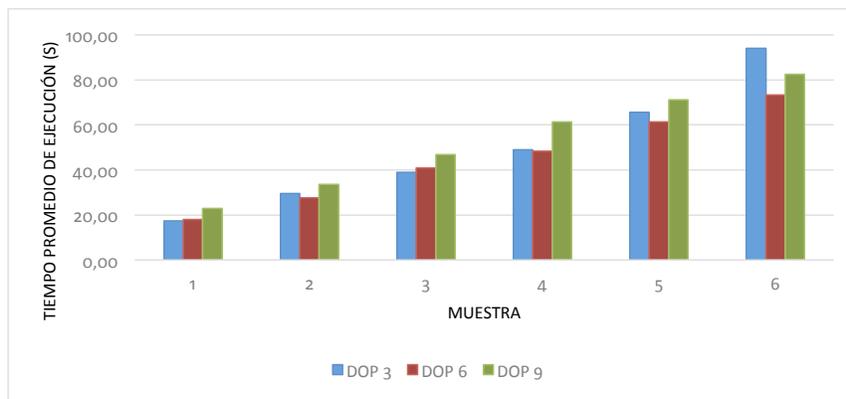


Figura 6. Comparación de los tiempos obtenidos en la consulta 5 para cada DOP

Fuente: elaboración propia.

Como se observa, el DOP óptimo depende de cada consulta. Por ejemplo, para la consulta 4, el DOP que ofreció el mejor desempeño fue el DOP = 3, mientras que para la 5, el mejor fue el DOP = 6. Para la consulta 2, se evidenció que el DOP = 3 es menos eficiente que el DOP = 6 o el DOP = 9. No obstante, el tiempo de ejecución para las consultas con DOP = 6 o DOP = 9 suele crecer más rápido que el tiempo de ejecución para las consultas con DOP = 3, a medida que aumentan los tamaños de muestra. Así, para tamaños de muestra más grandes, el DOP 3 fue más eficiente.

Oracle vs SQL Server

Con el fin de comparar los tiempos de respuesta que ofrecen Oracle 12c y SQL Server 2014 se hicieron los siguientes experimentos. Se compararon estos dos SGBD porque, además de soportar paralelismo, son dos de los de mayor posicionamiento en el mercado (Solid-IT y DB-Engines, 2015).

Las condiciones de los experimentos siguen las descritas en Metodología y experimentos. Se ejecutaron dos consultas:

- La primera consulta corresponde a la consulta 1 presentada en el aparte Consultas y con los datos (departamentos y empleados) distribuidos como allí se explica.

- En la segunda consulta, todos los empleados y todos los departamentos se encuentran en el computador central; por tanto, *los computadores 1 y 2 no participan de la consulta*. Además, se usó el *hint* PARALLEL en Oracle (y MAXDOP en forma correspondiente en SQL Server), por ejemplo, la consulta se ejecuta con paralelismo en el computador central. A esta consulta se le denominará consulta 6 y se esquematiza en la figura 7.

La razón por la que se usan estas consultas para las pruebas de los dos SGBD es que el procesamiento en paralelo y distribuido simultáneamente tiene limitaciones en SQL Server, al menos en la versión trabajada (2014).

Consulta sobre datos remotos sin paralelismo
 Considérese la consulta 1 en SQL Server:

```

SELECT depto, nombre, salarioPromedio
FROM (
SELECT depto, AVG(salario) AS salarioPromedio
FROM ( SELECT * FROM [com1].master.dbo.
empleado
UNION
SELECT * FROM [com2].master.dbo.empleado
UNION
SELECT * FROM dbo.empleado
) AS t0
    
```

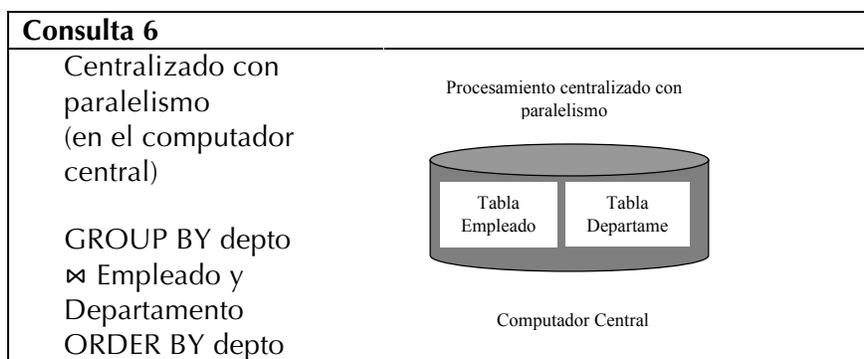


Figura 7. Flujo de datos y de operaciones de la consulta 6

Fuente: elaboración propia.

```

GROUP BY depto
) AS t1, dbo.departamento
WHERE depto = codigo
ORDER BY depto;
GO
    
```

Y considérese la misma consulta en Oracle (la consulta 1 presentada en el aparte Consultas). En la figura 8 se presentan los resultados.

Consulta sobre datos locales con paralelismo

Considérese ahora la consulta 6 en SQL Server:

```

SELECT depto, nombre, salarioPromedio
FROM (
SELECT depto, AVG(salario) AS salarioPromedio
FROM dbo.empleado
GROUP BY depto
) AS t1, dbo.departamento
WHERE depto = codigo
ORDER BY depto
OPTION (MAXDOP 4)
    
```

Y considérese la misma consulta en Oracle (en la consulta anterior se quita `OPTION (MAXDOP 4)` y se adiciona al `SELECT` principal el `hint /*+ PARALLEL(4)`). En la figura 9 se presentan los resultados.

Como se explicó en el aparte Experimentos con variación en el DOP, algunos autores recomiendan usar como DOP el número total de procesadores del sistema. En particular, en SQL Server si el `MAXDOP` es mayor al número de procesadores del computador, *este lo ignora* y solo usa el número de procesadores disponibles (Microsoft, 2015).

En el experimento, el computador central tenía cuatro procesadores; por consiguiente, el DOP que siempre eligió SQL Server fue 4. En ese sentido, para la comparación con las consultas paralelas en Oracle también se usó un `DOP = 4`. De otra parte, en SQL Server es posible establecer un umbral para el paralelismo: a cada consulta SQL Server le asigna un costo, si este supera el umbral establecido, la consulta se hace de manera paralela. Si se establece este umbral en el valor mínimo (1), se garantiza la ejecución en paralelo para todas las consultas.

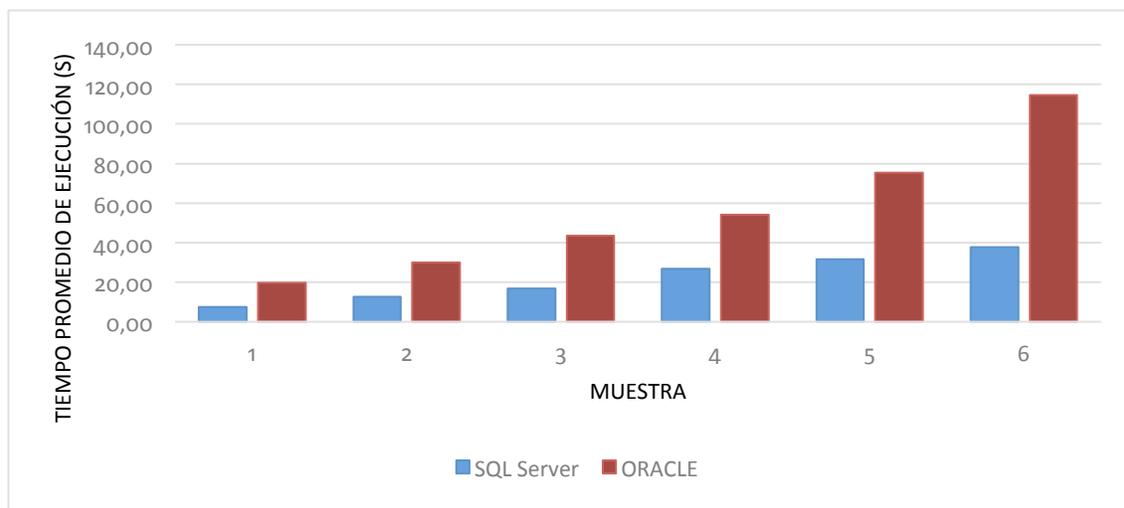


Figura 8. Comparación de los tiempos de la consulta 1 para cada SGBD

Fuente: elaboración propia.

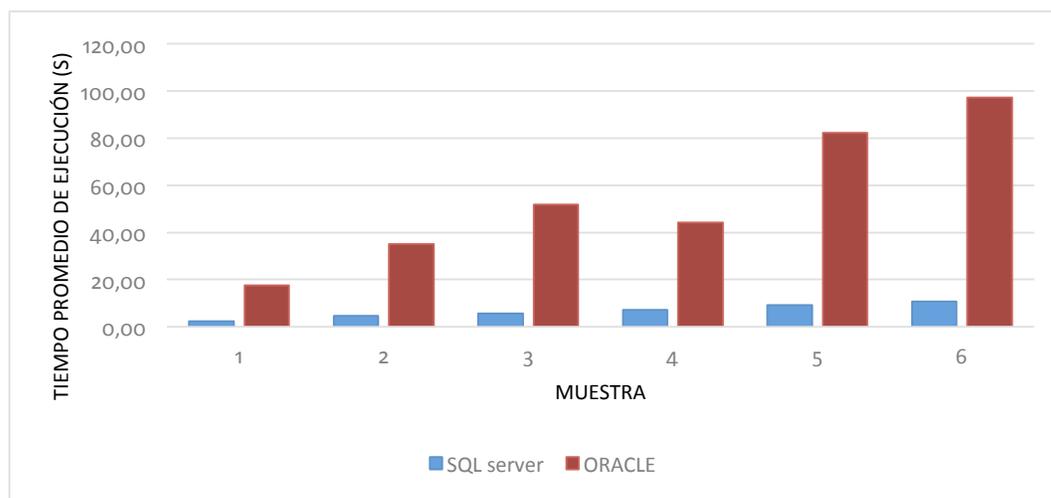


Figura 9. Comparación de los tiempos obtenidos en la consulta 6 para cada SGBD

Fuente: elaboración propia.

Como se aprecia en las figuras 8 y 9, SQL Server ofreció menores tiempos de respuesta para las dos consultas. Lo anterior puede estar relacionado con el sistema operativo Windows, ya que este y SQL Server son de la misma compañía. De hecho, algunos autores informan de mayores tardanzas en la ejecución de acciones de Oracle sobre Windows (Burluson-Consulting, 2009; Hussain, Farooq, Shamsudeen y Yu, 2013) que sobre otros sistemas operativos. Adicionalmente, De Carvalho y Mattos (2009) argumentan que, en casos donde el número de usuarios es pequeño o el sistema operativo es Windows, se obtiene un mejor desempeño con SQL Server que con Oracle o con PostgreSQL. Considerando lo anterior, y a partir de los experimentos con diferentes DOP en Oracle, se observó que SQL Server ofreció menores tiempos de ejecución que Oracle *sin importar* el DOP elegido en Oracle.

TRABAJOS RELACIONADOS

En los últimos años se han hecho varios estudios sobre el desempeño de las consultas con paralelismo en SGBD. En Cervantes (2012) se desarrolla

una investigación sobre cómo aplicar *GPU-computing (graphics processing unit)* para mejorar el tiempo de respuesta de las consultas en paralelo. Basándose en el plan de ejecución del SGBD SQLite (<http://www.sqlite.org>), las operaciones de dicho SGBD son programadas en la plataforma CUDA (NVIDIA, 2012; Hernández, Gaviria y Montenegro, 2014) donde son procesadas en una GPU. Así, se obtiene un motor de ejecución capaz de solucionar un subconjunto de operaciones del lenguaje SQL en paralelo (en particular, consultas unitabla, multitabla y con funciones de agregación). Por último, los autores concluyen que los tiempos de ejecución y procesamientos en la GPU son mucho menores que en la CPU. El motor desarrollado plantea una alternativa de desarrollo para SGBD con procesamiento en GPU.

Hong y Stonebraker (1993) presentan un enfoque para la optimización de consultas en XPRS (*eXtended Postgres on Raid and Sprite*), un SGBD paralelo multiusuario basado en una memoria compartida con varios procesadores. Los autores presentan una estrategia de optimización en dos fases: la primera es una optimización convencional que encuentre el plan óptimo secuencial y la

segunda encuentra la mejor “paralelización” del plan secuencial anterior. Además incluyen evidencia experimental a través de una serie de pruebas de rendimiento que les permite validar su estrategia de optimización.

Akal, Böhm y Schek (2002) se enfocan en las consultas OLAP (*online analytical processing*). Los autores hicieron numerosos experimentos para evaluar el desempeño de varias consultas. Como resultado, se llega al desarrollo de un optimizador en dos fases: en una primera, se divide una consulta en subconsultas las cuales son enviadas a cada nodo participante. Luego, en la segunda, cada nodo optimiza y evalúa su subconsulta. Como parte de sus resultados, los investigadores proveen una clasificación para las consultas OLAP, la cual es usada para decidir cuándo y cómo las consultas deberían ser paralelizadas.

Miranda, Lima, Valdúriez y Mattoso (2006) proponen el motor Apuama, el cual añade paralelismo para mejorar el rendimiento de las consultas OLAP en C-JDBC (*Clustered JDBC: c-jdbc.ow2.org*). Presentan pruebas de rendimiento para consultas OLAP sobre PostgreSQL, donde se demuestra que se mejora el proceso de lectura y el rendimiento de las operaciones de actualización para dichas consultas, con una mejora en el desempeño de manera lineal y en ciertos casos, de manera superlineal.

Lima, Furtado, Valdúriez y Mattoso (2009) presentan una propuesta para mejorar el desempeño de las aplicaciones OLAP en un DBC (*database cluster*). Se propone una estrategia de balanceo de cargas que toma ventaja de un particionamiento virtual adaptativo para redistribuir la carga. La validación experimental se hizo sobre SmaQSS (*smashing queries while shrinking disk space*). El DBC muestra que la estrategia es eficiente y obtiene unos resultados superlineales.

Garofalakis y Ioannidis (1997) analizan los problemas que suelen presentar las consultas en un entorno paralelo donde se comparte, entre otros, la memoria, el disco, el costo de comunicación remota entre los procesadores involucrados. Los autores revelan la complejidad detrás de

la programación distribuida para consultas paralelas. Se proponen algunos algoritmos heurísticos, algunos de ellos casi óptimos.

Finalmente, Stonebraker *et al.* (2010) exponen la importancia de combinar los SGBD paralelos y el paradigma de programación en paralelo MapReduce en la resolución de problemas analíticos complejos, argumentando que los DBMS paralelos son apropiados para el procesamiento eficiente de grandes volúmenes de datos, mientras que MapReduce es apropiado para las tareas analíticas complejas y de ETL (*extract, transform and load*). El resultado es un sistema más eficiente que combina lo mejor de ambos mundos.

CONCLUSIONES

En este artículo se presentó un caso de estudio donde se evaluó el desempeño de una consulta en dos SGBD. La consulta que incluía entre sus operaciones unión, reunión (*join*), agrupamiento y ordenamiento, se ejecutó en un ambiente distribuido y con diferentes grados de paralelismo; se evaluaron también diferentes formas de distribución del trabajo entre los computadores de la red (*cluster*). Aunque el caso de estudio es simple y se deben evaluar consultas más complejas (por ejemplo, una consulta que involucre varias reuniones), los resultados evidenciaron las diferencias de rendimiento entre los dos productos y cómo se afecta este según el grado del paralelismo y del número de procesadores usado. Incluso, algunos experimentos mostraron que en ocasiones el procesamiento secuencial puede ser más eficiente que un procesamiento en paralelo y distribuido. De hecho, a pesar de que existen modelos de costos (Rajaraman, Leskovec y Ullman, 2013; Silberschatz *et al.*, 2011) (que consideran factores como los costos de comunicación y de procesamiento en cada nodo de la red) que indican para una consulta u operación en particular a partir de que volumen de datos el procesamiento distribuido y en paralelo puede ser beneficioso, el rendimiento tan distinto de los dos SGBD analizados muestra que

existen otros factores que deben ser considerados (por ejemplo, el acople entre un producto (SGBD) y el sistema operativo parece ser decisivo así como las particularidades de cada SGBD) a la hora de evaluar el rendimiento.

Como trabajo futuro se planea evaluar la consulta en una red de más computadores y con muestras de datos mayores. También se planea comparar el rendimiento de los SGBD frente a sistemas como Hadoop y MongoDB, donde la programación distribuida y en paralelo se ejecuta mediante el paradigma de programación MapReduce. Otra línea de investigación es considerar la interacción del paralelismo con la computación ubicua (Sánchez, 2015).

REFERENCIAS

- Akal, F.; Böhm, K. y Schek, H.J. (2002). OLAP Query Evaluation in a Database Cluster: A performance Study on Intra-Query Parallelism. En: Y. Manolopoulos y P. Návrat (eds.). *Advances in Databases and Information Systems* (pp. 218–231). Zúrich: Springer Berlin Heidelberg.
- Akl, S.G. (1989). *The Design and Analysis of Parallel Algorithms*. Ontario, Canada: Prentice-Hall International Editions.
- Antognini, C. (2013). SQL Optimization Techniques. En: *Oracle Database 12c Performance Tuning Recipes*. Nueva York: Apress.
- Baskan, Y. y Oracle (2015). *Finding the Reason for DOP Downgrades*. Recuperado el 20 de enero de 2016 de: https://blogs.oracle.com/datawarehousing/entry/finding_the_reason_for_dop
- Burleson Consulting (2008). *Oracle: flush the data buffer cache*. Recuperado el 11 de febrero de 2015 de: http://www.dba-oracle.com/t_opq_parallel_query.htm
- Burleson-Consulting (2009). *The real costs of SQL Server vs. Oracle*. Recuperado el 20 de enero de 2016 de: http://www.dba-oracle.com/t_cost_sql_server_vs_oracle.htm
- Burleson-Consulting (2012). *Oracle parallel hint tips*. Recuperado el 20 de enero de 2016 de: https://blogs.oracle.com/datawarehousing/entry/finding_the_reason_for_dop
- Burleson-Consulting. (2013). *Flush shared pool tips*. Recuperado el 11 de febrero de 2015 de: http://www.dba-oracle.com/10g_flush_shared_pool.htm
- Burleson-Consulting. (2014). *Oracle SQL performance with database links–db link*. Recuperado el 12 de febrero de 2015 de: http://www.dba-oracle.com/t_sql_dblink_performance.htm
- Burleson, D. (2005). *Inside Oracle Parallel Query*. Recuperado el 12 de febrero de 2015 de: http://www.dba-oracle.com/t_opq_parallel_query.htm
- Cervantes R., A.O. (2012). Paralelización de un subconjunto de consultas SQL con unión natural utilizando una GPU. Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional, Mexico D.F.
- Cheng, Z.; Caverlee, J.; Lee, K. y Sui, D.Z. (2011). Exploring Millions of Footprints in Location Sharing Services. En: *Fifth International AAAI Conference on Weblogs and Social Media* (pp. 81–88). Barcelona, España.
- De Carvalho S., R. y Mattos M., L.A. (2009). *Estudo Comparativo dos Sistemas Gerenciadores de Bancos de Dados: Oracle, SQL Server e PostgreSQL*. Informe técnico. Universidade Presidente Antônio Carlos, Barbacena.
- Deepak, S.; Kumar, S.U.; Durgesh, M. y Bhupendra, P. (2012). Query Processing and Optimization of Parallel Database System in Multi Processor Environments. In *Sixth Asia Modelling Symposium* (pp. 191-194). Bali: IEEE. <http://doi.org/10.1109/AMS.2012.49>
- Garofalakis, M. y Ioannidis, Y. (1997). Parallel Query Scheduling and Optimization with Time–and Space–Shared Resources. *Proceedings of the 23rd VLDB Conference Athens, Greece, 1, 1–10*.
- Harrison, G. (2000). *Oracle Sql High Performance Tuning*. 2a. ed. Boston: Prentice Hall.
- Hernández, E.; Gaviria, G. de J.M. y Montenegro, C.E. (2014). Parallel programming languages on heterogeneous architectures using OPENMPC, OMPSS, OPENACC an *Revista Tecnura, 18* (Edición especial doctorado), 160-170.

- OPENMP. Hong, W. y Stonebraker, M. (1993). Optimization of Parallel Query Execution Plans in XPRS. *Distributed and Parallel Databases*, 1 (1), 9-32.
- Hussain, S.J.; Farooq, T.; Shamsudeen, R. y Yu, K. (2013). *Expert Oracle RAC 12c*. Nueva York: Apress.
- Lima, A.; Furtado, C.; Valdúriez, P. y Mattoso, M. (2009). Parallel OLAP query processing in database clusters with data replication. *Distributed and Parallel Databases*, 25 (1), 97-123.
- Microsoft (2015). *Recommendations and guidelines for the "max degree of parallelism" configuration option in SQL Server*. Recuperado el 20 de enero de 2016 de: <https://support.microsoft.com/en-us/kb/2806535>
- Miranda, B.; Lima, A.A.B.; Valdúriez, P. y Mattoso, M. (2006). Apuama: Combining Intra-query and Inter-query Parallelism in a Database Cluster. En: T. Grust et al. (eds.). *Current Trends in Database Technology – EDBT 2006* (pp. 649–661). Río de Janeiro: Springer Berlin Heidelberg.
- NVIDIA. (2012). *What is CUDA?* Recuperado el 10 de enero de 2016 de: http://www.nvidia.com/object/cuda_home_new.html
- Oracle (s.f.). *Alter System*. Recuperado el 11 de febrero de 2015 de: https://docs.oracle.com/database/121/SQLRF/statements_2017.htm#SQLRF00902
- Oracle (2014a). *About Optimizer Hints*. Recuperado el 11 de febrero de 2015 de: http://docs.oracle.com/database/121/TGSQL/tgsql_influence.htm#TGSQL255
- Oracle (2014b). *Parallel Execution with Oracle Database 12c Fundamentals*. Recuperado de: <http://www.oracle.com/technetwork/articles/datawarehouse/twp-parallel-execution-fundamentals-133639.pdf>
- Oracle (2014c). *Parallel_clause*. Recuperado el 11 de febrero de 2015 de: <http://docs.oracle.com/database/121/SQLRF/clauses006.htm#SQLRF20024>
- Rajaraman, A.; Leskovec, J. y Ullman, J.D. (2013). *Mining of Massive Datasets*. Londres: Cambridge University Press.
- Sadat, A.B.M.R.I. y Lecca, P. (2009). On the Performances in Simulation of Parallel Databases: An Overview on the Most Recent Techniques for Query Optimization. En: *International Workshop on High Performance Computational Systems Biology, 2009. HIBI '09* (pp. 113-117). Trento: IEEE. <http://doi.org/10.1109/HiBi.2009.25>
- Sánchez M., C.A. (2015). La computación ubicua: omnipresencia en los sistemas de información. *Revista Tecnura*, 19, 121-128.
- Silberschatz, A.; Korth, H.F. y Sudarsham, S. (2011). Parallel Databases. En: *Database System Concepts* (pp. 797–814). Nueva York: McGraw-Hill.
- Silva B., L. (2003). *Algoritmos heurísticos*. Valparaíso, Chile. Recuperado de: <http://www2.elo.utfsm.cl/~lsb/pascal/clases/cap25.pdf>
- Solid-IT y DB-Engines (2015). *DB-Engines Ranking*. Recuperado el 15 de agosto de 2015 de: <http://db-engines.com/en/ranking>
- Stonebraker, M.; Abadi, D.; Dewitt, D.; Madden, S.; Paulson, E.; Pavlo, A. y Rasin, A. (2010). MapReduce and Parallel DBMSs: Friends or Foes? *Communications of the ACM*, 53(1), 66-71.



Diagnóstico tecnológico del uso de dispositivos programables en la industria boyacense. Caso de estudio: cadena agroindustrial de la panela

Technological diagnosis of the use of programmable devices in the boyaca industry: Case study – panela's agroindustrial chain

Ilber Adonayt Ruge Ruge¹, Wilson Javier Pérez Holguín²

Fecha de recepción: 12 de agosto de 2016

Fecha de aceptación: 15 de febrero de 2017

Cómo citar: Ruge R., I.A. y Pérez H., W.J. (2017). Diagnóstico tecnológico del uso de dispositivos programables en la industria boyacense. Caso de estudio: cadena agroindustrial de la panela. *Revista Tecnura*, 21(52), 130-147. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.2.a09

Resumen

Contexto: En este artículo se describen los resultados de un proceso de diagnóstico tecnológico tendiente a identificar el nivel de incorporación de los dispositivos programables (microcontroladores) y de los dispositivos de lógica programable (CPLD y FPGA) en los procesos productivos del sector agroindustrial de la panela, en el departamento de Boyacá. Cabe resaltar que el sector agroindustrial es uno de los que más aportan al producto interno bruto del departamento y es uno de los más priorizados en términos del potencial de negocios y entorno económico favorable de acuerdo con el Plan Estratégico Departamental de Ciencia, Tecnología e Innovación del Departamento de Boyacá.

Método: La metodología empleada consistió en obtener un inventario tecnológico (máquinas, equipos e infraestructura informática) e identificar los activos tecnológicos de las empresas relacionadas.

Resultados: Para la fase de recolección de información se visitaron cuatro empresas productoras de panela ubicadas en la hoya del río Suarez, de las

cuales se encontró que solo una tienen un alto grado de automatización en sus procesos de producción, mientras que las otras presentan uno muy bajo o ninguno. La revisión de literatura evidenció que existen varias publicaciones en revistas indexadas en las que se describen importantes aportes al desarrollo del sector agroindustrial de la panela, aunque ninguno es realizado por universidades del departamento. En la etapa de análisis se identificaron las debilidades y oportunidades de las empresas del sector panelero en Boyacá.

Conclusiones: Todo lo anterior permitió definir un conjunto de propuestas de incorporación de las tecnologías programables para el desarrollo de proyectos de investigación, encaminados a cubrir las necesidades reales del sector panelero del departamento de Boyacá, tanto en el mejoramiento de los procesos de producción como en el de las condiciones de trabajo de las personas dedicadas a estas labores.

Palabras clave: diagnóstico tecnológico, dispositivos programables, dispositivos de lógica programable, producción de panela.

1 Ingeniero electrónico, magíster en Ingeniería de Control Industrial. Docente asistente de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, grupo de investigación I²E. Bogotá Tunja, Colombia. Contacto: ilber.ruge@uptc.edu.co

2 Ingeniero electrónico, magíster en Automatización, doctorado en Ingeniería. Docente asociado de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Grupo GIRA-UPTC. Bogotá Sogamoso, Colombia. Contacto: wilson.perez@uptc.edu.co

Abstract

Context: This paper describes the results of a technological diagnostic process aimed to identify the level of incorporation of programmable devices (e.g. microcontrollers) and programmable logic devices (e.g. CPLDs and FPGAs) in the productive processes of the *panela* agro-industrial sector in the Department of Boyacá. It should be noted that the agro-industrial sector is one of the largest contributors to the gross domestic product of the department and is one of the most prioritized in terms of business potential and favorable economic environment according to the Departmental Strategic Plan for Science, Technology and Innovation of the Department of Boyacá.

Method: The methodology used consists on to obtain a technological inventory (machines, equipment and IT infrastructure) and identify the technological assets of the related companies.

Results: During the information collection phase, four *panela* producer companies were visited, all of them located in the Hoya del Rio Suarez region, of which it

was found that only one presents a high degree of automation of its production processes, while the others have a very low or no automation. The literature review evidenced that there are several publications in indexed journals that describe important contributions on the development of the agro-industrial sector of *panela*, although none of them are made by universities of the department. In the analysis stage, the weaknesses and opportunities of the companies dedicated to producing *panela* in Boyacá were identified.

Conclusions: All of the above allowed defining a set of proposals for the incorporation of programmable technologies in the development of research projects aimed at meeting the real needs of the companies producing *panela* in the Department of Boyacá, both in the improvement of production processes as in the working conditions of the persons devoted to these tasks.

Keywords: technological diagnostic, programmable devices, programmable logic devices, *panela* producers.

INTRODUCCIÓN

La agroindustria se proyecta como un renglón importante para el desarrollo socio-económico del Departamento de Boyacá, dado el fuerte crecimiento de la demanda de alimentos frescos, semi-procesados y procesados, tanto en la región como en el país. Los países de América Latina presentan grandes diferencias tecnológicas con los países desarrollados, hecho que se evidencia en la capacidad de los primeros para absorber, imitar, adaptar e innovar tecnologías que puedan ser empleadas en sus diferentes procesos productivos, teniendo como punto de referencia las mejores prácticas internacionales de adaptación a la demanda y su correspondiente cambio tecnológico. De esta manera, es fundamental conocer el estado tecnológico de las diferentes industrias de la región para facilitar el planteamiento de proyectos de investigación que faciliten el mejoramiento de

los procesos productivos, y aprovechar las oportunidades que brindan los planes de desarrollo departamental y las políticas de fortalecimiento en ciencia, tecnología e innovación, tanto del departamento como de la nación.

Este artículo presenta los resultados de un diagnóstico orientado a identificar el tipo de tecnología empleada en las pequeñas y medianas empresas relacionadas con la industria panelera del departamento de Boyacá. Como consecuencia, se elabora una propuesta de desarrollo tecnológico en las áreas de control, automatización y sistemas de información, basada en el uso de dispositivos programables (como *microcontroladores*) o de lógica programable (como los dispositivos de lógica programable compleja, o CPLD, por sus siglas en inglés, y los arreglos de compuertas programables en campo, o FPGA, por sus siglas en inglés), de última generación, que propicie la generación, adopción y apropiación de dicha tecnología al

desarrollo de soluciones acordes a las necesidades reales del sector.

METODOLOGÍA

La identificación de las características del sector panelero del departamento de Boyacá parte del análisis de sus ventajas competitivas así como de las oportunidades derivadas de las políticas de impulso y participación de este sector en el producto interno bruto departamental, frente a sectores que tradicionalmente han tenido impacto en la economía del departamento, como el minero-energético, turismo y metalmecánico-metalúrgico, según lo establecido en el Plan Estratégico Departamental en Ciencia, Tecnología e Innovación de Boyacá 2022 (Ruiz, 2012).

La metodología empleada en este trabajo se fundamenta en las metodologías propuestas por Rodríguez (2011) y CIDEI (2007), en la realización de un inventario tecnológico y en la identificación de los activos tecnológicos disponibles en las empresas del sector panelero del departamento de Boyacá. Adicionalmente, se hace una búsqueda de las publicaciones o proyectos con aportes al desarrollo tecnológico de dichas empresas y que hayan sido producidos por los grupos de investigación de las universidades del departamento de Boyacá. Por último, se analiza el desarrollo e incorporación de soluciones tecnológicas en la industria panelera, cuya unidad de procesamiento principal se fundamenta en dispositivos programables (microcontroladores), o en dispositivos de lógica programable (CPLD y FPGA).

Identificación de sectores productivos

Dentro del Plan Estratégico Departamental de Ciencia, Tecnología e Innovación de Boyacá PEDCTI (Ruiz, 2012), se encuentra un análisis de brechas tecnológicas que definen los sectores productivos en los que el departamento de Boyacá tiene mayor ventaja competitiva. Este análisis evalúa la actividad empresarial de cada sector para

identificar tanto las capacidades existentes como las requeridas, para aumentar la competitividad en los ámbitos nacional e internacional. Los resultados de este análisis se convierten en el primer referente para identificar los sectores de interés a los cuales realizar el proceso de diagnóstico tecnológico objeto de este estudio.

Los criterios establecidos por los miembros del Concejo Departamental de Ciencia, Tecnología e Innovación (Codecti), actores económicos y equipo de trabajo del Observatorio Colombiano de Ciencia, Tecnología e Innovación (OCyT), para identificar los sectores predominantes son: “Ventajas comparativas, ventajas competitivas, sectores impulsados a través de ejercicios de política y participación en el producto interno bruto PIB Departamental” (Ruiz, 2012, p. 92).

De acuerdo con los resultados de los análisis sectoriales establecidos en el PEDCTI (Ruiz, 2012), los sectores en los que se cuenta con una ventaja comparativa son: agropecuario, explotación de minas y canteras, petrolero, artesanías y turismo histórico.

Política departamental y nacional para el impulso de sectores económicos

“Dentro de los esfuerzos departamentales por la identificación o caracterización de su estructura productiva y sus potencialidades se han realizado ejercicios que hoy constan en documentos que sirven de base para el planteamiento de políticas” (Ruiz, 2012, p. 94). La tabla 1 relaciona los documentos de política donde se establecen objetivos y retos para desarrollar ventajas competitivas y de productividad del sector productivo departamental.

En estos documentos se presenta de forma reiterada la necesidad de fomentar el desarrollo de los siguientes sectores, dadas las capacidades y fortalezas del departamento de Boyacá, de acuerdo con los enfoques y criterios de competitividad, transformación productiva y crecimiento del mercado mundial (Ruiz, 2012, p. 95).

Tabla 1. Documentos de política sobre priorización de sectores

Documento	Año
Estudio de Competitividad para Boyacá. Araujo & Ibarra Consultores	1998
Planes de Desarrollo Departamental (Londoño, 2004; Rozo, 2008; Granados, 2012)	¡Boyacá! Deber de todos (2004-2007)
	¡Para seguir creciendo! (2008-2011)
	Boyacá se atreve! (2012-2015)
Agenda de productividad y competitividad (Gómez, 2008)	2008
Política sector agropecuario departamento de Boyacá (Secretaría de Fomento Agropecuario, 2008)	2008
Agenda interna para la productividad y la competitividad: Documento Regional Boyacá (Rentería, 2007)	2007
Agenda prospectiva de Ciencia y Tecnología (Castellanos, 2004)	2004
Plan regional de competitividad de Boyacá 2008-2032 (Olano, 2007)	2007
Boyacá Visión 2019: Territorio de libertad y prosperidad bicentenario. Serie: Visión de desarrollo territorial departamental	2011

Fuente: elaboración propia.

Sectores con alta participación en el PIB departamental

En la caracterización económico-productiva del departamento, para el año 2010 el PIB departamental tuvo una participación del 2,6 % en el PIB nacional, con un crecimiento promedio de 3,7 % entre 2000 y 2010, un poco menor al nacional (4,1 %). El PIB nacional en este año fue de \$548.273 miles de millones. A nivel de población departamental, el PIB per cápita fue de USD\$6.403, un poco menos del equivalente a nivel nacional (USD\$6.334) (Ruiz, 2012, p. 95).

El PIB del departamento da cuenta de los bienes y servicios que produce el departamento y

refleja su desempeño productivo (Crepib, 2009). “En dicho año, los sectores que más aportaron al PIB departamental fueron: Actividades de servicios sociales, agropecuario, industria manufacturera, explotación de minas y canteras, transporte, almacenamiento y comunicaciones, comercio y turismo” (Ruiz, 2012, p. 95).

Una vez identificados los sectores de mayor impacto económico, el grupo de trabajo del PEDCTI (Ruiz, 2012) construyó la matriz de clasificación, donde se expone la priorización de los sectores en términos de potencial de negocios frente al entorno económico favorable. Tal clasificación se muestra en la figura 1.

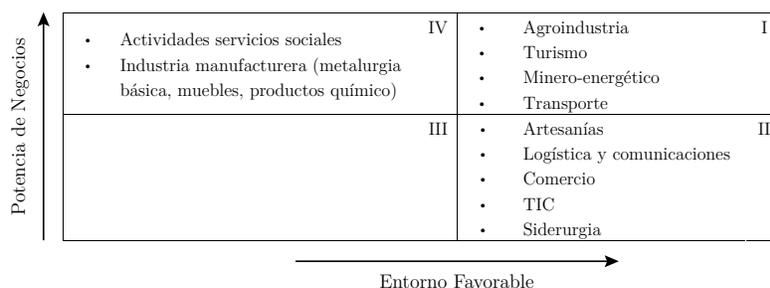


Figura 1. Matriz inicial de priorización de sectores

Fuente: Ruiz (2012).

Selección de sectores a evaluar

La matriz construida se validó por los miembros del Codecti, los principales representantes de los sectores productivos y el equipo de trabajo del OCyT, en un ejercicio de socialización y revisión de la clasificación de los sectores ubicados en los cuatro cuadrantes de la matriz mostrada en la figura 1, y determina por consenso la distribución mostrada en la figura 2, quedando de la siguiente manera (Ruiz, 2012, p. 96).

Los sectores a analizar por parte de los actores generadores del *Plan Estratégico Departamental de Ciencia, Tecnología e Innovación Boyacá 2022: la ciencia, la tecnología y la innovación al servicio del desarrollo*, son los que resultaron ubicados en el cuadrante I de la matriz concertada: agroindustria, turismo, minero-energético y metalmecánica, por ser los que muestran convergencia entre su dinámica interna y el direccionamiento político. Es decir, sectores en los cuales el departamento desarrolla ventajas, además el gobierno departamental o nacional apoya a través de políticas y tienen alto potencial en el mercado (Ruiz, 2012).

Criterios de selección del sector productivo panelero y realización del diagnóstico tecnológico

El término *diagnóstico* es de origen griego y significa “el acto o arte de conocer”, inicialmente se utilizaba en el campo de la medicina, y luego se

extendió a otros ámbitos en los que también ha sido de gran utilidad, como es el caso del sector empresarial. El diagnóstico tecnológico es una herramienta de gestión que permite determinar las capacidades tecnológicas enfatizando en las fortalezas y retos por alcanzar, para lo cual se recurre al análisis de la cadena de valor examinando de forma sistemática todas las actividades que una organización desempeña y cómo interactúan entre sí (Rodríguez, 2011, p. 2-3).

La gestión de la tecnología en una organización está dividida en tres grandes partes. La primera consiste en realizar un diagnóstico interno, o tecnológico, de la empresa (inventariar y evaluar); la segunda se fundamenta en la ejecución del diagnóstico externo o diagnóstico tecnológico de los competidores, con el fin de analizar el bagaje y comportamiento de estos últimos (vigilar), y la tercera consiste en valorizar el patrimonio tecnológico de la empresa respecto a los de la competencia potencial (optimizar, enriquecer y salvaguardar) (Rodríguez, 2011, p. 3).

Para los propósitos de esta investigación, el diagnóstico tecnológico se orienta a empresas cuya actividad económica está relacionada con la producción de panela correspondiente al sector agroindustrial seleccionada en la matriz priorizada generada en el PEDCTI. El ejercicio de vigilancia aborda únicamente la fase correspondiente al diagnóstico interno para la obtención de un inventario tecnológico (máquinas, equipos y herramientas informáticas) que permita identificar los

Potencia de Negocios ↑	IV	<ul style="list-style-type: none"> • Agroindustria • Turismo • Minero-energético • Metalmecánica-Metalurgia 	I
	III	<ul style="list-style-type: none"> • Artesanías • Logística y comunicaciones • Comercio • TIC 	II
			Entorno Favorable →

Figura 2. Matriz concertada de priorización de sectores

Fuente: Ruiz (2012).

procesos dentro de la cadena de producción que incorporen dispositivos lógicos programables y microcontroladores.

La Gobernación de Boyacá en su página de internet dispone un directorio de las entidades cuya actividad económica corresponde al sector agroindustrial (Gobernación de Boyacá, 2014), donde se relacionan un total de 160 entidades de las cuales 18 se encuentran en la ciudad de Tunja, 13 en Duitama, 8 en Sogamoso, 6 en Paipa y en menor cuantía ubicadas en ciudades como Tibasosa, Nobsa, Puntalarga, Santana, Ventaquemada, Firavitoba, Sáchica, Samacá, Villa de Leyva, Monquirá, Ramiriquí, Guateque, San José de Pare, Viracachá, Briceño, Toca, Tuta, entre otras. De las 17 entidades registradas en la ciudad de Tunja, 8 ya no existen (entidades liquidadas o cambio de razón social) y las direcciones no corresponden; 5 no permiten el ingreso a sus instalaciones (solo ofrecen información comercial), logrando solamente establecer contacto con 2: Secretaría de Fomento Agropecuario ubicada en las instalaciones de la Gobernación de Boyacá y el Centro Regional de Gestión para la Productividad e Innovación de Boyacá (Crepib) ubicada en las instalaciones de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, sede Central.

La Secretaría de Fomento Agropecuario del Departamento de Boyacá está organizada en secretarías técnicas departamentales para cada una de las cadenas productivas definidas por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (Garavito, 2008). Mediante la Secretaría Técnica de la Cadena Productiva Agroindustrial de la Panela, se logró establecer contacto con la Coordinación Departamental de Fedepanela y el Centro de Investigación y Mejoramiento de la Panela (Cimpa-Corpoica), ubicados en el municipio de Barbosa, Santander, quienes facilitaron el acercamiento y visita a las instalaciones de fabricación de panela (trapiches) de varios productores asociados; así fue posible conocer los objetivos del proyecto de investigación, obtener información primaria del proceso

del cultivo de caña de azúcar, fabricación de panela e identificación de brechas tecnológicas en su proceso de transformación.

Por otro lado,

[...] el Centro Regional de Gestión para la Productividad y la Innovación de Boyacá (Crepib) tiene como misión ser eje articulador que impulsa el mejoramiento de la productividad y competitividad a través de la innovación, el desarrollo tecnológico y la gestión del conocimiento en los sectores estratégicos de la región (Palacios, 2013, p. 192).

El Crepib El CREPIB facilitó información y documentación respecto a la identificación de brechas tecnológicas del sector lácteo y metalmecánico, así como datos de contacto para la realización de visitas en campo, resultado de proyectos de investigación adelantados por el CREPIB; sin embargo, Crepib; sin embargo, los resultados del diagnóstico en estos sectores productivos no se describen en la presente publicación.

Consideraciones para el diagnóstico tecnológico de la cadena productiva de panela

“Reconociendo la importancia social, cultural y económica que la panela tiene en nuestro país, y con el objeto de impulsar en este sector el mejoramiento de las condiciones para la producción y la comercialización de la panela, el Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos (Invima) y la Federación Nacional de Productores de Panela Fedepanela” (Hernández, 2009, p. 3) proporcionan los medios de divulgación de los requisitos sanitarios que deben cumplir los trapiches paneleros. Adicionalmente, la norma técnica colombiana NTC1311 (Icontec, 2009), establece los requisitos y ensayos que debe cumplir la panela destinada para el consumo humano; Osorio (2007), por su parte, presenta un instrumento orientador o manual técnico de buenas prácticas

agrícolas (BPA) y buenas prácticas de manufactura (BPM) en la producción de caña y panela.

La metodología propuesta para la realización del diagnóstico tecnológico está basada en la metodología usada por Rodríguez (2011). De igual manera, se adopta la metodología utilizada por el Centro de Desarrollo Tecnológico de la Industria Electro Electrónica e Informática (CIDEI), donde establece una metodología de revisión de vigilancia tecnológica mediante herramientas y fuentes de búsqueda de información con buscadores de internet, metabuscadores y bases de datos (CIDEI, 2007). La figura 3 ilustra la metodología aplicada para la realización del diagnóstico tecnológico.

El inventario tecnológico es un instrumento metodológico utilizado para obtener la información cualitativa o cuantitativa sobre las tecnologías disponibles en la empresa, y posibilita la identificación de necesidades a corto, mediano o largo plazo. Un activo tecnológico se considera un equipo, herramienta o *software* necesario para realizar actividades productivas específicas de una empresa u organización (Rodríguez, 2011).

El análisis de incorporación tecnológica busca identificar cómo los sistemas de instrumentación electrónica, control o automatización industrial, pueden aportar al mejoramiento del proceso de producción de panela, en busca del cumplimiento

de las reglamentaciones sanitarias y ambientales, así como el uso de buenas prácticas de manufactura que permitan posicionar el producto en el mercado nacional e internacional.

RESULTADOS

Inventario tecnológico a trapiches y empresas visitadas

Considerando el proceso de fabricación de panela y los parámetros establecidos como buenas prácticas agrícolas (BPA) y buenas prácticas de manufactura (BPM) (Osorio, 2007), se hace el inventario tecnológico de acuerdo con la metodología propuesta. Las empresas colaboradoras para el ejercicio de diagnóstico tecnológico son:

- Agropanela San Sebastián: Trapiche El Ingenio y Trapiche El Panelero, ubicado en la ciudad de San José de Pare.
- Doña Panela: Trapiche Doña Panela ubicada en la ciudad de Chitaraque.
- Multingenios Makariza S.A., ubicada en el km 8, vía Barbosa-Bucaramanga. Las tablas 2 al 5 muestran los resultados del inventario tecnológico realizado en los trapiches y empresas visitadas.

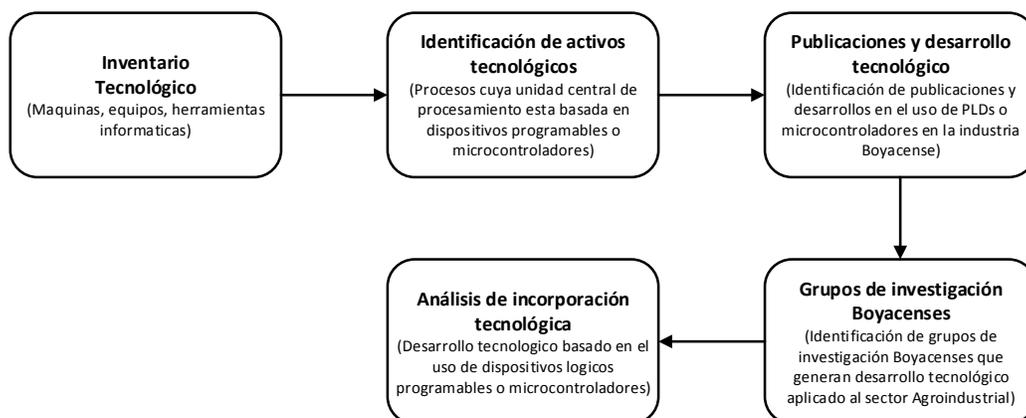


Figura 3. Metodología para diagnóstico tecnológico en el sector agroindustrial de la panela

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Resultado del inventario tecnológico realizado al trapiche El Ingenio

ETAPA	PROCESO	ACTIVO TECNOLÓGICO	OBSERVACIONES
Cosecha	Siembra	Ninguno	No hay sistema de riego.
	Maduración	Ninguno	No hay registro de variables climáticas y fisicoquímicas que inciden sobre el cultivo.
	Corte	Refractómetro profesional, Rhb-62atc (28 % -62 % Brix)	No hay registro de condiciones de humedad del cultivo. Cálculo del índice de madurez mediante refractómetro para determinar momento de corte de la caña para beneficio. No hay registro de la información. El transporte se hace mediante tracción animal dada las condiciones geográficas del lugar del cultivo de la caña de azúcar.
Beneficio	Apronte	Ninguno	No hay registro de cantidad de caña recolectada y dispuesta a extracción.
	Extracción	Molino con motor de combustión y eléctrico.	No hay registro de cantidad de jugo producido en la molienda respecto a cantidad de caña.
	Prelimpieza	Ninguno	No hay plan de mantenimiento de molino.
	Clarificación y encalado	Ninguno	No hay registro ni control de temperatura en los procesos de evaporación y clarificación.
	Evaporación y concentración	Ninguno	Pailas de disposición abierta. El vapor de agua generada por la evaporación del guarapo deteriora los materiales de la instalación.
	Punteo y batido	Ninguno	No hay registro de variables para control de calidad en el proceso de punteo (se hace por criterio de operario). El bagazo se usa exclusivamente para alimentar hornilla. Uso de hornilla tipo CIMPA [19].
Empaque y almacenamiento	Empaque	Maquina selladora	El empaque se hace con máquina de sellado operado de manera manual acorde a reglamentación.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Resultado del inventario tecnológico realizado al trapiche El Panelero

ETAPA	PROCESO	ACTIVO TECNOLÓGICO	OBSERVACIONES
Cosecha	Siembra	Ninguno	No hay sistema de riego.
	Maduración	Ninguno	No hay registro de variables climáticas y fisicoquímicas que inciden sobre el cultivo.
	Corte	Ninguno	No hay registro de condiciones de humedad del cultivo. Cálculo del índice de madurez mediante refractómetro para determinar momento de corte de la caña para beneficio. No hay registro de la información. El transporte se hace mediante tracción animal dada las condiciones geográficas del lugar del cultivo.
Beneficio	Apronte	Ninguno	No hay registro de cantidad de caña recolectada.
	Extracción	Molino con motor de combustión y eléctrico.	No hay registro de cantidad de jugo producido en la molienda respecto a cantidad de caña.
	Prelimpieza	Ninguno	No hay plan de mantenimiento de molino.
	Clarificación y encalado	Ninguno	No hay registro ni control de temperatura en los procesos de evaporación y clarificación.
	Evaporación y concentración	Ninguno	Pailas de disposición abierta. El vapor de agua generada por la evaporación del guarapo deteriora los materiales de la instalación.
	Punteo y batido	Ninguno	No hay registro de variables para control de calidad en el proceso de punteo (se hace por criterio de operario). El bagazo se usa exclusivamente para alimentar hornilla. El bagazo ocupa grandes espacios para almacenaje de bagazo. Tiempos prolongados para secado de bagazo para su adecuado uso en la hornilla. Uso de hornilla convencional.
Empaque y almacenamiento	Empaque	Ninguna	No dispone de espacio para almacenamiento y empaque.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Resultado del inventario tecnológico realizado al trapiche Doña Panela

ETAPA	PROCESO	ACTIVO TECNOLÓGICO	OBSERVACIONES
Cosecha	Siembra	Ninguno	No hay sistema de riego.
	Maduración	Ninguno	No hay registro de variables climáticas y fisicoquímicas del suelo que inciden sobre el cultivo.
	Corte	Refractómetro portátil de 45-82 °Brix marca Scientific	No hay registro de condiciones de humedad del cultivo. Cálculo del índice de madurez mediante refractómetro para determinar momento de corte de la caña para beneficio. No hay registro de la información. El transporte se hace mediante tracción animal dada las condiciones geográficas del lugar del cultivo de la caña de azúcar.
Beneficio	Apronte	Ninguno	Se hace medición de cantidad de caña recolectada y dispuesta a extracción pero no hay registro.
	Extracción	Molino con motor de combustión y eléctrico.	No hay registro de cantidad de jugo producido en la molienda respecto a cantidad de caña. No hay plan de mantenimiento de molino.
	Prelimpieza	Ninguno	No hay registro ni control de temperatura en los procesos de evaporación y clarificación.
	Clarificación y encalado	Ninguno	Pailas de disposición abierta. El vapor de agua generada por la evaporación del guarapo deteriora los materiales de la instalación.
	Evaporación y concentración	Ninguno	No hay registro de variables para control de calidad en el proceso de punteo (se hace por criterio de operario).
	Punteo y batido	Ninguno	El bagazo se usa exclusivamente para alimentar hornilla. Uso de hornilla tipo CIMPA.
Empaque y almacenamiento	Empaque	Máquina selladora	El empaque se hace con máquina de sellado operado de manera manual acorde a reglamentación.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Resultado del inventario tecnológico realizado Multingenios Makariza S.A.

ETAPA	PROCESO	ACTIVO TECNOLÓGICO	OBSERVACIONES
Cosecha	Siembra	Indeterminado	Disponen de diferentes proveedores de caña de azúcar.
	Maduración	Indeterminado	Fomento a la calidad de materia prima, aumentando el pago de \$/ton por cada grado Brix (nivel de sacarosa) por encima del promedio de la zona que es de 19 grados.
	Corte	Indeterminado	Cuenta actualmente con 150 proveedores con radio de cercanía de 9 km para no aumentar costos de transporte.
Beneficio	Apronte	Báscula para pesaje de materia prima	La planta cuenta con monitoreo permanente de ingenieros de producción y revisores de calidad. Vapor de caldera destinado para alimentar difusor y generación de energía proyectado para generador eléctrico de 50 KVA. Alguna información de registro no revelada por políticas de protección de información.
	Trituración	Picadora DNIndustrial	
	Difusión	Difusor de caña de azúcar DNIndustrial	
	Caldera	Caldera de vapor DNIndustrial	
Empaque y almacenamiento	Empaque	Indeterminado	Empaque en bolsas de polietileno en presentaciones que van desde 6 g, 500 g, 1000 g y 2500 g de panela pulverizada natural. Bodegas en Bogotá y próximamente Medellín y Barranquilla.

Fuente: elaboración propia.

La Federación Nacional de productores de Panela (Fedepanela) informa que los departamentos con mayor producción de panela son Santander, Antioquia, Cundinamarca y Boyacá, y solamente en Boyacá el sector panelero presenta un alto grado de informalidad: 13.769 establecimientos productores son empresas sin constitución legal (Hernández, 2009). La Dirección de Fedepanela comenta que lo ideal es implementar procesos de producción con valor agregado como el mostrado por la empresa Multingenios Makariza S.A., pero el alto costo de la tecnología necesaria impide su adopción y transferencia, que el esfuerzo de las directivas de Fedepanela y a legislación nacional es lograr que los trapiches cumplan estándares mínimos como el caso presentado por el Trapiche El Ingenio y Doña Panela, pero la realidad del sector productivo de los trapiches del sector de la hoya del río Suárez está reflejado en lo diagnosticado en el Trapiche El Panelero. Por tal razón, la directora de Fedepanela recomienda En entrevista realizada el día 6/Marzo/2014 a la coordinadora departamental de Fedepanela, Magda Liliana Murcia Pardo, da la recomendación de “no desgastarse en tantas visitas, pues encontraremos la misma situación que la vista en el trapiche El Panelero, y seguramente procesos más precarios”.

Publicaciones en el sector agroindustrial de Boyacá

Con la metodología propuesta por el CIDEI para la identificación de publicaciones en fuentes de información, como bases de datos y metabuscadores (CIDEI, 2007), las bases de datos utilizadas para la búsqueda de publicaciones relacionadas con la aplicación de tecnología basada en el uso de dispositivos lógicos programables y microcontroladores en la industria boyacense son: IEEE Xplore y Science Direct, dado que la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia cuenta con licencia para el uso de estas bases de datos. Adicionalmente, se recurre a Google Academic de dominio público y gratuito. Para el registro de la información

se consulta una tabla que identifica la base de datos, la ecuación de búsqueda, número de registros encontrados, número de artículos con pertinencia y fecha de búsqueda. Los resultados que arroja la búsqueda en la base de datos IEEE Xplore, correspondientes a la aplicación de microcontroladores, CPLD y FPGA en sistemas de control, monitoreo y procesos de tecnificación en la agroindustria, se muestran en la tabla 6.

De un total de 203 registros, solamente 9 publicaciones fueron pertinentes acorde al objetivo de la búsqueda. A continuación, se hace una breve descripción de las publicaciones identificadas.

En aplicaciones de microcontroladores en la industria agrícola, Aravinth (2012) describe el uso de máquinas inteligentes agrícolas para los procesos de prueba y enriquecimiento de suelos, siembra de semillas, monitoreo de condiciones climáticas y comprobación de estructuras de ADN en las plantas, para determinar la aplicación de nutrientes en caso de carencia. También, Jie (2011) plantea el desarrollo de un sistema de control Fuzzy-PID basado en microcontrolador para controlar los motores como elementos actuadores y procesamiento de las señales de los sensores que determinan la posición de siembra de semillas de trigo. De igual manera, Chaitanya (2007) expone el diseño de un sistema de adquisición de datos *data logger* para pH usando microcontrolador, explicando su uso en áreas como bioquímica, agronomía, ciencias de los alimentos y control ambiental.

Para el caso del uso de FPGA, se registró un solo documento correspondiente al trabajo realizado por Jayendra (2009), donde presenta el diseño de un control avanzado basado en FPGA para el proceso de siembra.

Por último, orientando la búsqueda al uso de microcontroladores en sistemas de control, monitoreo y tecnificación, se encontraron trabajos como el de Gutiérrez (2014), quien elabora un sistema de riego automatizado para uso de agua en cultivos agrícolas. Sylvain describe el desarrollo de algoritmos de criptografía usando microcontroladores para disminución de consumo de energía

(Pelissier, 2011). Sánchez (2011) desarrolla un sistema de redes inalámbricas de sensores subacuáticos UWSN para uso en áreas de acuicultura, exploración marina y control biológico para aguas contaminadas, fondo marino, corrientes oceánicas y actividad sísmica. Chunyan (2010) describe un sistema de flujo ultrasónico inalámbrico mediante microcontroladores para aprovechamiento de la energía en sistemas automotrices. Por otro lado, Zhi (2010) desarrolla una red de sensores inalámbrica para monitoreo remoto del medio ambiente a través de varios protocolos de comunicación.

Los resultados encontrados en la base de datos Science Direct (Elsevier) correspondientes a la aplicación de microcontroladores, CPLD y FPGA en sistemas de control, monitoreo y procesos de tecnificación en la agroindustria, se muestran en la tabla 7.

Se toma al microcontrolador como dispositivo programable clave en la ecuación de búsqueda, considerando la tendencia obtenida en los registros de Science Direct. De un total de 144 registros, solamente 6 fueron pertinentes. A continuación, se hace una breve descripción de las publicaciones identificadas.

Para aplicaciones de los microcontroladores en el sector agroindustrial, Escolar (2011) describe una metodología novedosa para el monitoreo de la producción agrícola, basada en red de sensores inalámbrica. Zhua (2011) plantea unas aplicaciones de redes de sensores inalámbrica para el monitoreo de ambientes agrícolas, principalmente supervisión de temperatura y humedad. De igual

manera, López (2009) muestra el desarrollo de un sistema preciso de redes de sensores inalámbrica para cultivos hortícolas en el norte de España, obteniendo mejoras en la administración del recurso hídrico y mejoramiento del proceso de fertirrigación. Zafar (2011) expone una experiencia durante la introducción del desarrollo experimental de redes de sensores en una empresa de producción hortícola ecológica en la región de Murcia España. Zhanga (2008) sugiere un sistema de predicción de acidez, sólidos solubles y firmeza usando técnica de nariz electrónica. Aquí describen algoritmos de métodos de calibración multivariable, regresión lineal múltiple MLR, regresión de componente lineal PCR y regresión parcial de media cuadrática PLS. Por último, para aplicaciones específicas en las mediciones de variables tanto físicas como químicas en la producción de panela, con microcontroladores, se encontró una publicación realizada por García (2011) quien hace un estudio comparativo de algoritmos de reconocimiento de patrones implementados en microcontrolador para usar en una lengua electrónica para monitoreo de agua potable, cuyo producto objetivo no es propiamente la panela, pero el método aplica para las condiciones requeridas en los procesos BPA y BPM de la panela.

Los resultados encontrados en la base de datos Google Academic correspondientes a la aplicación de microcontroladores, CPLD y FPGA en sistemas de control, monitoreo y procesos de tecnificación en la producción de panela, se muestran en la tabla 8.

Tabla 7. Uso de microcontroladores en aplicaciones de agroindustria usando Science Direct

Herramienta de búsqueda	Descriptor	No. de registros	Pertinencia del resultado	Fecha de búsqueda
ScienceDirect	agricultural industry application microcontrollers	21	4	3/29/2014
	chemical measurement of physical conditions for panela	44	1	3/29/2014
	chemical measurement of physical conditions using microcontrollers	79	1	3/29/2014

Fuente: elaboración propia.

Tabla 8. Ahorro energético y tecnificación de la producción de panela usando Google Academic

Herramienta de búsqueda	Descriptor	No. de registros	Pertinencia del resultado	Fecha de búsqueda
Google academic	ahorro energético en producción de panela, tecnificación en producción de panela	714	6	3/29/2014
	mejoramiento en producción de panela	683	3	3/30/2014

Fuente: elaboración propia.

De 1397 registros, se clasificaron solamente 9 publicaciones orientadas al ahorro energético en producción de panela y su mejoramiento. A continuación, se hace una breve descripción de las publicaciones identificadas:

Flórez (2013) expone la agenda prospectiva de la cadena productiva de la panela y su agroindustria. Mendieta (2011) evalúa la eficiencia de pailas en hornos para la elaboración de panela. Ordóñez (2007) realiza el modelamiento de la producción de panela usando MatLab y orientado a control de procesos industriales principalmente a concentración de azúcar y el nivel en los efectos del evaporador. Por su parte, López (2009) diseña e implementa un prototipo de sistema de control basado en microcontrolador para monitoreo de temperatura y apertura de válvulas para flujo de jugos entre pailas. Rosero (2011) diagnostica la producción, transformación y comercialización de panela en cabildos indígenas nasa del norte del Cauca. Gallego (2013) investiga los trapiches del municipio de Santuario, Risaralda. León (2013) desarrolla una máquina de empaquetado y control de peso para panela granulada. Los documentos anteriores corresponden a proyectos de grado disponibles en la red Google Academic y no corresponden a documentos publicados en revistas indexadas o de divulgación científica reconocida.

Por otro lado, Mujica (2008) muestra un análisis del efecto de la variedad, lavado de la caña y temperatura de punteo sobre la calidad de la panela granulada. Loyo (2002) expone algunos métodos y estrategias para el perfeccionamiento de

la agroindustria panelera, identificando problemas de rendimiento de cultivo, pérdida de extracción de jugos, ineficiencia térmica en las hornillas y deficiencia en la calidad del producto final. Guaman (2009) realiza el diseño, simulación y emulación de una planta productora de panela, incorporando elementos de automatización de procesos para mejoramiento de condiciones en las actividades de los operarios y mejoramiento del recurso energético. De las investigaciones mencionadas, se resalta que ninguna fue realizada en Colombia, pues corresponden a investigaciones realizadas en países como Ecuador y Costa Rica.

Grupos de investigación con publicaciones de aplicación de dispositivos programables para la agroindustria boyacense

Considerando que la misión de las universidades del departamento de Boyacá obedece principalmente a cubrir las necesidades del entorno, se realizó la investigación de los grupos de investigación reconocidos y categorizados por Colciencias, que desarrollan aplicaciones de control, instrumentación, monitoreo y automatización de procesos agroindustriales, siendo estas áreas de aplicación las identificadas en la revisión documental encontrada en las bases de datos utilizadas en la metodología de diagnóstico tecnológico. La fuente primaria es la información registrada en GrupLac de los grupos de investigación. Las cinco principales universidades del departamento de Boyacá son: Santo Tomás, Pedagógica y Tecnológica de

Colombia (UPTC), de Boyacá, Fundación Universitaria Juan de Castellanos, y Antonio Nariño. La búsqueda de los grupos de investigación se limita al área de conocimiento de ingeniería eléctrica, electrónica e informática, de lo cual se encontró lo relacionado en la tabla 9.

Se identificó un total de 8 publicaciones correspondientes a la electrónica, control, sistemas de información, robótica, sistemas inteligentes e instrumentación aplicadas al sector agroindustrial.

Cavieles (2012) propone el desarrollo de un modelo de autómatas finitos, como alternativa de solución para la automatización en la elaboración del yogur en pymes. Jiménez (2006) expone el desarrollo de sistemas de agricultura de precisión para la planificación mediante sistemas de información geográfica. De igual manera, Torres (2009)

caracteriza la firma espectral a partir de sensores remotos para el manejo de sanidad vegetal en el cultivo de palma de aceite. Gómez (2005) desarrolla una estación agrometeorológica y agroclimática automática para la supervisión de variables que apoyan la toma de decisión en cultivos en la zona de la región del Sugamuxi. Por último, Jiménez (2010) propone un sistema de adquisición, almacenamiento y análisis de información fenológica para el manejo de plagas y enfermedades de un duraznero mediante tecnologías de agricultura de precisión. Jiménez (2012) muestra el desarrollo de un sistema de telemetría de temperatura en cultivos agrícolas usando *software* libre, y expone además un sistema para el monitoreo de variables en campo en tiempo real.

Tabla 9. Publicaciones realizadas por las principales universidades del departamento de Boyacá

Institución	Grupos de investigación	Grupos de investigación por área de conocimiento	Categoría	Líneas de investigación	Publicaciones pertinentes
Universidad Santo Tomás Tunja	7	Grupo de Investigación y Desarrollo de Ingeniería en nuevas Tecnologías (GIDINT)	B	Instrumentación y control	2
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC)	102	Grupo de Investigación en Procesamiento de Señales DSP-UPTC	Reconocido	Electrónica de potencia. Instrumentación y Automatización industrial. Procesamiento de señales. Tecnologías agropecuarias.	5
		Grupo de Investigación en Robótica y Automatización Industrial (GIRA)	C	Automatización industrial. Inteligencia artificial. Sistemas embebidos. Robótica.	0
Universidad de Boyacá	18	Grupo de Investigación en Instrumentación, Modelamiento, Automatización y Control	D	Robótica, automatización y control. Instrumentación electrónica.	1
Fundación Universitaria Juan de Castellanos	9	Grupo de Investigación en Informática Avanzada–MUISCA	C	Ingeniería web. Procesos de <i>software</i> y sistemas de control. Seguridad informática y de la información. Sistemas inteligentes.	0
Universidad Antonio Nariño	29	3 (Ninguna en Boyacá)	Ninguna	0	0

Fuente: elaboración propia.

Análisis de incorporación tecnológica al sector productivo agroindustrial de Boyacá

De acuerdo con los resultados obtenidos en el ejercicio de diagnóstico tecnológico realizado en las empresas productoras de panela: El Ingenio, El Panelero y Doña Panela, empresas productivas de panela del sector de la hoya de río Suárez, existen amplias posibilidades para desarrollo tecnológico basado en dispositivos lógicos programables y microcontroladores para el fortalecimiento en los eslabones de producción primaria y transformación del sector productivo panelero de Boyacá. Tales desarrollos deben estar orientados a procesos como:

- Sistemas de control de riego para conservación de recursos hídricos.
- Sistemas automáticos de fertirrigación o administración de fertilizantes según requerimientos de cultivo.
- Monitoreo de variables climatológicas.
- Monitoreo de variables para análisis fitosanitario.
- Monitoreo de variables de proceso para trazabilidad de producto.
- Sistemas de control e instrumentación para el desarrollo de energías alternativas aprovechando residuos de cosecha y poscosecha.
- Sistemas de control y automatización para mejoramiento de condiciones laborales.

Las anteriores consideraciones se complementan según lo diagnosticado también en el Plan Estratégico Departamental de Ciencia Tecnología e Innovación de Boyacá, en el que se define la estructura de la agroindustria del departamento de Boyacá “como una economía primaria con intentos individuales y aislados de procesos de agregación de valor a los productos primarios, escasa utilización de tecnología importante en sus procesos industriales y niveles bajos de inserción en el mercado global” (Ruiz, 2012). En términos generales, se podrían establecer las razones mostradas en la tabla 10, como el argumento para desarrollar tecnología al alcance del pequeño y mediano productor de panela, considerando los dispositivos lógicos programables y los microcontroladores como una alternativa para tal fin.

Por último, dadas las tendencias mundiales de innovación en el sector agroindustrial, teniendo en cuenta inicialmente el eslabón de producción primaria de la panela, se establece la necesidad de incorporar sistemas de mecanización en la siembra y cosecha de la caña panelera, utilización de tecnologías para el desarrollo de la agricultura de precisión, mejoramiento fitosanitario, manejo de los recursos naturales y prevención de plagas y malezas del cultivo. Para el eslabón de transformación o beneficio de la caña panelera la optimización del proceso de conversión de la panela, procesos de

Tabla 10. Problemas y desafíos del sector agroindustrial de Boyacá

PRODUCCIÓN PRIMARIA	TRANSFORMACIÓN
Bajos niveles de certificación en temas de calidad, ambientales y de inocuidad	Se ha incorporado escasa tecnología e innovación en la industria.
Bajos niveles de adopción/adaptación tecnológica y biotecnológica en todo el sector.	Niveles básicos o inexistentes de utilización de los desechos y subproductos para la generación de nuevos productos y disminución de costos.
Bajos niveles de disponibilidad de información estadística.	Bajos niveles de innovación en sistemas de ahorro de energía y disminución de costos en procesos de transformación.
Pequeños y medianos productores con baja capacidad organizacional, y resistentes a cambios tecnológicos y utilización de nuevas técnicas/tecnologías.	Alta desarticulación entre agentes sectoriales, académicos y estatales.

Fuente: Ruiz (2012).

automatización para mejoramiento de las condiciones laborales en la producción de panela, manejo y aprovechamiento de la biomasa residual,

identificación y mejoramiento del proceso sanitario e incorporación de energías alternativas a través del aprovechamiento de la biomasa residual (tabla 11).

Tabla 11. Tendencias mundiales de innovación para el sector agroindustrial

PRODUCCIÓN PRIMARIA	TRANSFORMACIÓN
Sensores remotos e imágenes satelitales para detección de deficiencias fisiológicas y para control de malezas y fumigación.	Aplicación de tecnologías y procedimientos más limpios.
Robots y mecanización para cosecha de fruto y fertilización.	Investigación básica y aplicada en transformación de productos e inocuidad.
Requerimientos y suelos aptos para el cultivo. Aumento en rendimiento por área cultivada.	Uso eficiente de la energía en plantas de beneficio.
Manejo eficiente (tecnificado) del recurso hídrico.	Promoción de energías alternativas a partir de biomasa y reutilización de residuos de procesos de cosecha y poscosecha.

Fuente: Ruiz (2012).

CONCLUSIONES

Multingenios Makariza S.A. incorpora tecnología de punta para la producción de panela pulverizada, tecnología basada en difusores que permite un mayor aprovechamiento de la caña panelera y obtención de subproductos derivados. Los trapiches El Ingenio y Doña Panela incorporan, en su cadena de producción, hornillas tipo CIMPA para mejoramiento térmico y aprovechamiento residual. Sin embargo, no cuentan con sistemas de información en los eslabones de producción y beneficio, solamente usan algunos elementos como refractómetros para medición de grados Brix. El caso más crítico se evidenció en el trapiche El Panelero, pues no cuenta con ningún sistema de información del producto, la hornilla es tradicional, el bagazo como combustible requiere periodos prolongados de secado y el proceso es manual, sin ningún instrumento de apoyo para garantizar la calidad de producto. El aprovechamiento de residuo como combustible y los consumos excesivos de energía eléctrica en la producción de panela es un común denominador en los trapiches. Por tanto, no se identificó ningún sistema basado en dispositivos lógicos programables y microcontroladores en estas tres empresas.

A través de IEEE Xplore, Science Direct y Google Academic, se encontraron aplicaciones con microcontroladores, CPLD y FPGA en sistemas automáticos de siembra, sistemas de riego, registro de variables climáticas en cultivo, agricultura de precisión, redes de sensores para medición de variables en cultivo y técnicas avanzadas, como lengua electrónica y nariz electrónica, para determinar características físicas y químicas de producto. Ninguno de los desarrollos se orienta a la producción de panela, sin embargo, son tecnologías que pueden ser adoptadas y apropiadas a este sector agroindustrial.

Por último, la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia y la Universidad Santo Tomas son líderes en el desarrollo de aplicaciones tecnológicas orientadas a la agroindustria boyacense, ninguna está enfocada en la cadena productiva, sin embargo, son escalables a esta.

FINANCIAMIENTO

Los resultados descritos se derivan del proyecto de investigación "Diagnóstico tecnológico del uso de dispositivos lógicos programables y microcontroladores en la industria boyacense", financiado por la Dirección de Investigaciones de la Universidad

Pedagógica y Tecnológica de Colombia, dentro del marco de la convocatoria DIN017 de 2014, para la vinculación de docentes a grupos de investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aravinth, G. (2012). Wedding of Robots with Agriculture. *Third International Conference on Computing Communication & Networking Technologies (ICCCNT)*, 4.
- Castellanos, C. (2004). *Agenda prospectiva de Ciencia y Tecnología de Boyacá*. Tunja: Colciencias, SENA.
- Cavieles, N. (2012). Modelo de autómata finito orientado a mejorar la productividad en el procesamiento de yogur Colombia. *Revista Educación en Ingeniería*, 7(13), 63-73.
- Chaitanya, S. (2007). Designing a pH Data Acquisition and Logging Device using an Inexpensive Microcontroller. *Proceedings Southeast Conference IEEE*, 217-220.
- Chunyan, M. (2010). Research on a Self-powered Wireless Ultrasonic Flow Sensor System. *Conference on Progress in Informatics and Computing (PIC), 2010 IEEE International*, 522-526.
- Centro de Desarrollo Tecnológico de la Industria Electro Electrónica e Informática (CIDEI) (2007). *Metodología de Vigilancia Tecnológica: Informe tipo vigilancia científico técnica*. Bogotá: Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico de la Industria Electro Electrónica e Informática.
- Centro Regional de Gestión para la Productividad y la Innovación de Boyacá (CREPIB) (2009). *Boyacá, agroindustria productiva y competitiva. Boletín, 1*. Tunja: Centro Regional de Gestión para la Productividad y la Innovación de Boyacá.
- Escolar, S. (2011). A novel methodology for the monitoring of the agricultural production process based on wireless sensor networks. (Elsevier, Ed.) *Computers and Electronics in Agriculture*, 252-265.
- Flórez, D.H. (2013). Agenda prospectiva de investigación de la cadena productiva de la panela y su agroindustria. *Revista Tecnura*, 17(36), 72-86.
- Gallego, J. (2013). *Investigación de los trapiches del municipio de santuario Risaralda, análisis de productividad y oportunidades de mejora para la competitividad del sector*. Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ingeniería Industrial, Pereira.
- Garavito, J. (2008). *Cartilla cadenas productivas*. Bogotá D.C.: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.
- García, E. (2011). A comparison study of pattern recognition algorithms implemented on a microcontroller for use in an electronic tongue for monitoring drinking waters. (Elsevier, Ed.) *Journal Sensors and Actuators a Physical*, vol. 172, issue 2, 570-582.
- Gobernación de Boyacá (2014). *Directorio agroindustrial*. Recuperado el 31 de julio de 2014, de: <http://www.boyaca.gov.co/images/Directorios/DIRECTORIO%20AGROINDUSTRIAL.pdf>
- Gómez, A. (2005). Estaciones agrometeorológicas y agroclimáticas automáticas. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, vol. 5, No. 1, 37-42.
- Gómez, E.H. (2008). *Agenda interna para la productividad y competitividad*. Tunja: Secretaria Técnica de la Región Central de Colombia.
- Granados, J.C. (2012). *Plan de desarrollo departamental de Boyacá 2012-2015*. Tunja: Gobernación de Boyacá.
- Guaman, F. (2009). *Diseño, Simulación y Emulación de una Planta Productora de Panela*. Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación (FIEC). Ecuador, disponible en: <http://www.panelamonitor.org/media/docrepro/document/files/disenosimulacion-y-emulacion-de-una-planta-de-produccion-de-panela.pdf>.
- Gutiérrez, J. (2014). Automated Irrigation System Using a Wireless Sensor Network and GPRS Module. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 63(1), 166-176.
- Hernández, L. (2009). *ABC Panela*. Bogotá: Ministerio de la Protección Social, Invima, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural y Fedepanela.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas (Icontec) (2009). *Norma Técnica Colombiana NTC 1311: Productos agrícolas PANELA*. Bogotá: Icontec.
- Jayendra, K. (2009). FPGA based advanced sowing and planting equipment controller design. *International Conference on Emerging Trends in Electronic*

- and Photonic Devices & Systems *ELECTRO '09*, 120-123.
- Jie, L. (2011). Study on the Application of Fuzzy-PID Control to Precision Seeding Technology of Wheat. *Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering (MACE)*, 1690-1693.
- Jiménez, A. (2006). Sistemas de agricultura de precisión planificación mediante sistemas de información geográfica. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, vol. 5, No. 2, 44-47.
- Jiménez, A. (2010). Sistema de adquisición, almacenamiento y análisis de información fenológica para el manejo de plagas y enfermedades de un duraznero mediante tecnologías de agricultura de precisión. *Revista Tecnura*, 1(1), 41-51.
- Jiménez, F. (2012). Field variables monitoring in real time (GPS, soil moisture, temperature) with precision farming applications. *EATIS '12: Proceedings of the 6th Euro American Conference on Telematics and Information Systems*, 367-370.
- Jiménez, F. (2012). Temperature telemetry system for agricultural crops using free software. *EATIS '12: Proceedings of the 6th Euro American Conference on Telematics and Information Systems*, 89-94.
- León, G. (2013). *Máquina de empacado y control de peso para panela granulada*. Universidad Técnica del Norte, Ecuador, disponible en: <http://www.panelamonitor.org/media/docrepo/document/files/maquina-de-empacado-y-control-de-peso-para-panela-granulada.pdf>.
- Londoño, J.E. (2004). *Plan de desarrollo departamental de Boyacá 2004-2007*. Tunja: Gobernación de Boyacá.
- López, J. (2009). *Instrumentación electrónica, aplicada en el proceso de producción de panela, enfocada a microempresarios*. Bogotá: Corporación Universitaria Minuto de Dios. Disponible en: <http://repositorio.uniminuto.edu:8080/xmlui/handle/10656/2695>.
- López, J. (2009). Wireless Sensor Networks for precision horticulture in Southern Spain. (Elsevier, Ed.) *Computers and Electronics in Agriculture*, 45-52.
- Loyo, R. (2002). *Métodos y estrategias para el perfeccionamiento de la agroindustria panelera*. Disponible en: <http://www.panelamonitor.org/media/docrepo/document/files/metodos-y-estrategias-para-el-perfeccionamiento-de-la-agroindustria-panelera.pdf>
- Mendieta, O. (2011). Ahorro de combustible y energía en hornos usados para la elaboración de panela modificando el diseño de pailas abiertas. *Revista Fuentes*, 9, 53-61.
- Mujica, M. (2008). Efecto de la variedad, lavado de la caña y temperatura de punteo sobre la calidad de la panela granulada. *Revista Interciencia*, vol 33, No. 8, 598-603.
- Olano, C.A. (2007). *Plan regional de competitividad de Boyacá 2008-2032*. Tunja: Gobernación de Boyacá.
- Ordóñez, R. (2013). Proceso agroindustrial de la producción de panela. *Revista Tecnura*, 17(35), 47-54.
- Osorio, G. (2007). *Manual técnico: buenas prácticas agrícolas BPA y buenas prácticas de manufactura BPM en la producción de caña y panela*. Medellín: CTP Print Ltda.
- Palacios, M. (2013). Posibilidades para la redefinición del modelo de negocios. *Apuntes del CENES*, 32(55), 189-212.
- Pelissier, S. (2011). Providing security in energy harvesting sensor networks. *The 8th Annual IEEE Consumer Communications and Networking Conference—Security and Content Protection*, 452-456.
- Rentería, C. (2007). *Agenda Interna para la Productividad y la Competitividad*. Bogotá: Departamento Nacional de Planeación.
- Rodríguez, S.L. (2011). Diagnóstico Tecnológico, Herramienta para la Planeación de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación. Caso: Cotecmar. En: *Memorias XIV Congreso Latino-iberoamericano de Gestión Tecnológica ALTEC*, 10.
- Rosero, E. (2011). *Diagnóstico en la producción, transformación y comercialización de panela en cabildos indígenas nasa del norte del Cauca, ante la vigencia y aplicación de la Resolución 779 de 2006*. Universidad de San Buenaventura. Disponible en: <http://www.panelamonitor.org/media/docrepo/document/files/diagnostico-en-la-produccion-transformacion-y-comercializacion-de-panela-en-cabildos-indigenas-nasa-del-norte-del-ca.pdf>.

- Rozo, J. (2008). *Plan de desarrollo departamental de Boyacá 2008-2011*. Tunja: Gobernación de Boyacá.
- Ruiz, CF. (2012). *Plan Estratégico Departamental de Ciencia, Tecnología e Innovación de Boyacá 2022*. Tunja: Ediciones Antropos Ltda.
- Sánchez, A. (2011). A low cost and high efficient acoustic modem for underwater sensor networks. IEEE Oceanic Engineering Society Conference *OCEANS 2011, Spain*, DOI: 10.1109/Oceans-Spain.2011.6003428 .
- Secretaría de Fomento Agropecuario (2008). *Política sector agropecuario departamento de Boyacá*. Tunja: Gobernación de Boyacá.
- Torres, L. (2009). Caracterización de Firma Espectral a Partir de Sensores Remotos para el Manejo de Salud Vegetal en el Cultivo de Palma de Aceite. *Revista Palmas*, Vol. 30, No. 3, ISSN: 01212923, 30, 63-79.
- Zafar, A. (2011). A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture. (Elsevier, Ed.) *Computer Standards & Interfaces*, 563-572.
- Zhang, H. (2008). Predictions of acidity, soluble solids and firmness of pear using electronic nose technique. (Elsevier, Ed.) *Journal of Food Engineering*, 86, 370-378.
- Zhi, A.E. (2010). Wireless Sensor Networks Powered by Ambient Energy Harvesting: An Empirical Characterization. *Education and Research Conference (EDERC)*, 5.
- Zhua, Y. (2011). Applications of wireless sensor network in the agriculture environment monitoring. (Elsevier, Ed.) *International Workshop on Automobile, Power and Energy Engineering*, 156-163.





UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

INSTRUCCIONES PARA LOS AUTORES

Revista *TECNURA*
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad Tecnológica

CONTENIDO

- Alcance y política editorial de la revista
- Tipos de artículos aceptados
- Formato del artículo
- Envío de artículos
- Procedimiento para la publicación
- Arbitraje de artículos
- Contacto

1. ALCANCE Y POLÍTICA EDITORIAL DE LA REVISTA

La revista *Tecnura* es una publicación institucional de la Facultad Tecnológica de la Universidad Francisco José de Caldas, de carácter científico-tecnológico con periodicidad trimestral, que se publica los meses de enero, abril, julio y octubre. Su primer número apareció en el segundo semestre del año 1997 y hasta la fecha ha mantenido su regularidad.

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

La revista *Tecnura* está dirigida a docentes, investigadores, estudiantes y profesionales

interesados en la actualización permanente de sus conocimientos y el seguimiento de los procesos de investigación científico-tecnológica, en el campo de las ingenierías. Tiene como misión divulgar resultados de proyectos de investigación realizados en el área de las ingenierías, a través de la publicación de artículos originales e inéditos, realizados por académicos y profesionales pertenecientes a instituciones nacionales o extranjeras del orden público o privado. Los artículos presentados deben ser trabajos inéditos escritos en español o inglés; sin embargo, tendrán preferencia los artículos que muestren conceptos innovadores de gran interés, que traten sobre asuntos relacionados con el objetivo y cobertura temática de la revista.

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

Tecnura es una revista arbitrada mediante un proceso de revisión entre pares de doble ciego. La periodicidad de la conformación de sus comités Científico y Editorial está sujeta a la publicación de artículos en revistas indexadas internacionalmente por parte de sus respectivos miembros.

La Universidad Distrital Francisco José de Caldas, sus directivas, el Editor, el Comité Editorial y Científico no son responsables por la opinión y criterios expresados en el contenido de los artículos y estos se publican bajo la exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento del Comité Editorial.

Además de la versión impresa, la revista *Tecnura* tiene también una versión digital disponible en su página web: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>

2. TIPOS DE ARTÍCULOS ACEPTADOS

De acuerdo con la clasificación del Índice Nacional de Publicaciones Científicas y Tecnológicas (Publindex-Colciencias), la revista *Tecnura* recibe postulaciones de artículos inéditos de los siguientes tipos:

Artículos de investigación científica y tecnológica: documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos de investigación. La estructura generalmente utilizada contiene cuatro apartes importantes: introducción, metodología, resultados y conclusiones.

Artículos de reflexión: documento que presenta resultados de investigación desde una perspectiva analítica, interpretativa o crítica del autor, sobre un tema específico y recurriendo a fuentes originales.

Artículo de revisión: documento resultado de una investigación donde se analizan, sistematizan e integran los resultados de las investigaciones publicadas o no publicadas, sobre un campo en ciencia o tecnología, con el fin de dar cuenta de los avances y las tendencias de desarrollo. Se caracteriza por presentar una cuidadosa revisión bibliográfica de al menos 50 referencias.

3. FORMATO DEL ARTÍCULO

3.1 Del lenguaje y estilo apropiado para la redacción de artículos

- Deben emplearse estructuras de oraciones simples, evitando las que sean demasiado largas o complejas.
- El vocabulario empleado debe ser básico y común. Los términos técnicos deben explicarse brevemente; asimismo, el significado de las siglas debe presentarse la primera vez que estas aparecen en el texto.
- Los autores son responsables de que su trabajo sea conducido de una manera profesional y ética.

3.2 De la extensión de los documentos

Los artículos no deben tener una extensión de más de 25 páginas en tamaño carta y a doble espacio, con márgenes simétricas de 3 cm. Solo en el caso de los artículos de revisión las 25 páginas no incluyen las referencias bibliográficas.

3.3 Del formato de presentación

Los artículos presentados deben ser trabajos inéditos escritos en español o inglés y deben digitalizarse en Microsoft Word (2003 en adelante), cumpliendo con las siguientes indicaciones:

Letra *Times New Roman* de 12 puntos (a excepción de que se requiera lo contrario para algunos apartados).

- Una columna a doble espacio.
- Todas las márgenes de 3 cm.
- Los párrafos se justifican, y no debe haber espacio entre los consecutivos.
- No incluir saltos de página o finales de sección.
- Si se desea resaltar palabras o frases del texto, no usar letra negrita sino letra cursiva.
- Los decimales se deben señalar con coma (,) y no con un punto.

- Los millares y millones se deben señalar con un espacio fino.
- Evitar las notas de pie de página.
- Se debe utilizar nomenclatura arábica hasta el tercer nivel únicamente.

3.4 De la estructura del documento

Los trabajos deben tener la siguiente estructura y cumplir con los siguientes requisitos:

Composición de un artículo

Todos los artículos remitidos para su evaluación y posible publicación por parte de la revista *Tecnura* deben tener por lo menos los siguientes componentes:

- Título en español e inglés.
- Información de los autores.
- Resumen en español e inglés.
- Palabras clave en español e inglés.
- Introducción.
- Conclusiones.
- Trabajo futuro (opcional).
- Agradecimientos (opcional).
- Referencias bibliográficas.

Si el artículo es de investigación científica y tecnológica deben tener, además de lo anterior, los siguientes componentes:

- Metodología.
- Resultados.
- Financiamiento.

Título

El título del artículo deberá ser corto o dividido en título y subtítulo, atractivo para el lector potencial y escrito en mayúscula sostenida. Este debe aparecer centrado entre las márgenes, escrito con letra *Times New Roman*, en negrita, tamaño de fuente 18. El título del artículo debe ir en español e inglés separado por un espacio doble. Máximo 20 palabras.

Autores

Después del título debe escribirse el (los) nombre(s) completo(s) del (los) autor(es), acompañado de los datos biográficos básicos: título de pregrado, título de posgrado, ocupación o cargo, afiliación institucional (institución donde labora), dependencia, ciudad, país y correo electrónico. La información anterior debe ir inmediatamente debajo del nombre del autor.

Resumen

Debe establecer el objetivo y alcance del trabajo, una descripción clara y concisa de la metodología, los resultados y las conclusiones obtenidas. Máximo 250 palabras.

Palabras clave

Debe escogerse entre tres y diez palabras clave, escritas en español con letra *Times New Roman*, en negrita y cursiva.

Las palabras clave deben estar escritas en orden alfabético y ser de uso estandarizado, para lo cual se sugiere utilizar bases de datos internacionales según el área del conocimiento. Por ejemplo, en el área de Eléctrica y Electrónica se sugiere utilizar el tesoro de la UNESCO que se pueden encontrar en la página:<http://databases.unesco.org/thessp>.

Abstract

Debe ser una traducción correcta y precisa al idioma inglés del texto que aparece en el resumen en español.

Keywords

Debe ser una traducción correcta y precisa al idioma inglés de la lista de palabras clave en español.

Las *keywords* deben estar escritas en el orden de las palabras clave y ser de uso estandarizado, para lo cual se sugiere utilizar bases de datos internacionales según el área del conocimiento. Por ejemplo, en el área de Eléctrica y Electrónica se sugiere utilizar los Tesoros de la IEEE y/o World Bank que se pueden encontrar en las siguientes páginas respectivamente:http://www.ieee.org/documents/2009Taxonomy_v101.pdf, <http://multites.net/mtsql/wb/site/default.asp>

Introducción

Debe describir el planteamiento general del trabajo, así como contexto, antecedentes, estado de arte de la temática abordada, objetivo y posible alcance del trabajo.

Metodología

La redacción de este apartado debe permitir a cualquier profesional especializado en el tema replicar la investigación.

Resultados

Explicación e interpretación de los hallazgos. Si es necesario, se puede presentar una discusión breve y enfocada a la interpretación de los resultados.

Conclusiones

Implicación de los resultados y su relación con el objetivo propuesto.

Financiamiento

Mencionar la investigación asociada de la cual se derivó el artículo y la entidad que avaló y financió dicha investigación.

Agradecimientos

Preferiblemente deben ser breves y deben incluir los aportes esenciales para el desarrollo del trabajo.

Ecuaciones

Deben aparecer centradas con respecto al texto principal. Las ecuaciones deben ser referenciadas con números consecutivos (escritos entre paréntesis cerca al margen derecho). Las ecuaciones se citan en el texto principal empleando la palabra ecuación y seguida del número entre paréntesis. Las ecuaciones deben ser elaboradas en un editor de ecuaciones apropiado y compatible con el paquete de software InDesign, por ejemplo, el editor de ecuaciones de Windows.

Tablas

Para el caso de realización de tablas se recomienda que estas no sean insertadas como imágenes,

considerando que en este formato no pueden ser modificadas. El encabezado de cada tabla debe incluir la palabra Tabla (en negrita) seguida del número consecutivo correspondiente y de un breve nombre de la tabla. El encabezado debe estar escrito con letra Times New Roman, en cursiva y tamaño de fuente 9.

No se presentan cuadros sino tablas y estas se deben levantar automáticamente desde el procesador de textos. Las tablas deben ir nombradas y referenciadas en el artículo, en estricto orden. Toda tabla debe tener en su parte inferior la fuente de la que fue tomada, o mencionar que es autoría de los autores si es el caso.

Figuras

Todas las figuras o fotografías deben enviarse en formato PNG o TIFF con una resolución mínima de 300 DPI, adaptadas a escala de grises.

El pie o rótulo de cada figura debe incluir la palabra Figura (en negrita) seguida del número consecutivo correspondiente y de una breve descripción del contenido de la figura. El pie de figura debe estar escrito con letra Times New Roman, en cursiva y tamaño de fuente 9. Las figuras deben ir nombradas y referenciadas en el artículo, en estricto orden. Toda figura debe tener también la fuente de la que fue tomada, o mencionar que es autoría de los autores si es el caso.

Símbolos

Los símbolos de las constantes, variables y funciones en letras latinas o griegas –incluidos en las ecuaciones– deben ir en cursiva; los símbolos matemáticos y los números no van en cursiva. Se deben identificar los símbolos inmediatamente después de la ecuación. Se deben utilizar las unidades, dimensiones y símbolos del sistema internacional.

Cuando se empleen siglas o abreviaturas, se debe anotar primero la equivalencia completa, seguida de la sigla o abreviatura correspondiente entre paréntesis y en lo subsecuente se escribe solo la sigla o abreviatura respectiva.

Referencias bibliográficas

El estilo de citación de referencias adoptado por la revista **Tecnura** es APA sexta edición. Las citas, referencias bibliográficas e infografía se incluyen al final del artículo. Las referencias bibliográficas deben ordenarse alfabéticamente de acuerdo con el primer apellido del primer autor, sin numeración.

Solo deben aparecer las referencias que fueron citadas en el texto principal del trabajo, en las tablas o en las figuras. Es decir, en la lista no deben aparecer otras referencias aunque hayan sido consultadas por los autores para la preparación del trabajo. Sugerimos utilizar herramientas como: *Citas y bibliografía* de Microsoft Word (para APA sexta edición versión 2013 o superior), *Zotero*, *Mendeley*, entre otras.

El llamado de una referencia bibliográfica se inserta en el texto, en el punto pertinente, bajo ciertas características:

- Si la oración incluye el apellido del autor, solo se debe escribir la fecha dentro de un paréntesis, ejemplo:
Cuando Vasco (2012), analizó el problema de presentado en
- Cuando no se incluye el autor en la oración, debe ir entre el paréntesis el apellido y la fecha.
La investigación de materiales dio una visión en el área (Martínez, 2012).
- Si el documento u obra tiene más de dos autores, se debe citar la primera vez con todos los apellidos.
1990. (Fernández Morales, Villa Krieg & Caro de Villa, 2008)
- En las menciones siguientes, solo se debe escribir el primer apellido del autor, seguido de un "et al".
En cuanto al estudio de las aguas, Fernández Morales et al. (2008) encontraron que ...
- Cuando el documento u obra tiene más de seis autores, se debe utilizar desde la primera mención el "et al".

A continuación se describen una serie de ejemplos de las referencias más utilizadas, según

el estilo de referencias adoptado por la revista *Tecnura*:

Publicaciones Periódicas:

Forma Básica

Apellidos, A. A., Apellidos, B. B. & Apellidos, C. C. (Fecha). Título del artículo. *Título de la publicación*, volumen (número), pp. xx-xx. doi: xx.xxxxxxx

Artículo básico

Guevara López, P., Valdez Martínez, J., Agudelo González, J., & Delgado Reyes, G. (2014). Aproximación numérica del modelo epidemiológico SI para la propagación de gusanos informáticos, simulación y análisis de su error. *Revista Tecnura*, 18(42), 12 -23. doi:<http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.4.a01>

Artículo web

Rodríguez Páez, S., Fajardo Jaimes, A., & Páez Rueda, C. (2014). Híbrido rat-race miniaturizado para la banda ISM 2,4 GHZ. *Revista Tecnura*, 18(42), 38-52. Recuperado de <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/article/view/8059/9675>

Libros:

Forma Básica

Apellidos, A. A. (Año). *Título*. Ciudad: Editorial.
Apellidos, A. A. (Año). *Título*. Recuperado de <http://www.xxxxxx.xxx>
Apellidos, A. A. (Año). *Título*. doi: xx.xxxxxxx
Apellidos, A. A. (Ed.). (Año). *Título*. Ciudad: Editorial.

Libro con autor

Goleman, D. (2000). *La inteligencia emocional: Por qué es más importante que el cociente intelectual*. México: Ediciones B.

Libro con editor:

Castillo Ortiz, A. M. (Ed.). (2000). *Administración educativa: Técnicas, estrategias y prácticas gerenciales*. San Juan: Publicaciones Puertorriqueñas

Libro versión electrónica:

Montero, M. & Sonn, C. C. (Eds.). (2009). *Psychology of Liberation: Theory and applications*. [Versión de Springer]. doi: 10.1007/978-0-387-85784-8

Informe técnico:

Forma Básica

Apellidos, A. A. (Año). *Título*. (Informe Núm. xxx). Ciudad: Editorial

Informe con autores

Weaver, P. L., & Schwagerl, J. J. (2009). U. S. *Fish and Wildlife Service refuges and other nearby reserves in Southwestern Puerto Rico*. (General Technical Report IITF-40). San Juan: International Institute of Tropical Forestry.

Informe de una agencia del gobierno

Federal Interagency Forum on Child and Family Statistics. *America's Children: Key National Indicators of Well-Being, 2009*. Washington, DC: U.S. Government Printing Office. Recuperado de <http://www.childstats.gov/pubs/index.asp>

Tesis

Forma Básica

Apellidos, A. A. (Año). *Título*. (Tesis inédita de maestría o doctorado). Nombre de la institución, Localización.

Tesis inédita, impresa

Muñoz Castillo, L. (2004). *Determinación del conocimiento sobre inteligencia emocional que poseen los maestros y la importancia que le adscriben al concepto en el aprovechamiento de los estudiantes*. (Tesis inédita de maestría). Universidad Metropolitana, San Juan, PR.

Tesis de base de datos comercial

Santini Rivera, M. (1998). *The effects of various types of verbal feedback on the performance of selected motor development skills of adolescent males with Down syndrome*. (Tesis doctoral). Disponible

en la base de datos ProQuest Dissertations and Theses. (AAT 9832765).

Tesis web

Aquino Ríos, A. (2008). *Análisis en el desarrollo de los temas transversales en los currículos de español, matemáticas, ciencias y estudios sociales del Departamento de Educación*. (Tesis de maestría, Universidad Metropolitana). Recuperado de http://suagm.edu/umet/biblioteca/UMTESIS/Tesis_Educacion/ARAquinoRios1512.pdf

Estándares o patentes

Forma Básica

Apellidos, A. A. Título de la patente. País y número de la patente. Clasificación de la patente, fecha de concesión oficial. Número y fecha de solicitud de la patente, paginación.

Hernández Suárez, C. A., Gómez Saavedra, V. A., & Peña Lote, R. A. Equipo medidor de indicadores de calidad del servicio de energía eléctrica para usuario residencial. Colombia., 655. G4F 10/0, 15 de Marzo 2013. 27 de Octubre 2011, 147

4. ENVÍO DE ARTÍCULOS

Los autores deben enviar sus artículos a través de la aplicación para tal fin del Open Journal System en formato digital, adjuntando la carta de presentación y el formato de información artículo-autores.

4.1 Carta de presentación

El artículo debe ir acompañado de una carta de presentación dirigida al director y editor de la revista, Ing. Cesar Augusto García Ubaque, donde incluya:

- Solicitud expresa de considerar su artículo para publicarlo en la revista Tecnura.
- Título completo del trabajo.
- Nombres completos de todos los autores del trabajo.
- Certificación de la originalidad y el carácter inédito del trabajo.

- Exclusividad de su remisión a la revista *Tecnura*.
- Confirmación de la autoría con la firma de todos los autores.

Esta carta deberá estar firmada por todos los autores, escanearse y enviarse junto con los demás documentos solicitados.

4.2 Formato de información artículo-autores

El artículo además debe ir acompañado de un formato de información sobre el artículo y sus autores, el cual se puede descargar de la página web de la revista *Tecnura*: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>, en la sección "Formatos y Documentos". Es importante completar todos los campos de información solicitados, algunos de ellos tienen comentarios para aclarar mejor lo que se está solicitando. El formato no debe escanearse.

4.3 Artículo

Artículo en formato digital (Word 2003 en adelante) que cumpla con todas las normas de presentación descritas en el capítulo 3, "Formato del artículo", de la presente en las instrucciones a los autores.

5. PROCEDIMIENTO PARA LA PUBLICACIÓN

El procedimiento que sigue la revista *Tecnura* para la evaluación y posible publicación de los trabajos enviados por los autores es el siguiente en orden cronológico:

1. Envío del artículo acompañado de la carta de presentación y el formato de información por parte de los autores.
2. Notificación al autor de correspondencia de la recepción del artículo.
3. Verificación del tema del artículo con respecto a las áreas de interés de la revista.
4. Verificación de las normas de presentación por parte del monitor de la revista.
5. Notificación al autor de correspondencia de la evaluación de las normas de presentación.

6. Envío de las correcciones realizadas por los autores con respecto a la evaluación de las normas de presentación.
7. Envío del artículo a los árbitros seleccionados.
8. Notificación del inicio del proceso de arbitraje del artículo.
9. Notificación a los autores de la decisión tomada por el Comité Editorial y de las evaluaciones hechas por los árbitros.
10. Envío de las correcciones realizadas por los autores con respecto a las evaluaciones de los árbitros.
11. Estudio de la versión final del artículo y de las evaluaciones de los árbitros por parte del Comité Editorial.
12. Envío por parte de los autores de la carta de cesión de derechos al editor de la revista.
13. Envío de la versión con corrección de estilo y diagramada a los autores.
14. Verificación de errores y aprobación final de la versión con corrección de estilo y diagramada por parte de los autores.
15. Publicación del artículo en el número correspondiente de la revista *Tecnura*.
16. Notificación a los autores de la publicación del número de interés.
17. Envío de un ejemplar de la revista a cada autor del artículo publicado.

6. PROCESO DE ARBITRAJE DE ARTÍCULOS

Considerando la periodicidad trimestral de la revista, el Comité Editorial realiza cuatro convocatorias anuales para la recepción de artículos, aproximadamente en los meses de febrero, mayo, agosto y noviembre. Los artículos serán recibidos hasta la fecha máxima establecida en cada convocatoria.

Una vez recibidos los artículos el monitor de la revista realizará una primera evaluación de forma para verificar que cumplan con todos los elementos mencionados en esta guía de instrucciones a los autores. Luego de recibir nuevamente el artículo con las correcciones de forma solicitadas por el

monitor de la revista, este será sometido a evaluación por tres pares académicos (paulatinamente se espera incorporar un mayor número de pares externos que participen en el proceso).

Cada artículo remitido a la revista *Tecnura* es revisado por dos pares académicos externos a la institución de los autores, mediante un proceso de "revisión entre pares" (*Peer-review*) de doble-ciego, garantizando el anonimato de los autores y evaluadores; se considera confidencial todo trabajo recibido y así se le exige a sus evaluadores.

Las posibles conclusiones de los resultados de la evaluación por parte de los árbitros son únicamente tres: publicar el artículo sin modificaciones, publicar el artículo con modificaciones o no publicar el artículo.

Posteriormente, el Comité Editorial toma la decisión de publicar o no los artículos, con base en los resultados de las evaluaciones realizadas por los árbitros asignados. En caso de existir contradicciones en las evaluaciones con respecto a la publicación de un artículo, el Comité Editorial enviará el artículo a un tercer árbitro y se inclinará por las dos evaluaciones que tengan el mismo concepto respecto a la publicación del artículo.

En cada convocatoria el autor de correspondencia debe sugerir al menos cuatro posibles evaluadores externos a su institución laboral, los cuales deben ser especialistas en el tema específico del artículo remitido, tener al menos maestría y por lo menos dos deben ser internacionales. Los posibles evaluadores pueden pertenecer a una universidad o industria, pública o privada; de estos se debe proporcionar el nombre completo, su formación académica más alta, su afiliación institucional y su correo electrónico. Estos cuatro potenciales

evaluadores serán analizados por el Comité Editorial a fin de ampliar la base de datos de los árbitros de la revista *Tecnura*.

El Comité Editorial de la revista *Tecnura* se reserva los derechos de impresión, reproducción total o parcial del artículo, así como el de aceptarlo o rechazarlo. Igualmente, se reserva el derecho de hacer cualquier modificación editorial que estime conveniente; en tal caso el autor recibirá por escrito recomendaciones de los evaluadores. Si las acepta, deberá entregar el artículo con los ajustes sugeridos dentro de las fechas fijadas por la revista para garantizar su publicación dentro del número programado.

6. CONTACTO

Para cualquier solicitud de información adicional puede comunicarse a través del correo electrónico de la revista *Tecnura*: tecnura@udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com, o por mensajería con el Ing. Cesar Augusto García Ubaque, Director y Editor de la revista *Tecnura*, a la dirección:

Revista Tecnura
Sala de Revistas, Bloque 5, Oficina 305.
Facultad Tecnológica
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Transversal 70 B N. 73 a 35 sur
Teléfono: 571 – 3238400 Extensión: 5003
Celular: 57–3153614852
Bogotá D.C., Colombia
Email:
tecnura.ud@correo.udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com
Página web:
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

Tecnura journal District francisco José de caldas university Faculty of technology

CONTENT

- **Scope and editorial policy of the journal**
- **Type of accepted articles**
- **Article format**
- **Article submission**
- **Publication procedure**
- **Article arbitration**
- **Contact**

SCOPE AND EDITORIAL POLICY OF THE JOURNAL

Tecnura journal is an institutional publication of the Faculty of Technology from University Francisco José de Caldas. It is a scientific and technological publication with quarterly periodicity, which is published in January, April, July and October. The first issue appeared in the second semester of 1997 and up to now it has maintained its regularity.

The areas of interest of *Tecnura journal* are focused on all engineering fields such as electronics, telecommunications, electricity, systems, industrial, mechanics, cadastral, civil, environmental, among others. However, it is not restricted to those; it also has room for education and health issues, as long as they are related to engineering. The journal will only publish concerning scientific and technological research, reflection and revision. In consequence, during the initial editorial evaluation, short articles and case reports will be rejected.

Tecnura Journal is addressed for professors, researchers, students and professionals interested in permanent update of their knowledge and follow-up of scientific-technologic processes in the field of engineering. *Tecnura Journal* has as mission to disseminate results of research projects in

the areas of engineering, through the publication of original and unpublished articles, conducted by academics and professionals accredited by public or private national or foreign institutions. Articles submitted to *Tecnura journal* must be unpublished works written in Spanish or English; nevertheless, preference will be given to articles that show innovative concepts of great interest, related to the objective and scope of the journal.

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

Tecnura is a journal arbitrated by a revision process among double blind peers. The schedule of the conformation of its scientific and editorial committee is subject to the publication of articles in internationally indexed journals by their members.

District University Francisco José de Caldas, its directors, the editor, the editorial and scientific committee are not responsible for the opinions and the criteria expressed in the content of the articles

and they are published under the exclusive responsibility of the authors and do not necessarily reflect the ideas of the editorial committee.

In addition to the printed version, Tecnura journal also has a digital version available in its web page: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/index>

TYPE OF ARTICLES ACCEPTED

According to the classification of the Scientific and Technological Publications National Index (Publindex-Colciencias), *Tecnura* journal receives nominations of unpublished articles on the following topics:

- ***Scientific and technological research articles:*** document that presents, in a detailed manner, the original results of research projects. The generally used structure contains four main parts: introduction, methodology, results and conclusions.
- ***Reflection articles:*** document that presents research results from an analytic, interpretative or critic perspective from the author, dealing with a specific topic and adopting original sources.
- ***Review article:*** document that results from a research where the results of published or unpublished research on a science or technology field are analyzed, systematized and integrated, in order to state the advances and tendencies in development. It is characterized for presenting a careful bibliographical review of at least 50 references.

ARTICLE FORMAT

About the appropriate language and style for articles writing

- Authors must use simple sentence structures, avoiding those too long or complex.
- The vocabulary used must be basic and common. Technical language must be briefly explained; also, the meaning of the acronyms must be given the first time they appear in the text.
- The authors are responsible for their work to be conducted in a professional and ethic manner.

About the length of articles

The articles should not exceed 25 pages in letter size and double space, with symmetric margins of 3 cm. Only in the case of review articles, these 25 pages do not include references.

About the presentation format

Submitted articles must be unpublished works written in Spanish or English, and must be typed in Microsoft Word (2003 and beyond), complying with the following indications:

- *Times New Roman* letter, 12 point (except it is required for some sections).
- One column, double-spaced.
- All the margins 3 cm.
- Paragraphs should be justified without spaces between consecutives and without cutting words.
- Do not include page breaks or section finals.
- If you want to emphasize words or phrases from the text, do not use bold letters but italic.
- Decimals should be pointed with comma (,) and not with period (.).
- Thousands and millions should be pointed with a fine space.
- Avoid footnotes.
- Arabic nomenclature must be used only until the third level.

About the article structure

The papers must have the following structure and comply with the following requirements:

Composition of an article

All the articles submitted for evaluation and possible publication by the Tecnura Journal must have at least the following components:

- Title in Spanish and English.
- Information about the authors.
- Abstract in Spanish and English.

- Key words in Spanish and English.
- Introduction.
- Conclusions.
- Future work (optional).
- Acknowledgements (optional).
- Bibliographical references.

If the article is related to scientific and technological research must have, in addition to the above, the following components:

- Methodology.
- Results.
- Financing.

Title

The title of the article must be short or divided in title and subtitle, attractive for the potential reader and written in capital letters. It should appear centered between the margins, written in *Times New Roman* letter, in bold, font size 18. The title of the article has to be in Spanish and English separated by double space. Maximum 20 words.

Authors

After the title the complete name(s) of the author(s) must be written, with their basic biographical data: undergraduate degree, graduate degree, occupation or position, institutional affiliation (institution where they work), dependency, city, country and e-mail. The above information must be immediately below the author's name.

Abstract

The scope and purpose of the work must be established giving a clear and concise description of the methodology, results presented and the conclusions obtained. Maximum of 250 words.

Keywords

Between three and ten keywords must be chosen, written in English with *Times New Roman* letter in bold and italic.

Key words must be written in alphabetic order and must be as standard as possible, for which it is suggested the use of international databases according to the area of knowledge. For example, in the area of Electrics and Electronics it is suggested to use the IEEE thesaurus and World Bank thesaurus that can be accessed at the following web pages respectively:

http://www.ieee.org/documents/2009Taxonomy_v101.pdf

<http://multites.net/mtsql/wb/site/default.asp>

Abstract in Spanish

Translation to the Spanish language of the text that appears in the abstract, it must be correct and precise.

Keywords in Spanish

Translation to the English language of the keywords in Spanish, they must be correct and precise.

Keywords must be written in the order of the English version and must be as standard as possible, for which it is suggested the use of international databases according to the area of knowledge. For example, in the area of Electrics and Electronics it is suggested to use the UNESCO thesaurus that can be found at the following web pages:

<http://databases.unesco.org/thessp>

Introduction

The general idea of the work must be described, its context, backgrounds, state of the art of the topic, objectives and possible scope of the work.

Methodology

The writing of this part must allow any specialized professional in the topic to replicate the research.

Results

Explanation and interpretation of the findings. If necessary, a brief discussion focused on the interpretation of the results can be presented.

Conclusions

Implication of the results and their relation to the proposed objective.

Financing

Mention the associated research from which the article was derived and the entity that endorsed and financed the research.

Acknowledgments

They should preferably be brief and include the essential contributions for the development of the paper.

Equations

Equations must appear centered with respect to the main text. They must be referenced with consecutive numbers (written in parenthesis close to the right margin). Equations are cited in the main text employing the word equation, and followed by the number in parenthesis. Equations must be made in an appropriate equation editor and compatible with "InDesign" software, as for example the equation editor of Windows.

Tables

In the case of implementation of tables, it is recommended that these are not inserted as images, considering that in that format they cannot be modified. The title of each table must include the word table (in italic) followed by the corresponding consecutive number and a brief name of the table. The heading must be written in TNR letter, italic and font size 9.

Charts are not presented but tables and they should be automatically raised from the text processor. Tables should be named and referenced in the article, in strict order. Every table must have at the bottom the source from which it was taken, or to mention self-authorship if it is the case.

Figures

All the figures or pictures have to be sent in JPG or PNG format with a minimum resolution of 300 DPI, adapted to gray scale.

The footnote or name of each figure must include the word figure (in italic) followed by the corresponding consecutive number and a brief description of the content of the figure. The footnote of the figure must be written in *Times New Roman* letter, italic and font size 9. Figures must be named and referenced in the article, in strict order. Every figure must have at the bottom the source from which it was taken, or to mention self-authorship if it is the case.

Symbols

The symbols of the constants, variables and functions in Latin or Greek letters –included in the equations- must be in italic; the mathematical symbols and the numbers do not go in italic. The symbols must be identified immediately after the equation. Units, dimensions and symbols of the international system must be used

When using acronyms or abbreviations, the complete equivalence should be written first, followed by the corresponding acronym or abbreviation in parenthesis and from there it is only written the respective acronym or abbreviation.

Bibliographic references

The adopted reference citation style by *Tecnura* journal is APA sixth edition. The cites, bibliographic references and infography are included in the last part of the article. The bibliographic references must be alphabetically ordered according to the author's first surname, without numbering.

There should only appear the cited references in the main body of the work, in tables or in figures. It means, in the list there should not appear other references although they have been consulted by the authors for the work preparation. We suggest using tools such as: Cites and bibliography from Microsoft Word (for APA sixth edition version 2013 or superior), Zotero, Mendeley, among others.

The call for a bibliographic reference is inserted in the text, at the pertinent point, under certain characteristics:

- If the sentence includes the author's surname, it should only be written the date into a parenthesis, for instance:

Cuando Vasco (2012), analizó el problema de presentado en

- When the author is not included in the sentence, surname and date must be into a parenthesis.

La investigación de materiales dio una visión en el área (Martínez, 2012).

- If the document or work has more than two authors, the first cite must include all the surnames. 1990. (Fernández Morales, Villa Krieg & Caro de Villa, 2008)

- In the following mentions, it must only be written the author's first surname, followed by "et al."

En cuanto al estudio de las aguas, Fernández Morales et al. (2008) encontraron que ...

- When the document or work has more than six authors, it must be used from the first mention "et al."

Next it is described a series of examples of the more used references, according to the reference style adopted by *Tecnura* journal:

Periodical Publications:

Basic Form

Surnames, A. A., Surnames, B. B. & Surnames, C. C. (Date). Article's title. *Title of the publication*, volume (number), pp. xx-xx. doi: xx.xxxxxxx

Basic article

Guevara López, P., Valdez Martínez, J., Agudelo González, J., & Delgado Reyes, G. (2014). Aproximación numérica del modelo epidemiológico SI para la propagación de gusanos informáticos, simulación y análisis de su error. *Revista Tecnura*, 18(42), 12 -23. doi:http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.4.a01

Web article

Rodríguez Páez, S., Fajardo Jaimes, A., & Páez Rueda, C. (2014). Híbrido rat-race miniaturizado para la banda ISM 2,4 GHz. *Revista Tecnura*, 18(42),

38-52. Recuperado de <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/article/view/8059/9675>

Books:

Basic Form

Surnames, A. A. (Year). *Title*. City: Editorial.

Surnames, A. A. (Year). *Title*. Recovered from <http://www.xxxxxx.xxx>

Surnames, A. A. (Year). *Title*. doi: xx.xxxxxxx

Surnames, A. A. (Ed.). (Year). *Title*. City: Editorial.

Book with author

Goleman, D. (2000). *La inteligencia emocional: Por qué es más importante que el cociente intelectual*. México: Ediciones B.

Book with editor:

Castillo Ortiz, A. M. (Ed.). (2000). *Administración educativa: Técnicas, estrategias y prácticas gerenciales*. San Juan: Publicaciones Puertorriqueñas

Book electronic version:

Montero, M. & Sonn, C. C. (Eds.). (2009). *Psychology of Liberation: Theory and applications*. [Versión de Springer]. doi: 10.1007/ 978-0-387-85784-8

Technical report:

Basic Form

Surnames, A. A. (Year). *Title*. (Report No. xxx). City: Editorial

Report with authors

Weaver, P. L., & Schwagerl, J. J. (2009). *U. S. Fish and Wildlife Service refuges and other nearby reserves in Southwestern Puerto Rico*. (General Technical Report IITF-40). San Juan: International Institute of Tropical Forestry.

Report from a Government agency

Federal Interagency Forum on Child and Family Statistics. *America's Children: Key National Indicators of Well-Being, 2009*. Washington, DC: U.S. Government Printing Office. Recuperado de <http://www.childstats.gov/pubs/index.asp>

Thesis**Basic form**

Surnames, A. A. (Year). Title. (Unpublished master or doctorate thesis). Institution name, Location.

Unpublished thesis, printed

Muñoz Castillo, L. (2004). *Determinación del conocimiento sobre inteligencia emocional que poseen los maestros y la importancia que le adscriben al concepto en el aprovechamiento de los estudiantes*. (Tesis inédita de maestría). Universidad Metropolitana, San Juan, PR.

Commercial database thesis

Santini Rivera, M. (1998). *The effects of various types of verbal feedback on the performance of selected motor development skills of adolescent males with Down syndrome*. (Tesis doctoral). Disponible en la base de datos ProQuest Dissertations and Theses. (AAT 9832765).

Web thesis

Aquino Ríos, A. (2008). *Análisis en el desarrollo de los temas transversales en los currículos de español, matemáticas, ciencias y estudios sociales del Departamento de Educación*. (Tesis de maestría, Universidad Metropolitana). Recuperado de http://suagm.edu/umet/biblioteca/UMTESIS/Tesis_Educacion/ARAquinoRios1512.pdf

Standards or patents**Basic form**

Surnames, A. A. Title of the patent. Country and number of the patente. Classification of the patent, date of official license. Number and date of patent request, pagination.

Hernández Suárez, C. A., Gómez Saavedra, V. A., & Peña Lote, R. A. Equipo medidor de indicadores de calidad del servicio de energía eléctrica para usuario residencial. Colombia., 655. G4F 10/0, 15 de Marzo 2013. 27 de Octubre 2011, 147

ARTICLE SUBMISSION

Authors must submit their articles through the application Open Journal System in digital format, attaching the cover letter and the article-authors format.

Cover letter

The article must be submitted with a cover letter addressed to the director and editor of the journal, Engineer Cesar Augusto Garcia Ubaque, including:

- Specific request to consider your article to be published in Tecnura journal.
- Full title of the article.
- Full names of all the authors of the paper.
- Certification of the originality and unpublished character of the paper.
- Exclusivity of submission to Tecnura journal.
- Authoring confirmation with signature of all the authors.

This letter must be signed by all the authors, scanned and sent with the remaining requested documents.

Article-authors information format

The article has to be submitted with an information format about the article and its authors which can be downloaded from the web page of Tecnura journal <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/index>, in the section "Forms and Documents". It is important to complete all the fields of information requested, some of them have comments to clarify better what is being requested. The format must not be scanned.

Article

Article in digital format (Word 2003 and later editions) that complies with all the presentation rules described in chapter three, "Article structure", of this guide of instructions for authors.

PUBLICATION PROCEDURE

The procedure to be followed by Tecnura journal for the evaluation and possible publication of the papers sent by the authors is the following in chronological order:

1. Delivery of the article with the cover letter and the information format by the authors.
2. Notification to the author about the reception of the article.
3. Verification of the presentation rules by the monitor of the journal.
4. Notification to the author about the evaluation of the presentation rules.
5. Submission of corrections made by the authors related to the evaluation of presentation rules.
6. Submission of the articles to the selected arbitrators.
7. Notification of the beginning of the arbitration process of the article.
8. Notification to the authors about the decision made by the editorial committee, and about the evaluations made by the arbitrators.
9. Delivery of the corrections made by the authors with respect to the evaluations made by the arbitrators.
10. Study of the final version of the article and the evaluations of the arbitrators by the editorial committee.
11. Delivery by the authors of the letter that surrenders right to the editor of the journal.
12. Submission of the version with style corrections and diagrammed to the authors.
13. Verification of errors and final approval of the version with style corrections and diagrammed by the authors.
14. Publication of the article in the corresponding number of Tecnura journal.
15. Notification to the authors of the number of interest.
16. Delivery of a copy of the journal to each one of the authors of the published article.

ARTICLE ARBITRATION PROCESS

Considering the quarterly periodicity of the journal, the Editorial Committee makes four calls every year for the submission of articles, approximately in the months of February, May, August and November. The articles will be received until the date established in the call.

Once received the articles, the monitor of the journal will make an initial form evaluation to verify the completion of the elements mentioned in this guide of instructions to authors. After receiving again the article with the requested corrections by the journal's monitor, the paper will be submitted to evaluation by three academic peers (through time it is expected to include more external peers to participate in the process).

Each article sent to Tecnura journal is checked by two expert academic peers external to the institution of the authors, by a process of "Peer-review" of double blind, guaranteeing the anonymity of authors and evaluators; every paper sent is considered confidential and so it is demanded to evaluators.

Possible conclusions of the result of the evaluation by the judges are only three: publish the article without modifications, publish the article with modifications and not publish the article.

Subsequently, the Editorial Committee takes the decision to publish or not the articles, based on the results of the evaluations made by the assigned arbitrators. In case of contradictions in the evaluations with respect to the publication of an article, the editorial committee will send the article to a third peer and will be inclined for the two evaluations that have the same concept with respect to the publication of the article.

In each call the main author must suggest at least four possible external arbitrators to his work institution evaluators, who must be specialists in the specific topic of the article sent and must have at least Masters level, and at least two must to be international. Potential evaluators can belong to a university or industry, public or private; their

complete names must be provided, highest academic formation, institutional affiliation and e-mail. The editorial committee will analyze these four potential evaluators in order to enrich the database of arbitrators of *Tecnura* journal.

The Editorial Committee of *Tecnura* journal reserves the right to print, reproduce total or partially the article, as the right to accept or reject it. In the same way, it has the right to make any editorial modification that considers necessary; in this case the author will receive written recommendations from the evaluators. If accepted, authors must deliver the article with the suggested adjustments within the dates given by the journal to guarantee its publication in the programmed number.

CONTACT

For any additional information request, please send an e-mail to *Tecnura* journal tecnura@udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com or by mail to Cesar Augusto Garcia Ubaque, Director and Publisher of *Tecnura* Journal, to the following address:

Tecnura Journal
Journals Room, Block 5, Office 305.
Faculty of Technology
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Transversal 70 B N. 73 a 35 sur
Phone: 571-3238400 Extension: 5003
Mobile: 57-3153614852
Bogotá D.C., Colombia
Email:
tecnura.ud@correo.udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com
Web page:
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/index>



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

SUSCRIPCIÓN

Revista *Tecnura*

Nombre completo: _____

Institución u organización: _____

Factura a nombre de: _____

Dirección de envío: _____

Ciudad: _____ Departamento, Estado o provincia: _____

Código postal: _____ Apartado aéreo / P.O. Box: _____

País: _____ Correo electrónico: _____

Teléfono: _____ Fax: _____ Firma: _____

Tabla de costos de suscripción:

Región	1 Año	2 Años
Bogotá	40 000 COP	70 000 COP
Colombia	45 000 COP	80 000 COP
América Latina y el Caribe	40 USD	70 USD
Estados Unidos y Canadá	40 USD	70 USD
Otras regiones	60 USD	100 USD

Nota: los precios tanto en dólares como en pesos incluyen el valor del envío.

Diligenciar el formato de suscripción y enviarlo por correo junto con la copia del recibo de consignación a la dirección postal que aparece en el parte inferior de esta página o escaneado a los correos electrónicos tecnura.ud@correo.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>



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

SIGN UP

Tecnura journal

Full name: _____
Institution or organization: _____
Invoice name: _____
Mailing address/address: _____
City: _____ Department, state or province: _____
Zip code: _____ P.O. Box: _____
Country: _____ E-mail: _____
Phone number: _____ Fax: _____ Signature: _____

Table of subscription costs:

Región	1 year	2 year
Bogotá	23 USD	40 USD
Colombia	26 USD	46USD
Latin America and The Caribbean	40 USD	70 USD
The United States of America and Canada	40 USD	70 USD
Other regions	60 USD	100 USD

Note: prices in both dollars and pesos include the value of the shipment.

Fill out the subscription form and mail it along with a copy of the receipt of consignment to the e-mail address that appears in the bottom of this page or scanned to the following E-mails: tecnura.ud@correo.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 Garcia Ubaque PhD.
Editor and Publisher Tecnura Journal

Library

Technology Faculty
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Transversal 73A No. 70B-35 Sur
Phone: +57 - 1 - 7311542
Mobile: +57-3153614852
E-mail: tecnura@udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com