

EDITORIAL

CÉSAR AUGUSTO GARCÍA UBAQUE
DIRECTOR

INVESTIGACIÓN

Representación óptima de señales MER aplicada a la identificación de estructuras cerebrales durante la estimulación cerebral profunda

Optimal Representation of MER Signals Applied to the Identification of Brain Structures During Deep Brain Stimulation

HERNÁN DARÍO VARGAS CARDONA, MAURICIO ÁLVAREZ LÓPEZ, ÁLVARO OROZCO GUTIÉRREZ

Modelo AHP-VIKOR para handoff espectral en redes de radio cognitiva

AHP-VIKOR Model for Spectrum Handoff in Cognitive Radio Networks

CÉSAR HERNÁNDEZ SUÁREZ, INGRID PÁEZ, DIEGO ARMANDO GIRAL RAMÍREZ

Caracterización fisicoquímica de cuarzo en el municipio de La Playa de Belén, departamento de Norte de Santander

[T1] Physiochemical characterization of quartz in the municipality of La Playa de Belén-North Santander department

LINA MARCELA HOYOS PALACIO, EDWIN ESPINEL BLANCO*, YEIXON QUINTERO MARTÍNEZ

Análisis del comportamiento de los frenos de disco de los vehículos a partir de la aceleración del proceso de corrosión

Behavioral analysis of disc brake vehicle from accelerating the process of corrosion

RICARDO ANDRÉS GARCÍA LEÓN, MARÍA ANGÉLICA ACOSTA PÉREZ, EDER FLÓREZ SOLANO

Efectos de la radiación electromagnética sobre la germinación del maíz

Electromagnetic radiation effects on germination of corn

ALEXANDER ARMESTO ARENAS, WILSON ANGARITA, RAMÓN LOBO JÁCOME

Comportamiento de las ecuaciones de Saint-Venant en 1D y aproximaciones para diferentes condiciones en régimen permanente y variable

Performance of the Saint Venant equations in 1d and approaches to different conditions in steady and variable state

GLORIA ESTEFANY AMARÍS CASTRO, THOMAS EDISON GUERRERO BARBOSA, EDGAR ANTONIO SÁNCHEZ ORTIZ

Recomendación de productos a partir de perfiles de usuario interpretables

Products recommendation based on interpretable user profiles

CLAUDIA JEANNETH BECERRA CORTÉS, SERGIO GONZALO JIMÉNEZ VARGAS, FABIO AUGUSTO GONZÁLEZ OSORIO, ALEXANDER GELBUKH

Minería de datos aplicada a la demanda del transporte aéreo en Ocaña, Norte de Santander

Data mining applied to demand of air transport in Ocaña, North Santander

ALVEIRO ALONSO ROSADO GÓMEZ, ALEJANDRA VERJEL IBÁÑEZ

11 Metodología para la formulación de proyectos basada en la definición del problema

Problem-Definition-Based Methodology for Pre Formulation of Projects

OMAR IVÁN TREJOS BURITICA

ESTUDIO DE CASO

15 Desarrollo de algoritmo para detección y comando de robots humanoides en tareas de recolección

Development of an Algorithm for Humanoid Robot Detection & Command in Gathering Tasks

GERMÁN ANDRÉS VARGAS TORRES, RICARDO ANDRÉS CASTILLO ESTEPA

29 Parámetros de configuración en módulos XBEE-PRO® S2B ZB para medición de variables ambientales

Configuration Parameters in Module XBEE-PRO® ZB S2B for Measuring Environmental Variables

CARLOS ALBERTO VERA ROMERO, JHON ERICKSON BARBOSA JAIMES, DIANA CAROLINA PABÓN GONZÁLEZ

REVISIÓN

53 Gestión del espectro radioeléctrico en Colombia

Radio spectrum management in Colombia

ERNESTO CADENA MUÑOZ, HERMES JAVIER ESLAVA BLANCO, JOSÉ ALEJANDRO FRANCO CALDERÓN

175 Instrucciones para los autores

Instructions for authors

183 SUSCRIPCIÓN

SIGN UP

Tecnura

ISSN 0123-921X
Volumen 19 - Número 45
Julio - Septiembre de 2015

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad Tecnológica



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Revista Tecnura • Volumen 19 - Número 45 • Julio - Septiembre de 2015
p-ISSN: 0123-921X • e-ISSN: 2248-7638 • Bogotá D.C. Colombia

Tecnura

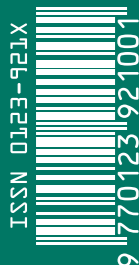
Tecnología y cultura, afirmando el conocimiento

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad Tecnológica

Representación óptima de señales MER aplicada a la identificación de estructuras cerebrales durante la estimulación cerebral profunda

Caracterización fisicoquímica de cuarzo en el municipio de La Playa de Belén, departamento de Norte de Santander

Recomendación de productos a partir de perfiles de usuario interpretables



ISSN 0123-921X



9 770123 921001

Tecnura

Tecnología y cultura, afirmando el conocimiento

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad Tecnológica

Vol. 19 No. 45
julio-septiembre 2015
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 Buriticá
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

EVALUADORES

Ph.D. Ing. Aldo Hernández Murua
Universidad de Sinaloa, México

Ph.D. Medico. Daniel Alfonso Botero Rosas
Universidad de La Sabana, Colombia

Ph.D. Ing. Daphne Ramos Delgado
Universidad de San Marcos, Perú

Ph.D. Ing. Grigori Sidorov
Instituto Politécnico Nacional, México

Ph.D. Ing. Gustavo Adolfo Isaza Echeverri
Universidad de Caldas, Colombia

Ph.D. Ing. Jorge Eliecer Camargo Mendoza
Universidad Antonio Nariño, Colombia

Ph.D. Ing. Jorge Iván Marín Hurtado
Universidad del Quindío, Colombia

Ph.D. Ing. Juan David Vásquez Jaramillo
Researcher at Uppsala University, Suecia

Ph.D. Físico. Julio Cesar Mosquera Mosquera
Universidad del Quindío, Colombia

Ph.D. Ing. Luz Karime Hernandez Gegen
Universidad de Pamplona, Colombia

Ph.D. Ing. Sir Alexci Suarez Castrillon
Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Colombia

Ph.D. Ing. Sonia Ordoñez Salinas
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Ph.D. Ing. Víctor González Castro
Universidad de Saint-Etienne, Francia

Ph.D (c). Gerson Delgado
Instituto Universitario de Tecnología Agroindustrial,
Venezuela

M.Sc. Ing. Jhon Jairo Suarez
Universidad de Pamplona, Colombia

M.Sc. Ing. Luis Eduardo Palomino Bolivar
Universidad de Caldas, Brasil

ASISTENTES DE LA REVISTA TECNURA

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

COORDINACIÓN EDITORIAL

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

Tecnura

Vol. 19 No. 45

julio-septiembre 2015

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), IndexCopernicus (Polonia), Informe Académico de Gale Cengage Learning (México), Periódica de la Universidad Nacional Autónoma de México (México), Oceanet (España) y Dialnet de la Universidad de la Rioja (España); también hace parte de los siguientes directorios: Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal Latindex (México); Índice Bibliográfico Actualidad Iberoamericana (Chile), e-Revistas (España), DOAJ (Suecia), Ulrich de Proquest (Estados Unidos).

FORMA DE ADQUISICIÓN

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

SUSCRIPCIÓN

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

REPRODUCCIÓN

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

DIRECCIÓN POSTAL

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

Felipe Solano Fitzgerald

CORRECCIÓN DE ESTILO PARA INGLÉS

Francisco Suárez Díaz

DIAGRAMACIÓN ELECTRÓNICA Y DISEÑO DE CUBIERTA

Julián Hernández - Taller de Diseño

IMPRESIÓN

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



**UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS**

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

EDITOR

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

EDITORIAL COMMITTEE

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

SCIENTIFIC COMMITTEE

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

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

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

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

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

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

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

EVALUATORS

Ph.D. Ing. Aldo Hernández Murua
Universidad de Sinaloa, México

Ph.D. Medico. Daniel Alfonso Botero Rosas
Universidad de La Sabana, Colombia

Ph.D. Ing. Daphne Ramos Delgado
Universidad de San Marcos, Perú

Ph.D. Ing. Grigori Sidorov
Instituto Politécnico Nacional, México

Ph.D. Ing. Gustavo Adolfo Isaza Echeverri
Universidad de Caldas, Colombia

Ph.D. Ing. Jorge Eliecer Camargo Mendoza
Universidad Antonio Nariño, Colombia

Ph.D. Ing. Jorge Iván Marín Hurtado
Universidad del Quindío, Colombia

Ph.D. Ing. Juan David Vásquez Jaramillo
Researcher at Uppsala University, Suecia

Ph.D. Físico. Julio Cesar Mosquera Mosquera
Universidad del Quindío, Colombia

Ph.D. Ing. Luz Karime Hernandez Gegen
Universidad de Pamplona, Colombia

Ph.D. Ing. Sir Alexci Suarez Castrillon
Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña,
Colombia

Ph.D. Ing. Sonia Ordoñez Salinas
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Ph.D. Ing. Víctor González Castro
Universidad de Saint-Etienne, Francia

Ph.D (c). Gerson Delgado
Instituto Universitario de Tecnología Agroindustrial,
Venezuela

M.Sc. Ing. Jhon Jairo Suarez
Universidad de Pamplona, Colombia

M.Sc. Ing. Luis Eduardo Palomino Bolivar
Universidad de Caldas, Brasil

TECNURA JOURNAL ASSISTANTS

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

EDITORIAL COORDINATION

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

Tecnura

Vol 19 No. 45

july-september 2015

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 electrical, telecommunications, electrical, computer, industrial, mechanical, cadastral, civil, environmental, etc. However, it is not restricted to those, there is also room for education and health topics as well, as long as they are related to engineering. The journal will only publish scientific and technological research, reflection and review articles.

MISSION

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

TARGET AUDIENCE

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

INDEXING

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

FORM OF ACQUISITION

Tecnura journal is available through purchase, exchange or subscription.

SIGN UP

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

REPRODUCTION

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

POSTAL ADDRESS

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

ORIGINAL DESIGN

Julián Hernández - Taller de Diseño

STYLE CORRECTION IN SPANISH

Hernando García Bustos

STYLE CORRECTION IN ENGLISH

Francisco Suárez Díaz ELECTRÓNIC

LAYOUT AND TITLE PAGE DISEGN

Julián Hernández - Taller de Diseño

PRINTED BY

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

DECLARACIÓN DE ÉTICA Y BUENAS PRÁCTICAS

DECLARACIÓN DE ÉTICA Y BUENAS PRÁCTICAS

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

Obligaciones y responsabilidades generales del equipo editorial

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

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

Relaciones con los lectores

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

Relaciones con los autores

Tecnura se compromete a asegurar la calidad del material que publica, informando sobre los objetivos y normas de la revista. Las decisiones de los editores para aceptar o rechazar un documento para su publicación se basan únicamente en la relevancia del trabajo, su originalidad y la pertinencia del estudio con relación a la línea editorial de la revista. La revista incluye una descripción de los procesos seguidos en la evaluación por pares de cada trabajo recibido. Cuenta con una guía de autores en la que se presenta esta información. Dicha guía se actualiza regularmente y contiene un vínculo a la presente declaración ética. Se reconoce el derecho de los autores a apelar las decisiones editoriales. Los editores no modificarán su decisión en la aceptación de envíos, a menos que se detecten irregularidades o situaciones extraordinarias. Cualquier cambio en los miembros del equipo editorial no afectará las decisiones ya tomadas, salvo casos excepcionales en los que confluyan graves circunstancias.

Relaciones con los evaluadores

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

Proceso de evaluación por pares

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

Reclamaciones

Tecnura se compromete responder con rapidez a las quejas recibidas y a velar para que los demandantes insatisfechos puedan tramitar todas sus quejas. En cualquier caso, si los interesados no consiguen satisfacer sus reclamaciones, se considera que están en su derecho de elevar sus protestas a otras instancias.

Fomento de la integridad académica

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

Protección de datos individuales

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

Seguimiento de malas prácticas

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

Integridad y rigor académico

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

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

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

Relaciones con los propietarios y editores de revistas

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

Conflicto de intereses

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

Quejas/denuncias

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

CODE OF ETHICS AND GOOD PRACTICE

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

General duties and responsibilities of the editorial board

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

- Joining efforts to meet the readers and authors' needs.
- Tending to the continuous improvement of the Journal.
- Ensuring quality of published material.
- Ensuring freedom of expression.
- Maintaining the academic integrity of their content.
- Prevent commercial interests compromise intellectual standards.
- Post corrections, clarifications, retractions and apologies when necessary.

Relations with readers

Readers will be informed about who has funded research and their role in the research.

Relations with authors

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

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

Relations with evaluators

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

Peer review process

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

Claims

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

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

Promoting Academic Integrity

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

Protection of individual data

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

Tracking malpractice

Tecnura accepts the obligation to act accordingly in case of suspected malpractice or misconduct. This obligation extends both to published 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

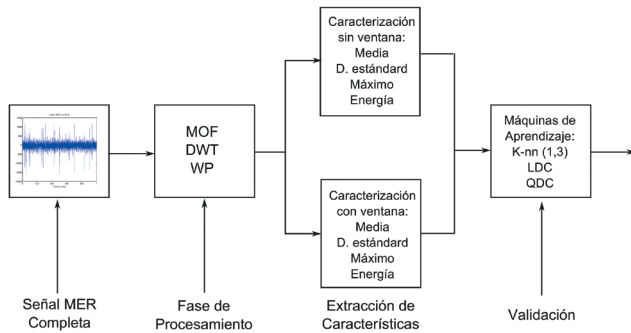
Any author, reader, reviewer or editor may refer their complaints to the competent authorities.

Contenido

EDITORIAL

11

INVESTIGACIÓN

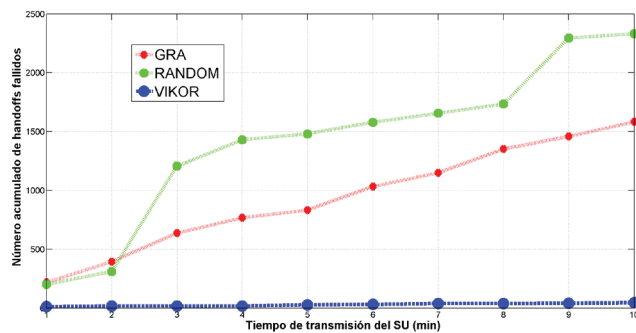


Representación óptima de señales MER aplicada a la identificación de estructuras cerebrales durante la estimulación cerebral profunda

15

Optimal Representation of MER Signals Applied to the Identification of Brain Structures During Deep Brain Stimulation

HERNÁN DARÍO VARGAS CARDONA, MAURICIO ÁLVAREZ LÓPEZ, ÁLVARO OROZCO GUTIÉRREZ

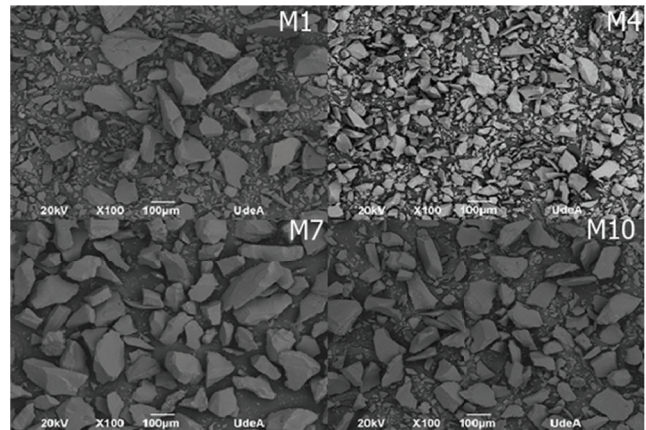


Modelo AHP-VIKOR para handoff espectral en redes de radio cognitiva

29

AHP-VIKOR Model for Spectrum Handoff in Cognitive Radio Networks

CÉSAR HERNÁNDEZ SUÁREZ, INGRID PÁEZ, DIEGO ARMANDO GIRAL RAMÍREZ

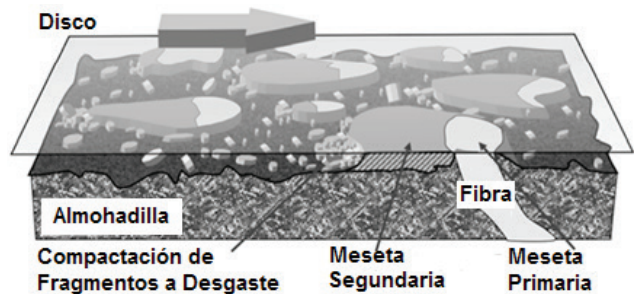


Caracterización fisicoquímica de cuarzo en el municipio de La Playa de Belén, departamento de Norte de Santander

41

[T1] Physiochemical characterization of quartz in the municipality of La Playa de Belén–North Santander department

LINA MARCELA HOYOS PALACIO, EDWIN ESPINEL BLANCO*, YEIXON QUINTERO MARTÍNEZ

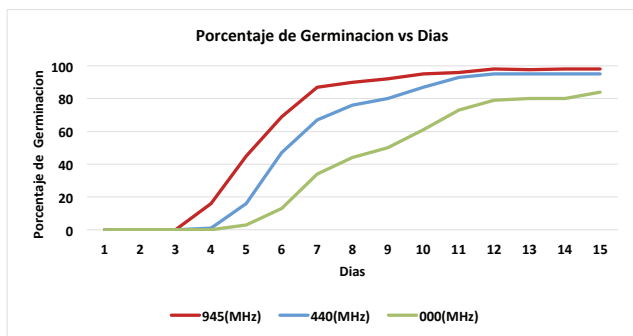


Análisis del comportamiento de los frenos de disco de los vehículos a partir de la aceleración del proceso de corrosión

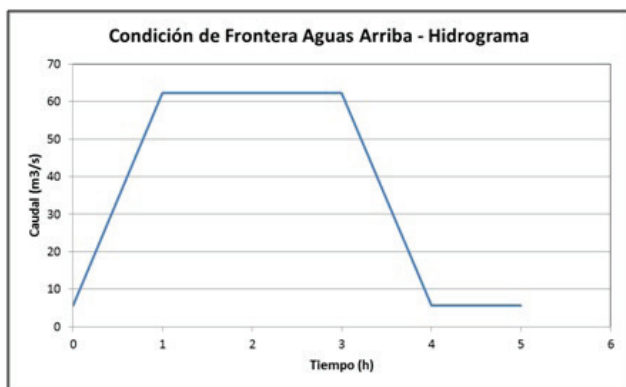
53

Behavioral analysis of disc brake vehicle from accelerating the process of corrosion

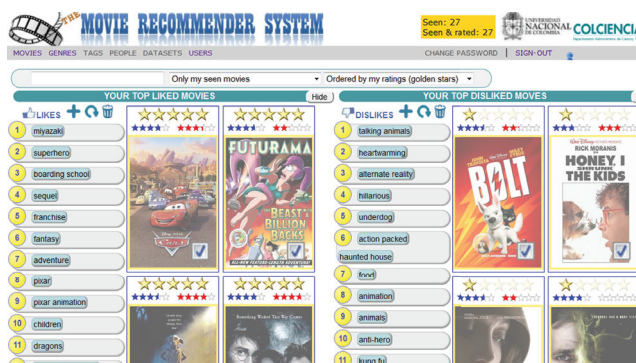
RICARDO ANDRÉS GARCÍA LEÓN, MARÍA ANGÉLICA ACOSTA PÉREZ, EDER FLÓREZ SOLANO



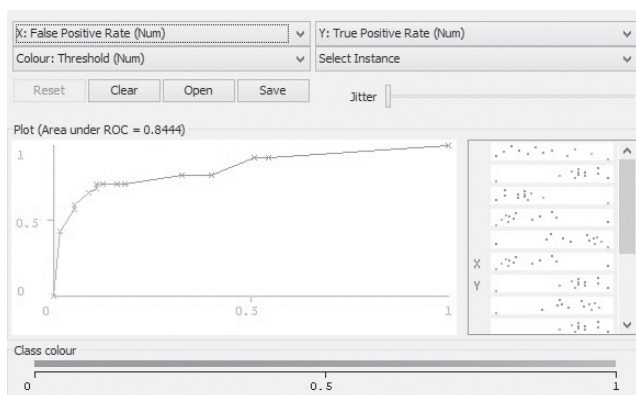
Efectos de la radiación electromagnética sobre la germinación del maíz 65
 Electromagnetic radiation effects on germination of corn
 ALEXANDER ARMESTO ARENAS, WILSON ANGARITA, RAMÓN LOBO JÁCOME



Comportamiento de las ecuaciones de Saint-Venant en 1D y aproximaciones para diferentes condiciones en régimen permanente y variable 75
 Performance of the Saint Venant equations in 1d and approaches to different conditions in steady and variable state
 GLORIA ESTEFANY AMARÍS CASTRO, THOMAS EDISON GUERRERO BARBOSA, EDGAR ANTONIO SÁNCHEZ ORTIZ



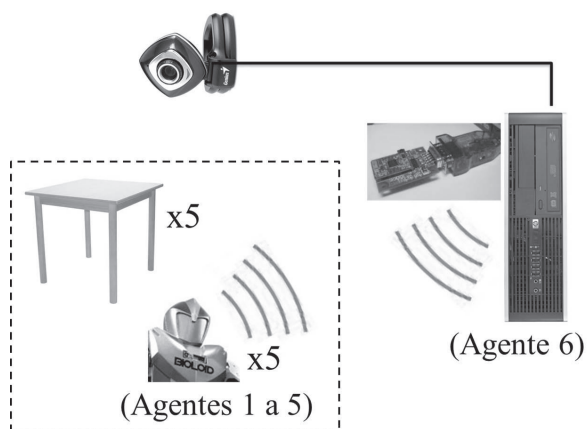
Recomendación de productos a partir de perfiles de usuario interpretables 89
 Products recommendation based on interpretable user profiles
 CLAUDIA JEANNETH BECERRA CORTÉS, SERGIO GONZALO JIMÉNEZ VARGAS, FABIO AUGUSTO GONZÁLEZ OSORIO, ALEXANDER GELBUKH



Minería de datos aplicada a la demanda del transporte aéreo en Ocaña, Norte de Santander 101
 Data mining applied to demand of air transport in Ocaña, North Santander
 ALVEIRO ALONSO ROSADO GÓMEZ, ALEJANDRA VERJEL IBÁÑEZ

Metodología para la formulación de proyectos basada en la definición del problema 115
 Problem-Definition-Based Methodology for Pre Formulation of Projects
 OMAR IVÁN TREJOS BURITICÁ

ESTUDIO DE CASO

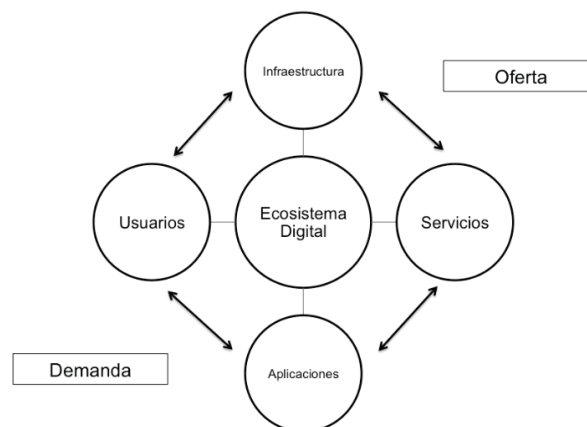


Desarrollo de algoritmo para detección y comando de robots humanoides en tareas de recolección 127

Development of an Algorithm for Humanoid Robot Detection & Command in Gathering Tasks

GERMÁN ANDRÉS VARGAS TORRES, RICARDO ANDRÉS CASTILLO ESTEPA

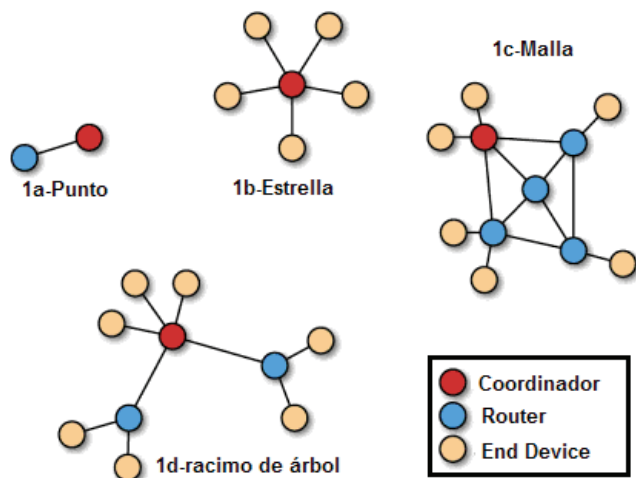
REVISIÓN



Gestión del espectro radioeléctrico en Colombia 159

Radio spectrum management in Colombia

ERNESTO CADENA MUÑOZ, HERMES JAVIER ESLAVA BLANCO, JOSÉ ALEJANDRO FRANCO CALDERÓN



Instrucciones para los autores 175

Instructions for authors 183

SUSCRIPCIÓN 191

SIGN UP 192

Parámetros de configuración en módulos XBEE-PRO® S2B ZB para medición de variables ambientales 141

Configuration Parameters in Module XBEE-PRO® ZB S2B for Measuring Environmental Variables

CARLOS ALBERTO VERA ROMERO, JHON ERICKSON BARBOSA JAIMES, DIANA CAROLINA PABÓN GONZÁLEZ

La legislación ambiental y la formulación de sus normas tienen características muy particulares que la hacen diferente de otro tipo de leyes. El fundamento y la filosofía de una norma de control ambiental—que fija niveles permisibles para el vertido de contaminantes en un recurso, bien sea el aire, el agua o el suelo—se basan en los conceptos de manejo y preservación ambiental. En este sentido, se podría afirmar que en aras de la protección del medio ambiente, en la sociedad actual se comparte el concepto del deber de restringir la descarga de cualquier tipo de contaminante a valores “razonables”.

Esta idea inicial llevó a desarrollar un segundo concepto: “existe algún grado máximo posible o alguno práctico de control de emisiones contaminantes, para fuentes de contaminación de una misma clase” que dio lugar al “control al final del tubo” (De Nevers, 2008). Con este fundamento, y con el objetivo de preservar el medio ambiente, resultaba práctico imponer este grado de control a todas las fuentes de emisión de esa misma clase. Según algunos autores, esta filosofía fue la base de la mayoría de actividades de control industrial, principalmente en Inglaterra entre 1863 y 1970 (Parker, 1980). Mediante ella, se pretendía imponer *el máximo control posible* para lograr *la mínima descarga posible*, y conseguir *el recurso (aire, agua o suelo) más limpio posible* (De Nevers, 1997).

El fundamento básico del *máximo control posible* se ha venido desarrollando en varios sentidos, y a este se han añadido otras variables como: costos, mercado, aceptabilidad social, entre otros, que forman parte de las diferentes consideraciones para el control ambiental. Hoy en día se habla de la mejor tecnología de control disponible BACT (*Best Available Control Technology*) o de tecnología de control razonablemente disponible RACT (*Reasonably Available Control Technology*), para producir el índice de emisiones más bajo alcanzable LAER (*Lowest Achievable Emission Rate*).

Conceptos como estos han introducido posibilidades de control no solamente al final del tubo, sino en a) la fuente, a partir de la optimización misma de los procesos susceptibles de producir emisiones contaminantes, incluyendo asuntos relacionados con materias primas; así como en b) el medio, que incluye entre otras consideraciones, el efecto acumulado y la capacidad de autodepuración o resiliencia del recurso. Esta perspectiva permite establecer de manera específica, zonas industriales y áreas de amortiguación, en función de las condiciones específicas de cada recurso (ejm. dirección y velocidad del viento, condición de las fuentes de agua, características de los suelos), que afectan los procesos de transporte y dispersión de contaminantes.

Estos análisis han llevado a establecer en la mayoría de reglamentaciones, como las de la EPA, valores numéricos como límites permisibles de emisión, expresados en términos de concentración y/o de carga contaminante según el tipo proceso. En forma paralela, ha sido necesario también establecer métodos de medición o evaluación para la verificación de su cumplimiento.

Como resultado, muchos autores coinciden en considerar este tipo de normas como un factor que ha impulsado el desarrollo permanente de la tecnología de control. Un caso concreto es el sector automotriz, en donde se ha obtenido un alto grado de reducción de emisiones vehiculares en el mundo durante los últimos 15 años.

La principal desventaja de fijar normas en términos de valores numéricos en la mayoría de países ha sido también la dificultad de establecer procedimientos que permitan una gradualidad en su cumplimiento, de acuerdo con la legislación de cada país y con los cambios tecnológicos. Por esta razón, es común encontrar en algunos países revisiones periódicas cada 10 o 15 años (De Nevers, 1997).

Uno de los aspectos que se ha venido desarrollando en el marco de la formulación de políticas

ambientales es la valoración económica de sus objetivos. Según los principios básicos de la Teoría Económica, que plantea que toda acción o cambio que se introduzca en la sociedad se traducirá en unos “costos”—también llamados *costos marginales*—y unos “beneficios”—llamados *beneficios marginales*—para el conjunto de la sociedad, o para algunos de sus miembros. En este sentido, es necesario considerar muchas variables (tangibles e intangibles) que permitan involucrar los costos del deterioro ambiental por causa de las emisiones, para de esta manera, determinar o establecer un estándar o “nivel de emisión razonable” para nuestra sociedad, de acuerdo con la *tecnología de control razonablemente disponible RACT*.

En este nivel óptimo, el *costo marginal* del control de emisiones debe ser igual para todos los agentes contaminantes y simultáneamente, igual a la suma de los *beneficios marginales* para todos los individuos, originados de la reducción de la contaminación.

La determinación de este nivel óptimo de contaminación requiere el conocimiento de las

funciones de costo de control y de costo de degradación ambiental, sin embargo, debido a dificultades prácticas en su determinación, este se basa en los costos de los equipos, su mantenimiento y operación; además de las medidas de control de emisiones y de la mitigación de los impactos ambientales. Tal determinación presenta un enfoque objetivo y depende de la estimación del costo del inventario de tecnologías y de medidas disponibles. La determinación de la función del costo de degradación involucra la valoración de bienes y servicios de uso público y la salud humana.

Para los bienes, este valor refleja la percepción de la sociedad sobre los beneficios proporcionados por el medio ambiente o el valor máximo que los particulares están dispuestos a pagar para utilizar el medio ambiente. En el caso de la salud humana, involucra el daño a las personas como enfermedades, muertes y malformaciones, entre otros. Es importante anotar que el cálculo de esta función es bastante subjetivo y variará de un individuo a otro, así como de un grupo social a otro (Azqueta, 1994; Freeman, 1997).

César Augusto García-Ubaque
Director

The environment legislation and its regulations formulation have very particular characteristics that make it different from other type of laws. The fundament and the philosophy of a environmental control regulation—which sets admissible levels for the contaminants spill in a resource, be it air, water or land – are based in concepts such as environmental management and conservation. In this sense, we could state that in favor of the environment protection, the current society shares the concept of the duty to restrict the spill of any type of contaminant to “reasonable” levels.

This initial idea allowed to develop a second concept: “there is a maximum possible rate or a practical one for control of contaminant emissions, for contamination sources of a same kind” which gave room to “*end-of-pipe control*” (De Nevers, 2008). With this fundament, and having as a goal the environment preservation, it was practical to impose this control rate to all emissions sources of that same kind. According to some authors, this philosophy was the base for most industrial control activities, mainly in England between 1863 and 1970 (Parker, 1980). Through it, it was intended to impose *the maximum possible control* in order to achieve *the minimum possible spill*, and get *the cleanest possible resource (air, water or land)* (De Nevers, 1997).

The basic fundament for *maximum possible control* has been developed in several ways, and some other variables have been added to it, such as: costs, market, social acceptability, among others, that make part of the different considerations for environment control. Nowadays the discussion is on the Best Available Control Technology (BACT) or the Reasonably Available Control Technology (RACT), to produce the Lowest Achievable Emission Rate (LAER).

Such concepts have introduced control possibilities not only at the end-of-pipe, but in a) the

source, through the optimization itself of processes liable to produce contaminant emissions, including issues related to prime matters; as well as in b) the environment, that includes among other considerations, the accumulated effect, and the capacity to self-purify or resource resilience. This perspective allows establishing specifically industrial zones and attenuation areas, in favor of the specific conditions of each resource (e.g. wind direction and speed, water sources conditions, land characteristics), that affect the processes of contaminants transport and spread.

These analyses have permitted to establish in most regulations, such as the EPA ones, numeric values as permissible emission limits, expressed in terms of concentration and/or contaminant load according to the type of process. Concurrently, it has also been necessary to establish measuring and evaluation methods or the verification of its compliance.

As a result, many authors agree on considering this type of regulations as a factor that has encouraged the permanent development of control technology. A specific case is the automotive sector, where it has been obtained a high rate of reduction in vehicle emissions in the world in the last 15 years.

The main disadvantage of setting regulations in terms of numeric values in most countries has been the difficulty to establish procedures that allow gradualness in its compliance, according to the legislation in each country and to the technological changes. That is why it is usual to find, in some countries, periodical revisions every 10 or 15 years (De Nevers, 1997).

One of the aspects that has been developed in the framework of the formulation of environment policies is the economical assessment of its objectives. According to the basic principles of the Economic Theory, stating that every action

or change introduced into the society will represent “costs” – also called *marginal costs* – and “benefits” – called *marginal benefits* – for the entire society, or for some of its members. In this sense, it is necessary to consider many variables (tangible and intangible) that allow involving the costs derived from the environment damage because of the emissions, in order to determine or establish a standard or “reasonable emission rate” for our society, according to the *Reasonably Available Control Technology* (RACT).

In this optimal level, the *marginal cost* for emissions control must be equal for all contaminant agents and simultaneously, equal to the adding of the *marginal benefits* for all individuals, originated in the contamination reduction.

The determination of this optimal level of contamination requires the knowledge of the functions for control cost and environment damage cost; however, due to practical difficulties in their determination,

this is based on the equipment costs, their maintenance and operation; as well as the steps for emissions control and the mitigation of environment impacts. Such determination presents an objective approach and depends on the estimation of the cost for technology inventory and available measures. The determination of the function for damage cost involves the assessment of the public goods and services and those related to human health.

In terms of the goods, this value reflects the perception of the society on the provided benefits by the environment or the maximum value that particulars are willing to pay for the use of the environment. In the case of the human health, it involves the damage to people with diseases, death and deformities, among others. It is important to note that the calculation of this function is quite subjective and will vary from one individual to another, as well as from a social group to another (Azqueta, 1994; Freeman, 1997).

César Augusto García-Ubaque
Director



Representación óptima de señales MER aplicada a la identificación de estructuras cerebrales durante la estimulación cerebral profunda

Optimal Representation of MER Signals Applied to the Identification of Brain Structures During Deep Brain Stimulation

Hernán Darío Vargas Cardona*, Mauricio A. Álvarez**, Álvaro Orozco Gutiérrez***

Fecha de recepción: 25 de septiembre de 2014

Fecha de aceptación: 6 de abril de 2015

Como citar: Vargas Cardona, H. D., Álvarez, M.A., & Orozco Gutiérrez, Á. (2015). Representación óptima de señales MER aplicada a la identificación de estructuras cerebrales durante la estimulación cerebral profunda. *Revista Tecnura*, 19(45), 15-27. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.3.a01

Resumen

La identificación de señales cerebrales provenientes de microelectrodos de registro (MER) es un procedimiento clave en la estimulación cerebral profunda (DBS en inglés) aplicada en pacientes con enfermedad de Parkinson (EP). El propósito de esta investigación es identificar con alta precisión una estructura cerebral llamada núcleo subtalámico (STN), ya que es la estructura objetivo donde se logran los mejores resultados terapéuticos de la DBS. Para ello, se presenta un enfoque de representación óptima de señales MER mediante el método de Frames (MOF por sus siglas en inglés), con el cual se obtienen coeficientes que minimizan la norma Euclidiana de orden 2. A partir de los coeficientes óptimos se realiza una extracción de características de las señales combinando diccionarios wavelet packet y coseno. Para tener un marco de comparación con el estado del arte, también se caracterizan las señales utilizando la transformada wavelet discreta (DWT) con diferentes funciones madre. La metodología propuesta se valida en una base de datos real, y se emplean máquinas de aprendizaje supervisadas simples, como el clasificador K-Nearest

Neighbors (K-NN), el clasificador lineal bayesiano (LDC) y el cuadrático (QDC). Los resultados de clasificación que se obtienen con el método propuesto mejoran significativamente el rendimiento alcanzado con la DWT, de manera que se logra una identificación positiva del STN superior al 97,6%. Los índices de identificación logrados por el MOF son muy precisos, ya que potencialmente se puede obtener una tasa de falsos positivos menores al 2% durante la DBS.

Palabras clave: aprendizaje de máquina, enfermedad de Parkinson, estimulación cerebral profunda, procesamiento digital de señales, señales MER.

Abstract

Identification of brain signals from microelectrode recordings (MER) is a key procedure during deep brain stimulation (DBS) applied in Parkinson's disease patients. The main purpose of this research work is to identify with high accuracy a brain structure called subthalamic nucleus (STN), since it is the target structure where the DBS achieves the best therapeutic results. To do this, we present an approach for optimal representation of MER signals

* Ingeniero electrónico, magíster en Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia. Contacto: hernan.vargas@utp.edu.co

** Ingeniero electrónico, doctor en Ciencias de la Computación, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia. Contacto: malvarez@utp.edu.co

*** Ingeniero electricista, doctor en Bioingeniería, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia. Contacto: aaog@utp.edu.co

through method of frames (MOF). We obtain coefficients that minimize the Euclidean norm of order two. From optimal coefficients, we extract some features from signals combining the wavelet packet and cosine dictionaries. For a comparison frame with the state of the art, we also process the signals using the discrete wavelet transform (DWT) with several mother functions. We validate the proposed methodology in a real data base. We employ simple supervised machine learning algorithms, such as the K-Nearest Neighbors classifier (K-NN), a linear

Bayesian classifier (LDC) and a quadratic Bayesian classifier (QDC). Classification results obtained with the proposed method improve significantly the performance of the DWT. We achieve a positive identification of the STN superior to 97,6%. Identification outcomes achieved by the MOF are highly accurate, as we can potentially get a false positive rate of less than 2% during the DBS.

Keywords: deep brain stimulation, digital signal processing, machine learning, MER signals, Parkinson's disease.

INTRODUCCIÓN

La enfermedad de Parkinson (EP) se relaciona con la pérdida de células pigmentadas de la *substantia nigra reticulata* (SNr), la cual produce un déficit acelerado de un neurotransmisor llamado dopamina (Nowinski, Belov, Pollak, & Benabid, 2005). Debido a este fenómeno, la EP puede generar desórdenes de los movimientos motores: temblor en extremidades, parálisis, disquinesias, trastornos en la marcha, entre otros (Bustamante, 2007; Guridi, Rodríguez, & Manrique, 2004). La estimulación cerebral profunda (DBS) es el tratamiento más común y exitoso para los pacientes que padecen enfermedad de Parkinson avanzada. La DBS ha sido aplicada en distintas estructuras cerebrales, como el globus pallidus internus (GPI) y el núcleo subtalámico (STN), y se ha visto que los síntomas de la EP mejoran significativamente en el paciente (Breit, Schulz, & Benabid, 2004). El procedimiento quirúrgico comprende la planeación del objetivo (especialmente el STN), el ajuste de un marco estereotáxico, exposición de la corteza, aseguramiento del electrodo y estimulación de estructuras vecinas (Nowinski, Belov, Pollak, & Benabid, 2005). Durante la cirugía, la actividad cerebral de las estructuras cerebrales puede ser capturada mediante microelectrodos exploratorios a través de señales que se conocen como registros de microelectrodo

(MER). Las señales MER están compuestas por la suma de descargas de la población neuronal de un pequeño volumen próximo a la punta del electrodo y presentan un comportamiento no estacionario debido a la contribución de varios factores, como la propia variación de las descargas, que no son exactamente iguales ni exactamente regulares en su ritmo. A esto se añaden otros como la pulsación cortical causada por la actividad cardiaca o respiratoria, la reducción sistemática de la amplitud de un potencial de acción cuando la célula se dispara con alta frecuencia, el movimiento sistemático del electrodo desde el sitio original de registro (Snider & Bonds, 1998) y el ruido neuronal de fondo (Pouzat, Delescluse, Viot, & Diebolt, 2004). La importancia del procesamiento y clasificación de señales MER durante la DBS en pacientes con EP radica en la necesidad de un soporte de decisión para localizar correctamente una zona cerebral objetivo y la respectiva implantación del microelectrodo estimulador. Es prioritario y crítico lograr los mejores resultados terapéuticos posibles en los pacientes y a la vez generar los mínimos efectos secundarios.

Previamente, se han abordado enfoques de procesamiento de señales MER basados en el análisis temporal de espigas (*spikes*) (Chan, et al., 2010; Orozco, Guarnizo, Alvarez, Castellanos, & Guisjarro, 2005), pero el rendimiento de este análisis

se reduce considerablemente, en zonas con baja actividad de *spikes*, como en la Zona Incerta (ZI). Otro enfoque muy común es el análisis tiempo-frecuencia, en el cual las señales MER se transforman a distintos espacios, por ejemplo, el espacio de la transformada corta de Fourier (STFT) (Novak, Daniluk, Elias, & Nazzaro, 2007), el espacio wavelet (WT) (Gemmar, Gronz, Henrichsand, & Hertel, 2008) y también con métodos empíricos como la transformada Hilbert-Huang (HHT) (Pinzon, Garcés, Orozco, & Nazzaro, 2009). Estas metodologías entregan resultados aceptables de clasificación, sin embargo no ofrecen buena generalización al momento de validar un sistema de identificación automática.

El procesamiento de señales no estacionarias y altamente oscilatorias, como las señales MER, requiere el uso de métodos especiales. El análisis por banco de filtros adaptativos es uno de los métodos de caracterización más potentes de las wavelet (Giraldo, Castellanos, & Orozco, 2008), donde los filtros adaptativos son un ensamble de descomposiciones wavelet adaptadas a las señales, construidos mediante esquemas lifting (LS), que a su vez se describen por operadores optimizados mediante algoritmos genéticos. En trabajos previos de

investigación (Pinzon, Orozco, Carmona, & Castellanos, 2010; Castellanos, Pinzon, Orozco, & Carmona, 2010), esta metodología de caracterización combinada con clasificadores sencillos como el bayesiano lineal y bayesiano cuadrático demostró ser muy eficiente para extraer información discriminante de las señales MER, pues se obtuvieron excelentes resultados de identificación del STN cercanas al 97%. Así mismo, en Guillén, Martínez, Sánchez, Argáez y Velásquez (2011), Orozco, Álvarez y Guijarro (2006) y Tahgya (2011) se implementaron clasificadores más sofisticados, como máquinas de Soporte Vectorial con Kernel polinomial y también basados en modelos ocultos de Markov (HMM), con lo cual se lograron resultados de hasta 98% en la identificación de estructuras corticales profundas. No obstante, la enorme dificultad en la adaptación de este tipo de algoritmos en sistemas de identificación en tiempo real, debido al alto costo computacional que demandan, hace que no se recomiende implementar estos métodos en herramientas automáticas de identificación *on-line*. La figura 1 muestra un esquema de las metodologías usadas en el estado del arte para procesar señales MER y sus porcentajes de identificación del STN.

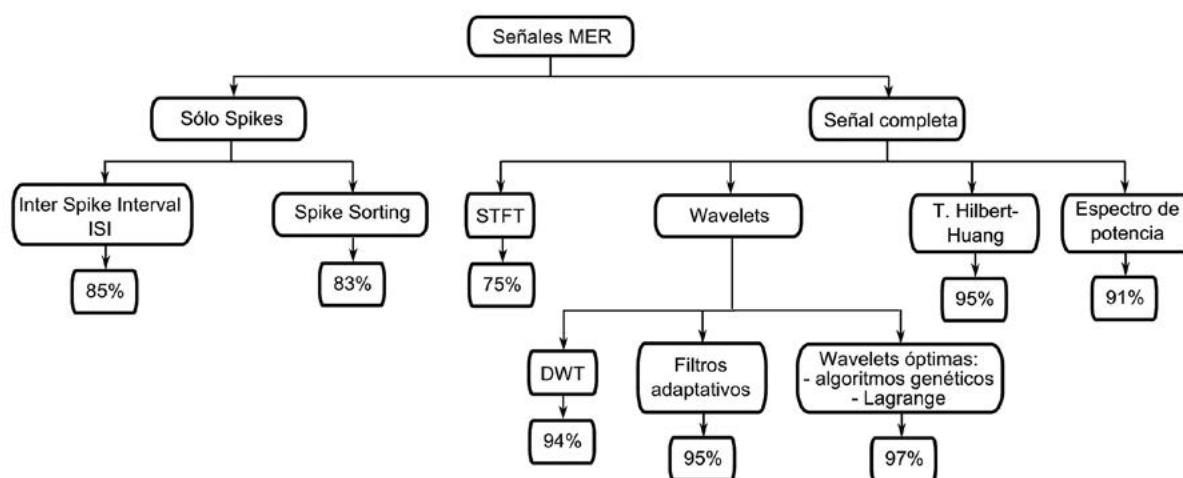


Figura 1. Esquema de métodos usados en el estado del arte para el procesamiento de señales MER con sus respectivos porcentajes de identificación de estructuras cerebrales.

Fuente: elaboración propia.

Debido a que los métodos tradicionales utilizados en el estado del arte se basan en transformadas tiempo-escala o tiempo-frecuencia que no ofrecen superresolución ni adaptabilidad, en este trabajo se propone una nueva metodología para representar y caracterizar las señales MER mediante una transformación optimizada basada en el método de Frames. La motivación de este trabajo es lograr simultáneamente una alta resolución y adaptabilidad en la representación de las señales MER, de modo que se puedan extraer características discriminantes que permitan identificar con alta precisión los registros provenientes del núcleo subtalámico durante la cirugía de la enfermedad de Parkinson. En este enfoque se busca representar las señales utilizando un conjunto de vectores redundantes llamados átomos (Ortoft-Endelt & La Cour-Harbo, 2005). Dichos átomos son obtenidos por medio de un conjunto de funciones base, que se conoce como diccionario (Huggins & Zucker, 2007). Hay varios diccionarios que se pueden implementar e incluso combinar: wavelets, wavelets segmentados, diccionario Gabor, diccionarios multiescala Gabor, wavelet packet (WP), coseno, chirplets y warplets (Chen, Donoho, & Saunders, 2001).

Se seleccionan los diccionarios WP y coseno debido a que, por validación cruzada, se encontró que estos se correlacionan mejor con las señales MER y logran los mejores índices de clasificación del STN. El método se valida en una base de datos real empleando máquinas de aprendizaje simples como el clasificador bayesiano lineal (LDC) y cuadrático (QDC), y el clasificador K-Nearest Neighbor (K-NN). Como marco de comparación se ejecutan los mismos experimentos de caracterización de las señales con la transformada wavelet discreta y con análisis multi-resolución.

Los resultados de identificación positiva del STN obtenidos con la metodología propuesta son mayores al 97,6%, con lo cual se mejora ampliamente al análisis wavelet y también se iguala el rendimiento logrado con wavelets optimizada mediante algoritmos genéticos (Castellanos, Pinzon, Orozco, & Carmona, 2010), o realizando clasificación

robusta con procesos gaussianos (Vargas, Orozco, & Álvarez, 2012), máquinas de soporte vectorial (Guillén, Martínez, Sánchez, Argáez, & Velásquez, 2011) y modelos ocultos de Markov (Orozco, Álvarez & Guijarro, 2006; Tahgva, 2011). Por el momento, esta metodología de procesamiento se está implementando en un sistema software, que ha sido probado por especialistas del Instituto de Epilepsia y Parkinson del Eje Cafetero.

MATERIALES Y METODOLOGÍA

Enfermedad de Parkinson y señales MER

La enfermedad de Parkinson (EP) es un trastorno crónico y progresivo del sistema nervioso central que se inicia entre los 40 y 70 años de edad y es poco frecuente antes de los 30. La pérdida de células pigmentadas de la *substantia nigra* y otros núcleos (*locus coeruleus*, núcleo motor dorsal del vago) es el motivo más constante en la EP (Ropper, 2002). En condiciones normales las células nigrales disminuyen en cantidad con el paso del tiempo de 425.000 a 200.000 a los 80 años (Braunwald, et al., 2001). En la EP las células pigmentadas se reducen al 30% de las que tiene un individuo sano de la misma edad (Hernández & Pedroza, 2002). Las neuronas que conforman el tejido cerebral del organismo generan impulsos eléctricos, característicos de áreas, funciones y estados fenomenológicos en la sustancia blanca y gris de todo el encéfalo. Esta actividad, cuando es captada mediante microelectrodos de registro (MER), refleja la suma de descargas de la población neuronal de un pequeño volumen próximo a la punta del electrodo, por lo cual esta información sirve de soporte para localizar zonas cerebrales específicas, donde se requiere excitar, lesionar o implantar grupos de células madre, como en el caso de la enfermedad de Parkinson, en la localización de dianas para tratar desórdenes obsesivos compulsivos severos, entre otros (Moore, Mahurin, & Christie, 2006).

Base de datos (DB-UTP)

La base de datos MER de la Universidad Tecnológica de Pereira (DB-UTP) está compuesta por registros de varios procedimientos quirúrgicos en pacientes con enfermedad de Parkinson, cuyas edades están entre 55 y 56 años (4 hombres, 2 mujeres). Todos los pacientes firmaron un consentimiento informado. Los registros se adquirieron con el sistema ISIS MER (Innomed Medical GmbH). Las señales MER fueron etiquetadas por médicos neurofisiólogos y especialistas del Instituto de Epilepsia y Parkinson del Eje Cafetero, que se localiza en la ciudad de Pereira, Colombia. En total, hay 600 registros neuronales divididos en dos clases: 300 señales del núcleo subtalámico (STN) y 300 de otras estructuras del cerebro (Tálamo, Tal; Zona Incierta, ZI; Substantia Nigra Reticulata, SNr). Cada registro tiene una duración de 1 segundo y son muestreados a una frecuencia de 25 kHz y 16 bits de resolución. En la figura 2 se ilustra un registro MER proveniente del núcleo subtalámico perteneciente a la DB-UTP.

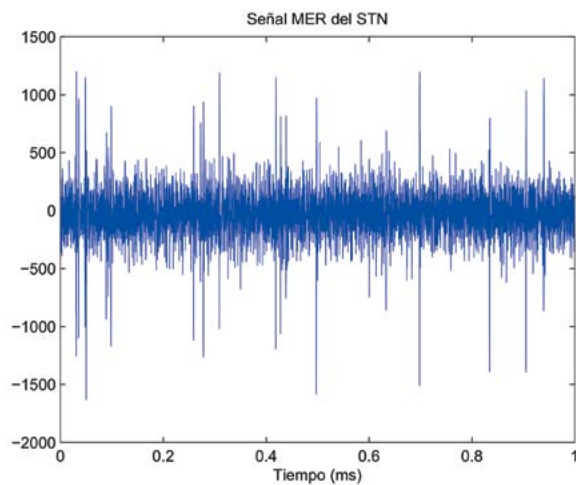


Figura 2. Señal MER proveniente del núcleo subtalámico. Los potenciales prominentes se denominan *spikes* y corresponden a disparos de potencial eléctrico de un grupo determinado de neuronas.

Fuente: elaboración propia.

Método de Frames (MOF)

Dada una señal s y un diccionario de funciones base Φ , el MOF encuentra una solución donde los coeficientes de representación minimizan la norma euclidiana de orden 2 (ecuación (1)).

$$\begin{aligned} \min \|\alpha\|_2 \\ \text{s. a } \Phi\alpha = s \end{aligned} \quad (1)$$

Este es un problema de programación cuadrática (QP), cuya solución es única y se denota como α^* . El MOF genera pocos coeficientes cercanos a cero, debido a que el producto interno del diccionario con la señal es diferente de cero para la mayor parte de los coeficientes de representación. Este método obtiene los coeficientes α_i más cercanos al origen del subespacio E^p formado por todas las posibles soluciones de la ecuación (1). Los coeficientes óptimos α^* pueden ser calculados utilizando un sistema de ecuaciones lineales, tal como se muestra en la ecuación (2).

$$\alpha^* = \Phi^* s \quad (2)$$

Donde la matriz Φ^* es la inversa generalizada de Φ dada por la ecuación (3).

$$\Phi^* = \Phi^T (\Phi\Phi^T)^{-1} \quad (3)$$

Se remite al lector a Daubechies (1998) para encontrar información más detallada del MOF.

Transformada wavelet discreta y análisis multi-resolución

Como marco de comparación, en este trabajo se realiza el procesamiento de las señales MER similar al MOF mediante la DWT y el análisis multi-resolución. La transformada wavelet discreta (DWT) utiliza bancos de filtros y submuestreo para realizar la descomposición de una señal. Dicha representación se puede observar en la figura 3.

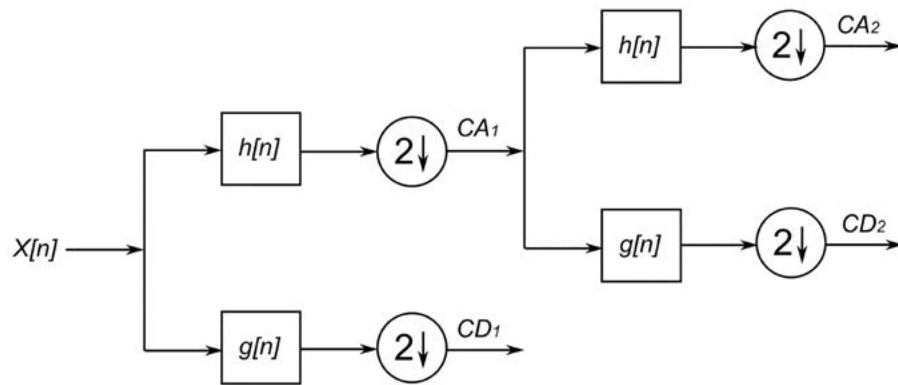


Figura 3. DWT con dos niveles de descomposición utilizando banco de filtros, donde $g[n]$ corresponde al filtro pasa alto, $h[n]$ filtro pasa bajo, CA_n son los coeficientes de aproximación y CD_n coeficientes de detalle.

Fuente: elaboración propia.

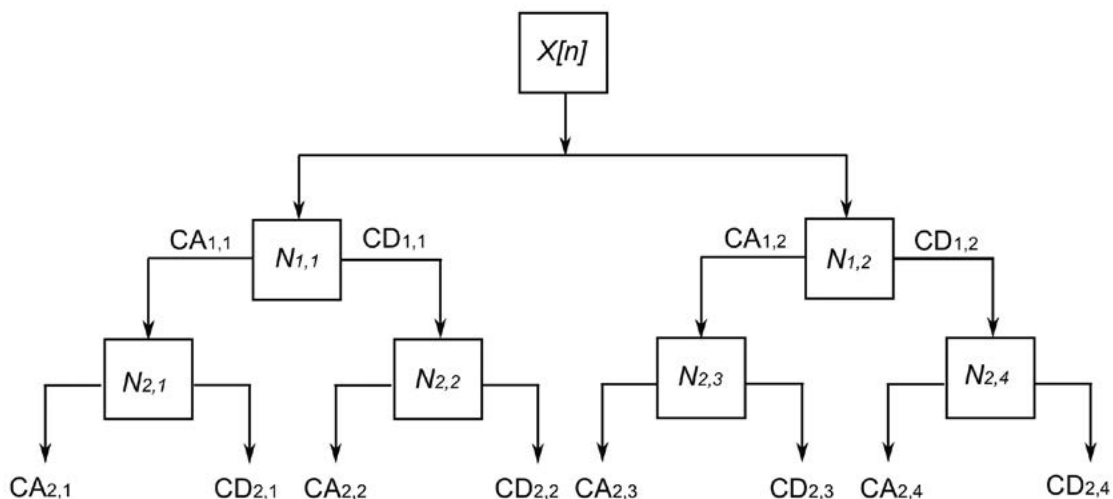


Figura 4. Análisis multi-resolución con la wavelet packet empleando dos niveles de descomposición. En total se obtienen ocho conjuntos de coeficientes de representación.

Fuente: elaboración propia.

El análisis multi-resolución se basa en aproximar una función $f(t)$ en distintos niveles de resolución obtenidos con la wavelet $\{f_1(t), f_2(t), f_3(t), \dots\}$, lo cual entrega una descomposición multiescala con redundancia, como se muestra en la figura 4. Para un entendimiento profundo de la transformada wavelet y el análisis multi-resolución, el lector se puede remitir a Jensen y La Cour-Harbo (2001), Mallat (1999) y Polikar, Greer, Udpa y Keinert (1997).

Procedimiento metodológico

Los pasos metodológicos seguidos en este trabajo se detallan en los siguientes puntos. La figura 5 muestra un diagrama de flujo de la metodología empleada.

1. Se toman las señales MER con segmentos de 1 segundo de duración, debido a que trabajos

anteriores (Giraldo, Castellanos, & Orozco, 2008; Pinzon, Orozco, Carmona, & Castellanos, 2010; Castellanos, Pinzon, Orozco, & Carmona, 2010) han demostrado que este segmento es suficiente para capturar el comportamiento dinámico de los registros, así como sus propiedades intrínsecas (*spikes* y ruido neuronal de fondo), además permite su implementación en sistemas en línea (Padilla, et al., 2012).

2. Se transforman los registros MER de 1 segundo de duración a un espacio vectorial tiempo-escala con el método de Frames, combinando los diccionarios wavelet packet y coseno. Se realizan dos niveles de descomposición, por lo que se obtienen dos conjuntos de coeficientes de representación óptimos $\alpha_{ic}, i = 1, \dots, n, c = 1, 2$ para cada registro, donde es el número de coeficientes de representación. El procedimiento es similar para la DWT: se aplica la transformada wavelet discreta y el análisis multi-resolución a los registros usando dos niveles de descomposición y se obtienen los coeficientes wavelet para cada señal

MER. Se prueban diferentes wavelet madre: Coiflets (coif1, coif5), Daubechies (db1, db3), Symlet (sym2, sym8), Meyer discreta (dmey).

3. Una vez se han obtenido los coeficientes, ya sea usando MOF, DWT o DWT con análisis multi-resolución, se realizan dos tipos de caracterización, una sin inventariado de los coeficientes y la otra con inventariado de los coeficientes.

- *Sin ventana*: Se calcula directamente el valor máximo absoluto, la energía, el valor medio absoluto y la desviación estándar sobre los coeficientes de representación obtenidos en el paso metodológico número 2.

- *Con ventana*: Se aplican ventanas rectangulares de 80 milisegundos de duración con traslape del 50% a los coeficientes de representación. Luego a los coeficientes inventariados se aplican las mismas métricas estadísticas del caso sin ventana. Con este procedimiento se obtiene una matriz de características para cada señal MER. Finalmente se promedia la matriz sobre las columnas

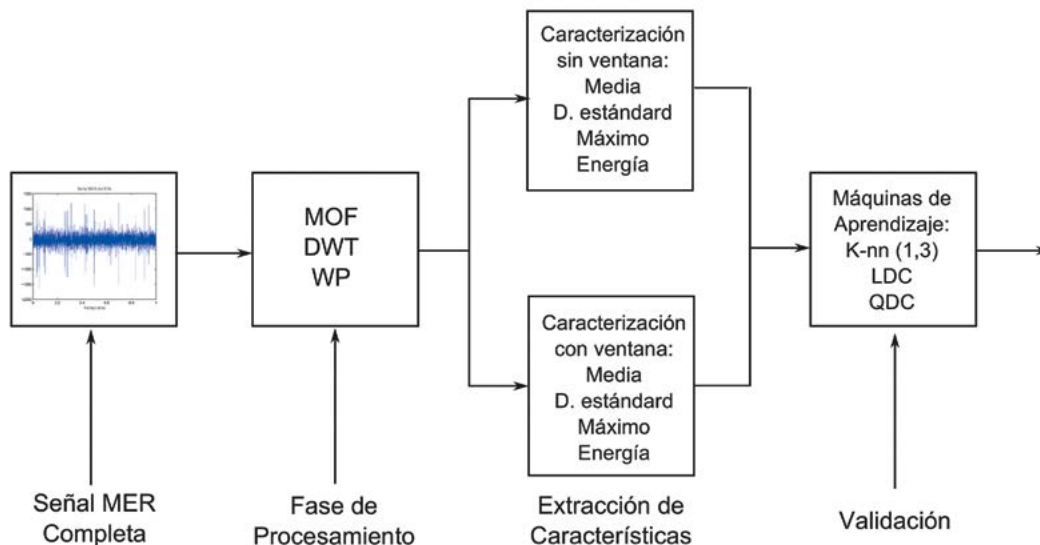


Figura 5. Esquema metodológico: La señal MER completa se procesa con el método de Frames (MOF), transformada wavelet discreta (DWT) o Wavelet Packet (WP) para obtener los coeficientes de representación, se extraen ocho características por cada registro y se valida con máquinas de aprendizaje supervisadas.

Fuente: elaboración propia.

y se obtiene un vector de características, donde se captura de mejor manera el comportamiento dinámico de los registros.

4. Debido a que se realizan dos niveles de descomposición en todos los métodos de procesamiento, se obtienen ocho características por cada registro MER.
5. *Máquinas de aprendizaje*: Se evalúan clasificadores paramétricos y no-paramétricos. Dentro de la familia paramétrica, se emplea el clasificador de Bayes con matriz de covarianza compartida entre las clases, también conocido como el clasificador con discriminante lineal (LDC) y el clasificador de Bayes con matriz de covarianza diferente por clase, conocido como el clasificador con discriminante cuadrático (QDC). Dentro de la familia no-paramétrica, se emplea el algoritmo K-Nearest Neighbors (K-NN) con $K=1$ y $K=3$ (K-NN1 y K-NN3, respectivamente). La teoría de estos clasificadores se puede encontrar completamente en Bishop (2006). Todos los algoritmos son implementados en Matlab usando el *toolbox* PRTOOLS disponible en <http://prtools.org/>.
6. *Validación*: La validación de cada máquina KNN 1-3, LDC y QDC se realiza con el esquema Hold-Out repitiendo cincuenta veces cada experimento. Se toman permutaciones aleatorias de los datos. El conjunto completo de datos tiene dos clases y se divide en 50% para el entrenamiento

y 50% para la validación. La clase 1 es el núcleo subtalámico (STN) y la clase 2 corresponde a otras zonas (Tálamo, Tal; Zona Incerta, ZI, y Substancia Nigra Reticulata, SNr).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan y se discuten los resultados obtenidos en los experimentos, mostrando todas las combinaciones posibles de los métodos de procesamiento con los algoritmos de aprendizaje de máquina. Las wavelets madre corresponden a Coiflets (coif1, coif5), Daubechies (db1, db3), Symlet (sym2, sym8), Meyer discreta (dmey). K-NN1 y K-NN3 corresponden al clasificador K-Nearest Neighbors con 1 y 3 vecinos, respectivamente, LDC y QDC corresponden al clasificador bayesiano lineal y cuadrático, respectivamente.

Resultados de clasificación para el procesamiento con la transformada wavelet discreta y el análisis multi-resolución

En la tabla 1 y la tabla 2 se puede observar fácilmente que el análisis multi-resolución tiene un mejor rendimiento que la transformada wavelet discreta (DWT) básica. La tabla 3 y la tabla 4 reportan el porcentaje de acierto con enventanado de los coeficientes; en este caso la precisión

Tabla 1. Resultados de identificación de señales MER caracterizadas con transformada wavelet discreta sin enventanado de los coeficientes

| Wavelet madre | K-NN 1 | K-NN 3 | LDC | QDC |
|---------------|-----------------|----------|----------|----------|
| coif1 | 86,3±1,7 | 85,4±2,2 | 72,2±2,2 | 81,0±3,1 |
| coif5 | 86,4±2,0 | 85,3±2,0 | 72,3±2,3 | 81,8±3,1 |
| db1 | 87,3±1,4 | 85,5±1,8 | 72,1±2,4 | 81,6±2,9 |
| db3 | 85,6±1,5 | 85,4±1,8 | 72,2±2,4 | 80,2±3,6 |
| sym2 | 85,6±1,8 | 85,0±2,0 | 71,7±2,2 | 81,8±2,8 |
| sym8 | 85,6±1,7 | 85,1±1,9 | 72,0±2,3 | 80,7±2,8 |
| dmey | 86,5±2,0 | 85,2±1,7 | 72,7±2,4 | 81,0±3,6 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Resultados de identificación de señales MER caracterizadas con análisis multi-resolución sin inventanado de los coeficientes

| Wavelet madre | K-NN 1 | K-NN 3 | LDC | QDC |
|---------------|-----------------|----------|----------|----------|
| coif1 | 93,6±1,3 | 92,6±1,5 | 81,1±1,7 | 86,4±2,4 |
| coif5 | 93,2±1,3 | 93,2±1,3 | 79,1±1,7 | 86,2±2,7 |
| db1 | 93,0±1,3 | 93,0±1,6 | 82,9±2,4 | 85,0±2,8 |
| db3 | 93,5±1,1 | 93,5±1,3 | 80,1±1,6 | 88,6±2,2 |
| sym2 | 93,0±1,4 | 92,9±1,4 | 81,2±1,8 | 86,1±2,0 |
| sym8 | 93,1±1,3 | 92,1±1,8 | 78,9±1,7 | 85,9±2,8 |
| dmey | 93,0±1,3 | 91,7±1,7 | 78,8±1,7 | 86,4±2,4 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Resultados de identificación de señales MER caracterizadas con transformada wavelet discreta y coeficientes inventanados

| Wavelet madre | K-NN 1 | K-NN 3 | LDC | QDC |
|---------------|-----------------|----------|----------|----------|
| coif1 | 87,9±2,0 | 87,1±2,2 | 76,3±2,3 | 80,0±2,5 |
| coif5 | 87,8±2,0 | 87,2±1,8 | 76,9±2,0 | 80,4±2,8 |
| db1 | 87,9±2,1 | 86,7±2,3 | 75,5±2,0 | 78,4±2,1 |
| db3 | 87,9±1,6 | 87,7±2,0 | 76,7±1,8 | 80,3±2,4 |
| sym2 | 87,7±1,8 | 87,4±2,4 | 76,4±1,5 | 80,0±1,7 |
| sym8 | 87,7±1,9 | 87,3±2,1 | 76,5±2,4 | 79,1±2,6 |
| dmey | 88,0±2,3 | 87,1±2,2 | 76,8±2,1 | 79,7±2,2 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Resultados de identificación de señales MER caracterizadas con análisis multi-resolución y coeficientes inventanados

| Wavelet madre | K-NN 1 | K-NN 3 | LDC | QDC |
|---------------|-----------------|----------|----------|----------|
| coif1 | 93,8±1,2 | 92,8±1,3 | 81,8±1,5 | 87,7±2,0 |
| coif5 | 93,0±1,2 | 91,9±1,5 | 79,9±1,4 | 88,7±2,1 |
| db1 | 94,4±1,1 | 94,0±1,3 | 79,9±1,4 | 88,8±2,0 |
| db3 | 93,6±1,1 | 93,0±1,3 | 80,5±1,4 | 89,7±1,9 |
| sym2 | 93,8±1,1 | 93,1±1,4 | 82,1±2,1 | 87,1±1,9 |
| sym8 | 93,1±1,1 | 92,5±1,5 | 79,4±1,3 | 88,4±2,2 |
| dmey | 93,0±1,2 | 92,5±1,4 | 80,4±1,5 | 88,±2,2 |

Fuente: elaboración propia.

en la identificación del STN mejora con respecto al caso donde no se realiza enventanado. Esto se explica porque las ventanas permiten capturar información de la dinámica temporal de los coeficientes de representación. Es aconsejable enventanar los coeficientes para realizar una caracterización localizada en el tiempo, debido a que la evolución temporal de las propiedades intrínsecas de las señales MER se conserva de mejor manera en un análisis con enventanado. En todos los casos el mejor clasificador es el K-NN 1 y la función madre que mejor se correlaciona con este tipo de señales es la Daubechies (db1 y db3). Igualmente, se puede establecer que el análisis multi-resolución con transformada wavelet permite una representación aproximada y detallada de las señales en diferentes espacios de representación contenidos unos en otros, ya que genera redundancia en los coeficientes en comparación con la DWT simple. El punto débil de este método es que no presenta adaptabilidad a la no estacionariedad de las señales MER y por este motivo existen vacíos para diferenciar satisfactoriamente los registros que provienen del STN con los de las otras estructuras. Si bien los índices de acierto en la identificación de las señales MER alcanzan el 93,5% (sin enventanado) y 94,4% (con enventanado), estos resultados son inferiores a los que se han reportado en la literatura en este campo del

conocimiento, donde se han utilizado máquinas de aprendizaje más potentes.

Resultados de clasificación para el procesamiento con el método de Frames (MOF)

Del experimento anterior con DWT y análisis multi-resolución se establece que el enventanado de los coeficientes de representación permite una caracterización más discriminante de las distintas clases de señales MER, sobre todo para identificar el STN, que es la estructura objetivo en la cirugía de la enfermedad de Parkinson. En el análisis de las señales MER con el MOF se realiza el mismo enventanado de 80 ms con traslape del 50%, pero en este caso se obtuvieron coeficientes optimizados sobre la norma euclidiana de segundo orden.

Los resultados logrados con el método de Frames mejoran a la DWT y al análisis multi-resolución. En la tabla 5 se observan los resultados de identificación del STN para diferentes combinaciones de diccionarios, donde el clasificador KNN-1 logra los mejores valores de precisión en la clasificación, llegando al 97,6%, además de que la dispersión es pequeña ($\pm 0,9$), lo cual indica que el método es robusto ante modificaciones en el conjunto de entrenamiento y validación. Otro aspecto importante es que la caracterización con MOF

Tabla 5. Resultados de identificación de señales MER caracterizadas con MOF combinando diccionarios Wavelet Packet (WP) y Coseno. Los coeficientes son enventanados

| Diccionario | K-NN 1 | K-NN 3 | LDC | QDC |
|--------------|--------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| coif1+coseno | 96,7 \pm 0,9 | 96,0 \pm 1,1 | 87,5 \pm 2,4 | 92,5 \pm 1,8 |
| coif5+coseno | 97,6\pm0,9 | 96,5 \pm 1,0 | 88,0 \pm 2,5 | 90,2 \pm 1,7 |
| db1+coseno | 95,0 \pm 0,9 | 94,4 \pm 1,3 | 87,2 \pm 3,1 | 88,1 \pm 2,5 |
| db3+coseno | 97,0 \pm 0,9 | 95,8 \pm 1,3 | 87,4 \pm 2,2 | 90,7 \pm 1,7 |
| sym2+coseno | 97,5 \pm 1,0 | 95,9 \pm 1,0 | 87,8 \pm 2,2 | 92,5 \pm 2,0 |
| sym8+coseno | 96,7 \pm 1,0 | 96,2 \pm 1,1 | 87,8 \pm 2,5 | 90,6 \pm 2,2 |
| dmey+coseno | 97,6 \pm 1,0 | 96,6 \pm 0,9 | 88,0 \pm 2,5 | 89,4 \pm 2,2 |

Fuente: elaboración propia.

también genera un mejor rendimiento de las demás máquinas de aprendizaje, esto es muy importante porque demuestra que el método propuesto no depende de un clasificador robusto, o que el mejoramiento en la caracterización no se presenta en casos aislados. En cuanto a combinar diccionarios o solo emplear diccionarios WP, no se obtuvieron diferencias significativas en la identificación del STN. Esto se explica porque el MOF optimiza los coeficientes de representación y no el conjunto de funciones base (diccionario), entonces combinar dos o más diccionarios no modifica en gran medida la transformación que se hace a la señal MER.

Discusión general de los resultados

Es evidente que el método de Frames aplicado a las señales MER logra una extracción de características más discriminantes para identificar el núcleo subtalámico (STN). Al comparar los resultados consignados en todas las tablas se observa que MOF es el que exhibe el mejor rendimiento de todos, ya sea con el diccionario wavelet packet (WP) o combinando los diccionarios WP y coseno. En este trabajo se comparó MOF con métodos tradicionales como la DWT y el análisis multi-resolución, y en todas las máquinas de aprendizaje MOF mejora a la DWT sin importar la función madre utilizada. Una diferencia clave entre MOF y la DWT (con o sin análisis multi-resolución) es que MOF hace una representación de las señales con coeficientes optimizados, mientras que la única restricción que se tiene con la DWT es que la señal se pueda reconstruir perfectamente. La optimización de los coeficientes hace que la energía de la señal se concentre en un ancho de banda más pequeño, de modo que se hace más fácil extraer la información relevante para diferenciar las distintas clases de señales MER, sobre todo las que provienen del STN.

El mejor resultado de precisión en la identificación del STN fue del 97,6% con el clasificador KNN-1. Este resultado es muy satisfactorio porque esta máquina de aprendizaje es muy básica y de

fácil implementación. Por esta razón, se puede asegurar que la fortaleza de la metodología propuesta radica en la representación óptima de las señales MER con MOF y no depende de clasificadores potentes.

En cuanto a la elección del diccionario dentro del MOF, se observa que las diferencias de los resultados no son estadísticamente significativas cuando se realiza una prueba de selección del modelo de Kruskal-Wallis (Pizarro, Guerrero, & Galindo, 2002). Esto es positivo porque la metodología no queda sujeta a la elección del diccionario. La tabla 5 muestra que la mejor combinación posible es el procesamiento con MOF usando dos diccionarios mezclados (coif5+coseno), sin embargo cuando se mezclan los diccionarios sym2+coseno y dmey+coseno los resultados son casi idénticos. Cuando no se utiliza el MOF, en casi todos los experimentos el procesamiento con la función madre db3 es la que entrega mejores resultados de clasificación. Una explicación de esto se fundamenta en que la db3 se correlaciona mejor con los registros MER, dada su forma de onda, pues esta tiene un comportamiento similar a un *spike*, de tal forma que permite concentrar grandes cantidades de energía en los coeficientes de representación.

Otro aspecto importante es que esta metodología se puede implementar sin mayores dificultades a sistemas software de reconocimiento automático de señales MER, como por ejemplo el trabajo desarrollado por Padilla *et al.* (2012). Este sistema actualmente se está validando en la clínica Neurocentro (Pereira, Colombia) como soporte médico durante la DBS aplicada en pacientes colombianos con enfermedad de Parkinson.

CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolló una metodología para caracterizar señales MER basada en el método de Frames con el fin de identificar registros provenientes del núcleo subtalámico. Los resultados demuestran que el método de Frames permite realizar una mejor generalización de cada una

de las características intrínsecas en las series de tiempo. Además, en combinación con un clasificador común como es el KNN-1, es posible obtener una clasificación muy precisa del STN, incluso superior al 97,6%. Dado que los resultados preliminares son muy satisfactorios, se pretende implementar esta metodología en un sistema software aplicado al soporte clínico durante la DBS.

FINANCIAMIENTO

Este trabajo forma parte del proyecto de investigación titulado: *Desarrollo de un sistema efectivo y apropiado de estimación de volumen de tejido activo para el mejoramiento de los resultados terapéuticos en pacientes con enfermedad de Parkinson intervenidos quirúrgicamente*, financiado por Colciencias mediante la Convocatoria 569 del año 2012 con código 111056934461. El autor H.D.Vargas está financiado por el programa de Colciencias para la formación de alto nivel para la ciencia, la tecnología y la innovación-Convocatoria 617 de 2013.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto de Epilepsia y Parkinson del Eje Cafetero-Neurocentro S. A. por la asesoría clínica y el etiquetado de la base de datos de señales MER.

REFERENCIAS

- Bishop, C. (2006). *Pattern Recognition and Machine Learning*. New York: Springer.
- Braunwald, E., Fauci, A., Kasper, D., Hauser, S., Longo, D., & Jameson, L. (2001). *Principios de medicina interna*. México D.F: McGraw-Hill interamericana.
- Breit, S., Schulz, J. B., & Benabid, A. L. (2004). Deep Brain Stimulation. *Cell Tissue Res*, 318, 275-288.
- Bustamante, J. (2007). *Neuroanatomía funcional* (4 ed.). Bogotá: Celsus.
- Castellanos, G., Pinzon, R., Orozco, A., & Carmona, H. (2010). Feature selection using an ensemble of optimal wavelet packet and learning machine: Application to MER signals. *CSNDSP*, (pp. 25-30). Newcastle (UK).
- Chan, H., Wu, T., Lee, S., Lin, M. A., He, S. M., Chao, P. K., & Tsai, S. T. (2010). Unsupervised wavelet spike sorting with dynamic codebook searching and replenishment. *Neurocomputing*, 73(7), 1513-1527.
- Chen, S. S., Donoho, D. L., & Saunders, M. A. (2001). Atomic Decomposition by Basis Pursuit. *SIAM*, 43(1), 129-159.
- Daubechies, I. (1998). Time-frequency localization operators. A geometric phase space approach. *IEEE Trans. Inform Theory*, 34, 605-612.
- Gemmar, P., Gronz, O., Henrichsand, T., & Hertel, F. (2008). Advanced methods for target navigation using microelectrode recordings in stereotactic neurosurgery for deep brain stimulation. *CBMS*, (pp. 99-104). Jyväskylä (Finland).
- Giraldo, E., Castellanos, G., & Orozco, A. (2008). Feature extraction for MER signals using adaptive filter banks. *Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference*, (pp. 582-585). Cuernavaca (México).
- Guillén, P., Martínez, P., Sánchez, R., Argáez, M., & Velásquez, L. (2011). Characterization of subcortical structures during deep brain stimulation utilizing support vector machines. *EMBC*, (pp. 7949-7952). Boston (USA).
- Guridi, J., Rodríguez, M., & Manrique, M. (2004). Tratamiento quirúrgico de la enfermedad de Parkinson. *Neurocirugía*, 15, 5-16.
- Hernández, G. A., & Pedroza, A. (2002). *Compendio de neurocirugía*. Bogotá : Fundación pro-neurocirugía.
- Huggins, P. S., & Zucker, S. W. (2007). Greedy Basis Pursuit. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 55(7), 3760-3772.

- Jensen, A., & La Cour-Harbo, A. (2001). *Ripples in Mathematics-The Discrete Wavelet*. Berlín: Springer.
- Mallat, S. A. (1999). *Wavelet tour of signal processing*. Waltham: Academic Press-Elsevier.
- Moore, S. K., Mahurin, M., & Christie, B. (2006). Psychiatry's shocking new tools. *IEEE spectrum*, 43, 19-25.
- Novak, P., Daniluk, S., Elias, S., & Nazzaro, J. (2007). Detection of the subthalamic nucleus in microelectrographic recordings in Parkinson's disease using the high frequency (500 hz) neuronal background. *Neurosurgery*, 106, 175-179.
- Nowinski, W. L., Belov, D., Pollak, P., & Benabid, A. L. (2005). Statistical analysis of 168 bilateral subthalamic nucleus implantations by means of the probabilistic functional atlas. *Neurosurgery*, 57, 319-330.
- Orozco, A. A., Guarnizo, C., Alvarez, M. A., Castellanos, G., & Guijarro, E. (2005). Spike source identification using artificial intelligence techniques. *3rd IEE International Seminar on Medical Applications of Signal Processing*, (pp. 105-109). London.
- Orozco, A. A., Álvarez, M., & Guijarro, E. (2006). Identification of spike sources using proximity analysis through hidden Markov models. *EMBC*, (pp. 5555-5558). New York (USA).
- Ortoft-Endelt, L., & La Cour-Harbo, A. (2005). Comparison of Methods for Sparse Representation of Musical Signals. *ICASSP*, (pp. 13-16). Philadelphia (USA).
- Padilla, J. B., Vargas Cardona, H. D., Arango, A., Carmona, H., Álvarez, M., Guijarro, E., & Orozco, A. (2012). NEUROZONE: On-line recognition of brain structures in stereotactic surgery—Application to Parkinson's disease surgery. *EMBC* (pp. 2219-2222). Chicago (USA): IEEE.
- Pinzon, R., Garcés, M., Orozco, A., & Nazzaro, J. (2009). Automatic identification of various nuclei in the basal ganglia for Parkinson's disease neurosurgery. *EMBC*, (pp. 99-104). Minneapolis (USA).
- Pinzon, R., Orozco, R., Carmona, H., & Castellanos, G. (2010). Towards high accuracy classification of MER signals for target localization in Parkinson's disease. *EMBC*, (pp. 4040-4043). Buenos Aires (Argentina).
- Pizarro, J., Guerrero, J., & Galindo, L. (2002). Multiple comparison procedures applied to model selection. *Neurocomputing*, 48, 755-773.
- Polikar, R., Greer, M. H., Udupa, L., & Keinert, F. (1997). Multiresolution Wavelet Analysis of ERPs for the detection of Alzheimer's disease. *EMBC*, (pp. 1301-1304). Chicago.
- Pouzat, C., Delescluse, M., Viot, P., & Diebolt, J. (2004). Improved spike-sorting by modeling firing statistics and burst-dependent spike amplitude attenuation: a markov chain Montecarlo approach. *J Neurophysiol*, 91, 2910-2928.
- Ropper, A. H. (2002). *Principios de Neurología de Adams y Victor* (7 ed.). New York: McGraw-Hill Interamericana.
- Snider, R., & Bonds, A. (1998). Classification of non-stationary neural signals. *Journal of Neuroscience Methods*, 84, 155-166.
- Tahgva, A. (2011). Hidden semi-Markov models in the computerized decoding of microelectrode recording data for deep brain stimulator placement. *World neurosurgery*, 75, 758-764.
- Vargas, H. D., Orozco, A. A., & Álvarez, A. A. (2012). Multi-patient learning increases accuracy for Subthalamic nucleus identification in deep brain stimulation. *EMBC*, (pp. 4341-4344). San Diego (USA).





Modelo AHP-VIKOR para handoff espectral en redes de radio cognitiva

AHP-VIKOR Model for Spectrum Handoff in Cognitive Radio Networks

César Hernández*, Ingrid Páez**, Diego Giral***

Fecha de recepción: 30 de noviembre de 2014

Fecha de aceptación: 06 de abril de 2015

Como citar: Hernández, C., Páez, I., & Giral, D. (2015). Modelo AHP-VIKOR para handoff espectral en redes de radio cognitiva. *Revista Tecnura*, 19(45), 29-39. doi:10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.3.a02

RESUMEN

En este artículo se presenta la propuesta de un algoritmo híbrido para la asignación de espectro en redes de radio cognitiva basado en los algoritmos *Analytical Hierarchical Process (AHP)* y *Multi-Criteria Optimization and Compromise Solution (VIKOR)*, con el objetivo de mejorar el desempeño de la movilidad espectral de los usuarios secundarios en redes de radio cognitiva.

Para evaluar el nivel de desempeño del algoritmo propuesto se realiza un análisis comparativo entre este, el Grey Relational Analysis (GRA) y una asignación de espectro aleatoria (Random). Los dos primeros trabajan con los mismos criterios de decisión: probabilidad de disponibilidad del canal, tiempo estimado de disponibilidad del canal, relación señal a ruido más interferencia y ancho de banda. A diferencia de los trabajos relacionados, la evaluación comparativa se validó a través de una traza de datos reales de ocupación espectral capturados en la banda de frecuencia GSM, que modela el comportamiento real de los

usuarios licenciados. En la evaluación de desempeño se utilizaron cinco métricas de evaluación: número promedio acumulado de handoff fallidos, número promedio acumulado de handoff realizados, ancho de banda promedio, retardo promedio acumulado y throughput promedio acumulado.

Los resultados del análisis comparativo con los otros dos algoritmos muestran que el algoritmo de handoff AHP-VIKOR propuesto provee el mejor desempeño en la movilidad espectral.

Palabras clave: handoff espectral, modelo híbrido, radio cognitiva, redes móviles.

ABSTRACT

This paper proposed a hybrid algorithm for spectrum allocation in cognitive radio networks based on two algorithms, *analytical hierarchical process (AHP)* and *multi-criteria optimization and compromise solution (VIKOR)*, for improving the performance of mobility spectrum of secondary users in cognitive radio networks.

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

** Ingeniera eléctrica, ingeniera industrial y doctora en Ingeniería de Telecomunicaciones de la Universidad de Cantabria. Docente investigadora de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Contacto: ippaezp@unal.edu.co

*** Ingeniero eléctrico, estudiante de la Maestría en Ingeniería Eléctrica, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Contacto: da.giral10@uniandes.edu.co

To evaluate the level of performance of the proposed algorithm, a comparative analysis between the proposed AHP-VIKOR, Grey Relational Analysis (GRA) and a random allocation of spectrum (Random) algorithm, is performed. The first two algorithms work with the same decision criteria: probability of channel availability, estimated time availability, signal-to-interference-plus-noise ratio and bandwidth. Unlike related work, benchmarking was validated through a trace of real spectral occupation data, captured in the GSM frequency band, which models the

actual behavior of licensed users. For performance evaluation five metrics were used, handoff failed average cumulative number, handoff average cumulative number, average bandwidth, delay and average cumulative throughput.

The results of the comparative analysis with the other two algorithms show that the AHP-VIKOR algorithm proposed provides the best performance in spectral mobility.

Keywords: spectral handoff, hybrid model, cognitive radio, mobile networks.

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de aplicaciones inalámbricas junto a las políticas de asignación fija del espectro radioeléctrico ha hecho que actualmente se reduzca la disponibilidad de bandas de frecuencia especialmente en aquellas con mayor demanda como las asignadas a las comunicaciones móviles. Sin embargo, investigaciones recientes han demostrado que a pesar de la escasez de bandas de frecuencia existe un uso poco eficiente del espectro radioeléctrico, con tiempos de utilización inferiores al 10%, produciendo ciclos útiles prácticamente nulos (Forero, 2012). Dichos estudios concluyen que una de las mejores soluciones al problema del uso ineficiente del espectro radioeléctrico es la asignación dinámica del mismo.

La radio cognitiva es la tecnología capaz de realizar una asignación dinámica del espectro radioeléctrico. La radio cognitiva de acuerdo con la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) es “una radio o sistema que detecta y está al tanto de su entorno y se puede ajustar de forma dinámica y autónoma de acuerdo con sus parámetros de funcionamiento de radio”. En la radio cognitiva a diferencia de la red tradicional existen dos tipos de usuarios, el usuario licenciado o primario (PU) que paga por utilizar una banda de frecuencia licenciada, y el usuario no licenciado o secundario (SU) que hace un uso oportunista del espectro

licenciado del PU mientras esté disponible y liberar el recurso espectral cuando el PU lo requiera y buscar uno nuevo (I. F. Akyildiz, Lee Vuran & Mohanty, 2008; I. F. Akyildiz, Lee Vuran, & Mohanty, 2006).

El proceso mediante el cual el SU se cambia de un canal de frecuencia a otro se conoce como handoff espectral. Durante el handoff espectral el SU debe pausar su comunicación mientras realiza la detección del espectro, identifica las oportunidades espectrales (frecuencias disponibles), selecciona el canal objetivo y realiza el cambio de canal de frecuencia, para posteriormente continuar su comunicación (Ian F Akyildiz, Lee, & Chowdhury, 2009).

Según la literatura actual (I. F. Akyildiz et al., 2008; Ian F. Akyildiz et al., 2006; Ian F Akyildiz et al., 2009; Christian, Moh, Chung, & Lee, 2012; Marinho & Monteiro, 2011; L.-C. Wang, Wang, & Chang, 2012; Rodriguez-Colina, Ramirez P, & Carrillo A, 2011; C.-W. Wang & Wang, 2009), los esquemas de handoff espectral son determinantes para el desempeño de las comunicaciones del SU, a través de la reducción del número promedio de cambios de canal y el correspondiente nivel de latencia, garantizando una transmisión de datos continua en las comunicaciones del SU, por tanto, los modelos de handoff espectral son un tema importante en la radio cognitiva (Christian et al., 2012).

En la literatura actual se proponen varios esquemas de handoff espectral para redes inalámbricas

cognitivas, sin embargo, el desempeño de cada uno es satisfactorio dentro del contexto para el cual fue diseñado.

Los modelos basados en toma de decisiones de múltiples criterios (MCDM) han sido utilizados en la radio cognitiva en los trabajos de investigación (Tsai, 2007; Yang & Jung-ShyrWu, 2008; Zapata Cortés, Arango Serna, & Adarme Jaimes, 2012; Yang Shin-Jer, 2013) para seleccionar el canal de frecuencia objetivo durante el handoff espectral. Aunque los problemas basados en MCDM son diversos, comparten características similares como: múltiples criterios de decisión y alternativas para seleccionar, así como un vector de pesos ponderados que representan la importancia relativa de cada criterio de decisión (E. Stevens-Navarro, Martínez-Morales, & Pineda-Rico, 2013). Las características de los modelos MCDM, los convierten en una buena alternativa para modelar el proceso de handoff espectral. Algunos de los modelos de handoff espectral propuestos en el estado del arte son: Simple Additive Weighting (SAW) (Zhang, 2004), Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) (Zhang, 2004), Multiplicative Exponent Weighting (MEW) (E. Stevens-Navarro & Wong, 2006), Grey Relational Analysis (GRA) (Song & Jamalipour, 2005), Elimination and Choice Translating Priority (ELECTRE) (Bari & Leung, 2007), Weighted Markov Chain (WMC) (Ying, Jun, Yun, Gen, & Ping, 2008) y Multicriteria Optimization and Compromise Solution (VIKOR) (Enrique Stevens-Navarro, Gallardo-Medina, Pineda-Rico, & Acosta-Elias, 2012) y Analytical Hierarchical Process (AHP). El algoritmo AHP ha demostrado ser una alternativa eficaz para evaluar y seleccionar las mejores oportunidades espectrales (E. Stevens-Navarro, Lin, & Wong, 2008; Mohamed, Leghris, & Adib, 2011; Song & Jamalipour, 2005; Kibria, Jamalipour, & Mirchandani, 2005).

Este trabajo propone un modelo de handoff espectral basado en un algoritmo híbrido que combina las ventajas de la técnica *Analytical Hierarchical Process* (AHP) y *Multi-Criteria Optimization and Compromise Solution* (VIKOR). Este

algoritmo permite mejorar la toma de decisiones a la hora de seleccionar dinámicamente una oportunidad espectral con base en los siguientes criterios de decisión: probabilidad de disponibilidad (PD) del canal, tiempo estimado de disponibilidad (TED) del canal, SINR y ancho de banda (BW). A través de la técnica AHP se determina el peso de cada uno de los criterios de decisión y con VIKOR se realiza un *ranking* de cada una de las potenciales oportunidades espectrales.

Para evaluar el nivel de desempeño del modelo de handoff propuesto se realiza un análisis comparativo con otros dos modelos: Grey Relational Analysis (GRA) y una asignación de espectro aleatoria (Random). VIKOR-AHP y GRA trabajan con los mismos cuatro criterios de decisión. A diferencia de los trabajos relacionados, la evaluación comparativa se validó a través de una traza de datos reales de ocupación espectral capturados en la banda de frecuencia de la tecnología Global System for Mobile Communications (GSM), lo cual permitió incluir el comportamiento real de los PU dentro de las simulaciones realizadas.

El resto del artículo está estructurado como sigue. En la sección II se describen los tres modelos de handoff considerados. En la sección III se presentan los resultados alcanzados en el análisis comparativo de la evaluación de desempeño de los modelos de handoff espectral y, finalmente, en la sección IV se presentan las conclusiones.

METODOLOGÍA

En esta sección se presenta el diseño de los tres modelos de handoff espectral por comparar para la toma de decisiones en redes de radio cognitiva: algoritmo AHP-VIKOR, algoritmo GRA y el algoritmo aleatorio.

Algoritmo AHP-VIKOR

Como se mencionó anteriormente, este algoritmo híbrido combina las ventajas de AHP y VIKOR. Primero determina los pesos de los cuatro criterios

de decisión a través de AHP y después realiza un *ranking* de las oportunidades espectrales por medio de VIKOR.

El método AHP es un algoritmo de estimación para la toma de decisiones multicriterio, que permite incluir varios criterios tanto cuantitativos como cualitativos. Lo anterior hace que el algoritmo AHP pueda evaluar diversas variables al momento de seleccionar una única opción dentro de un amplio conjunto de alternativas posibles, basándose en comparaciones de la importancia entre criterios escogidos para la selección de una alternativa, siendo esta más una medida relativa que un valor absoluto (Saaty, 1990).

A continuación se describen los cinco pasos realizados en el desarrollo del algoritmo AHP.

1) *Definición del problema*: En la metodología de diseño del algoritmo AHP, el primer paso es definir el problema, descomponiéndolo a su vez en objetivo, criterios y alternativas. El objetivo es la decisión que se ha de tomar, que para el presente trabajo es muy clara y corresponde a la selección de la mejor oportunidad espectral disponible.

Los criterios son los factores que afectan la preferencia de una alternativa. Para este caso se seleccionaron cuatro criterios: PD, TED, SINR y AB.

Las alternativas son todas las opciones que existen y de las cuales hay que escoger solo una. En este caso, corresponden a los canales de frecuencia que se encuentran disponibles al momento de realizar la ejecución del modelo de handoff espectral.

2) *Construcción de la jerarquía*: Con los criterios seleccionados, junto al objetivo y las alternativas del algoritmo de decisión multicriterio AHP, se construye la jerarquía.

3) *Matrices de juicios*: Una vez construida la jerarquía se procedió a realizar las matrices de juicios, las cuales corresponden a evaluaciones comparativas que definen el nivel de importancia relativa entre cada combinación posible de parejas de criterios.

4) *Cálculo de los pesos normalizados*: Con las matrices de juicios definidas, se procedió a calcular los pesos normalizados para cada criterio con

base en el modelo propuesto por Eduardo Miranda (2001) debido a su sencillez y la calidad de sus resultados, fundamentado en la media geométrica.

El primer paso es calcular la media geométrica V_i de cada fila de la matriz de juicios definida para un determinado criterio, el cual está definido por la ecuación (1).

$$v_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}} \quad (1)$$

Donde,

V_i es la media geométrica de la fila i ,

n es el número de subcriterios,

j representa las columnas de la matriz de juicios, y

a_{ij} es el valor del elemento de la fila i y columna j .

El segundo paso es calcular el vector de valores propios r , el cual define los pesos normalizados de cada criterio y que está definido por la ecuación (2).

$$r = [r_1, r_2, \dots, r_n] \text{ con } r_i = \frac{v_i}{\sum_{j=1}^n v_j} \quad (2)$$

Donde,

r es el vector de valores propios,

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

V_i es la media geométrica de la fila i , y

V_j es la media geométrica de la columna j .

5) *Cálculo del índice de consistencia*: Con el objetivo de evaluar la validez del algoritmo AHP se calculó el índice de consistencia. De acuerdo con Saaty (1990), si el índice de consistencia es menor que 0.1, el desarrollo del algoritmo es satisfactorio. Para calcular el índice de consistencia se utilizó la ecuación (3) (Miranda, 2001).

$$CI = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\ln a_{ij} \sum \ln \frac{v_i}{v_j})^2}}{(n-1) \times (n-2)} \quad (3)$$

Donde,

CI es el índice de consistencia,

n el número de subcriterios,

i el valor de la fila de la matriz de juicios,

j el valor de la columna de la matriz de juicios, a_{ij} es el valor del elemento de la fila i y columna j , V_i es la media geométrica de la fila i , V_j es la media geométrica de la columna j .

El método VIKOR asume que cada alternativa es evaluada de acuerdo con cada función de criterio, y la clasificación puede ser desarrollada a través de la comparación de las medidas que estén más cercanas a la alternativa ideal (Tanino, Tanaka, & Inuiguchi, 2003). El algoritmo VIKOR sigue los siguientes pasos (E. Stevens-Navarro et al., 2013):

Para cada parámetro $j = 1, 2, 3, \dots, N$, se determina el mejor y peor valor dado por la ecuación (4) y (5).

$$F_j^+ = \left\{ \left(\max_{i \in M} x_{ij} \mid j \in N_b \right), \left(\min_{i \in M} x_{ij} \mid j \in N_c \right) \right\}, \quad (4)$$

$$F_j^- = \left\{ \left(\min_{i \in M} x_{ij} \mid j \in N_b \right), \left(\max_{i \in M} x_{ij} \mid j \in N_c \right) \right\}, \quad (5)$$

Donde N_b que pertenece a N es el conjunto de parámetros de beneficios y N_c que pertenece a N es el conjunto de parámetros de costos.

Se calcula los valores de S_i y R_i para $i = 1, 2, 3, \dots, M$, dado por la ecuación (6) y (7).

$$S_i = \sum_{j \in N} w_j \frac{(F_j^+ - x_{ij})}{(F_j^+ - F_j^-)}, \quad (6)$$

$$R_i = \max_{i \in N} \left[w_j \frac{(F_j^+ - x_{ij})}{(F_j^+ - F_j^-)} \right], \quad (7)$$

Donde W_j es la importancia del peso del parámetro j .

Se calcula los valores de Q_i para $i = 1, 2, 3, \dots, M$, dado por la ecuación (8).

$$Q_i = \gamma \left(\frac{S_i - S^+}{S^- - S^+} \right) + (1 - \gamma) \left(\frac{R_i - R^+}{R^- - R^+} \right), \quad (8)$$

$$\text{Donde: } S^+ = \min_{i \in M} S_i, \quad S^- = \max_{i \in M} S_i,$$

$$R^+ = \min_{i \in M} R_i, \quad R^- = \max_{i \in M} R_i \quad 0 \leq \gamma \leq 1$$

pertenece al peso de la estrategia.

Dados los valores para Q , para todos los i pertenecientes a M , se clasifican de mayor a menor las oportunidades espectrales candidatas. Finalmente,

la oportunidad espectral seleccionada está dada por la ecuación (9).

$$A_{VIK}^* = \arg \min_{i \in M} Q_i^* \quad (9)$$

Algoritmo GRA

El objetivo de este algoritmo es establecer las redes candidatas y seleccionar las que tengan más alta puntuación de acuerdo con unos parámetros definidos. Para lograr esto se establecen relaciones de Grey entre elementos de dos series: la primera contiene las mejores cualidades, mientras que la otra contiene entidades comparativas. Acá es parte importante el coeficiente de Grey, que se usa para describir las relaciones entre las series calculado a partir del nivel de similitud y variabilidad (Ramírez Pérez & Ramos Ramos, 2010). El método GRA tiene los siguientes pasos (Ramirez-Perez & Ramos, 2012) it is crucial to integrate heterogeneous networks so as to provide collective services. Vertical handoff consists in handing off the traffic flows of applications running on a mobile device through heterogeneous networks in order to keep or improve the QoS. In this work, we propose an algorithm for decision making in vertical handoff which considers three active applications running on a mobile device. The selectivity of our algorithm can be adjusted as a function of a set of QoS requirements e.g., the minimal bit rate, delay, jitter, and packet error rate (PER):

Primero se genera el vector de referencia X_o , de la matriz X , a través de la escogencia de los valores mínimos para los costos y los valores máximos para los criterios de beneficios.

Después, la secuencia de datos debe ser normalizada para X de acuerdo con tres situaciones: más grande el mejor, más pequeño el mejor o nominal el mejor.

Luego, se calcula el coeficiente relacional de Grey como lo describe la ecuación (10).

$$\gamma(x_0(i), x_j(i)) = \frac{\Delta_{min} + \zeta \Delta_{max}}{\Delta_{0,j}(i) + \zeta \Delta_{max}}, \quad (10)$$

Donde,

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

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

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

Donde el coeficiente ζ que pertenece $[0,1]$, compensa el efecto de Δ_{max} , que generalmente es 0,5.

Finalmente, se calcula el grado relacional de Grey para cada una de las diferentes series de datos. $\Gamma(x_0, x_i)$ representa el grado relacional de Grey para las j -ésimas alternativas, (ecuación (11)).

$$\Gamma(x_0, x_j) = \sum_{i=1}^M \omega_i \gamma(x_0(i), x_j(i)) \quad (11)$$

Donde el peso de la importancia para los i -ésimos criterios es W_i .

Algoritmo Aleatorio

En el caso del algoritmo aleatorio, se desarrolló una selección totalmente aleatoria dentro de un conjunto de alternativas compuesto por todas las oportunidades espectrales potenciales.

RESULTADOS

La evaluación del desempeño de los tres modelos de handoff espectral se fundamentó en los resultados obtenidos a través de cinco métricas de evaluación: el número acumulado de handoff fallidos, el número acumulado de handoff totales, el promedio de ancho de banda, el retardo promedio acumulado y el throughput promedio acumulado. Los resultados alcanzados en esta investigación del análisis comparativo para cada una de las métricas mencionadas se pueden observar en las figuras 1, 2, 3, 4 y 5. La tabla 1 resume el desempeño de cada uno de los tres modelos de handoff espectral.

La figura 1 describe el número acumulado de handoff fallidos que se presentaron en cada modelo de handoff espectral durante una transmisión de 10 minutos, realizada a partir de datos de ocupación espectral reales. De la figura 1 también se observa que el algoritmo AHP-VIKOR propuesto tiene un comportamiento casi lineal, con un número muy bajo de handoff fallidos en comparación con los algoritmos GRA y Random. Por el contrario, el algoritmo Random tiene el comportamiento mas irregular, con el mayor número de handoff fallidos, aproximadamente 30 veces mas que el algoritmo AHP-VIKOR.

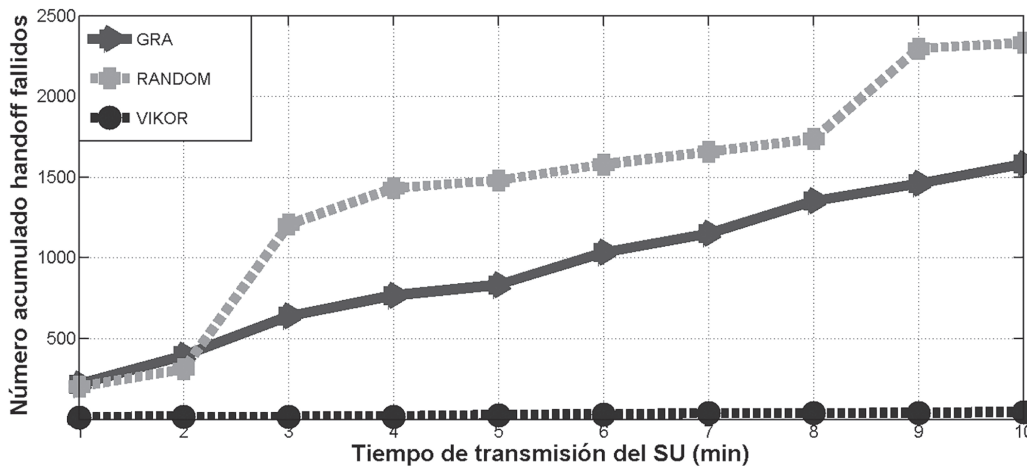


Figura 1. Número acumulado de handoff fallidos.

Fuente: elaboración propia.

La figura 2 describe el número acumulado de handoff totales que se presentaron en cada modelo de handoff espectral durante una transmisión de 10 minutos, realizada a partir de datos de ocupación espectral reales.

La figura 3 describe el promedio de ancho de banda que se presentó en cada modelo de handoff espectral durante una transmisión de 10 minutos, realizada a partir de datos de ocupación

espectral reales. De la figura 3 también se observa que aunque el algoritmo GRA describe un comportamiento menos variable que los otros dos algoritmos, su nivel de ancho de banda es relativamente muy bajo. Los algoritmos AHP-VIKOR y Random a pesar de presentar mayor variación en el ancho de banda, tienen un nivel promedio ocho y siete veces más alto que el algoritmo GRA, respectivamente.

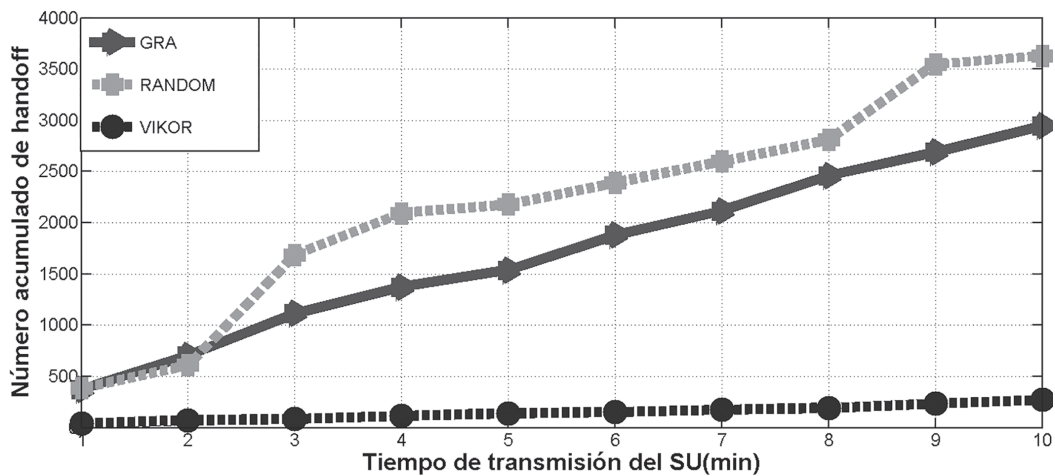


Figura 2. Número acumulado de handoff totales.

Fuente: elaboración propia.

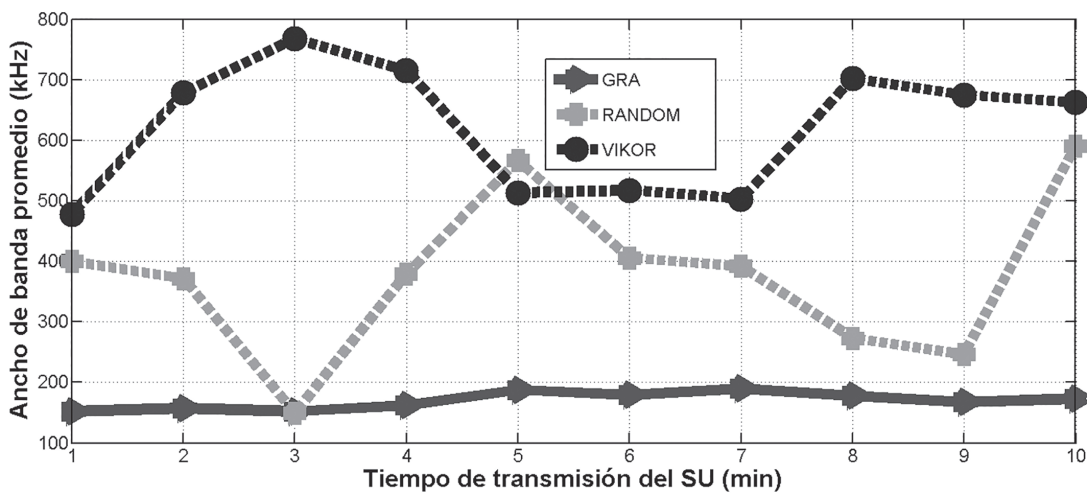


Figura 3. Ancho de banda promedio.

Fuente: elaboración propia.

La figura 4 describe el retardo promedio que se presentó en cada modelo de handoff espectral durante una transmisión de 10 minutos, realizada a partir de datos de ocupación espectral reales. Para determinar los retardos promedios acumulados de cada algoritmo, se tuvo en cuenta el número de handoff fallidos y exitosos (corresponden a la diferencia entre los handoff totales y los fallidos). La

figura 4 describe un buen comportamiento del algoritmo AHP-VIKOR propuesto en comparación con los algoritmos GRA y Random, los cuales muestran un comportamiento exponencial.

La figura 5 describe el throughput promedio que se presentó en cada modelo de handoff espectral durante una transmisión de 10 minutos, realizada a partir de datos de ocupación espectral reales.

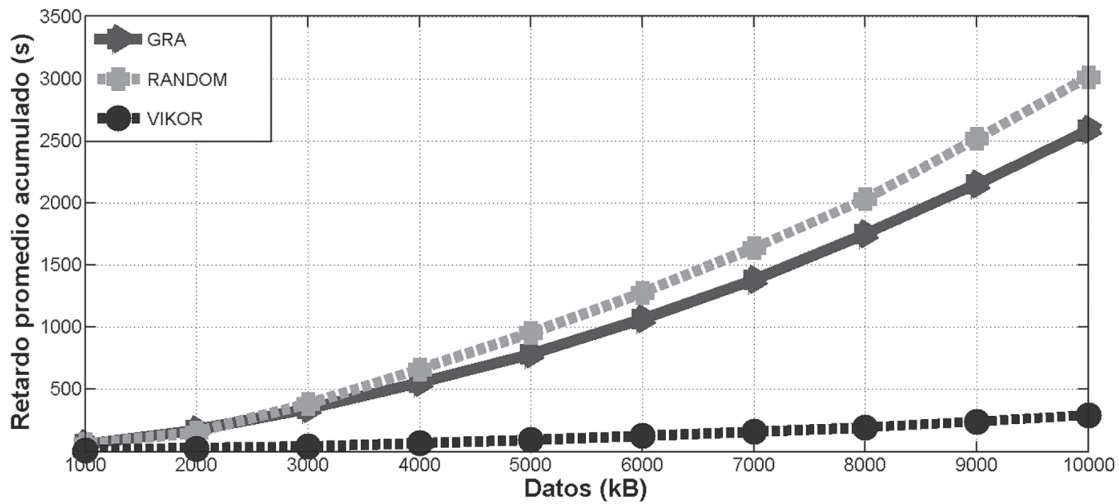


Figura 4. Retardo promedio.

Fuente: elaboración propia.

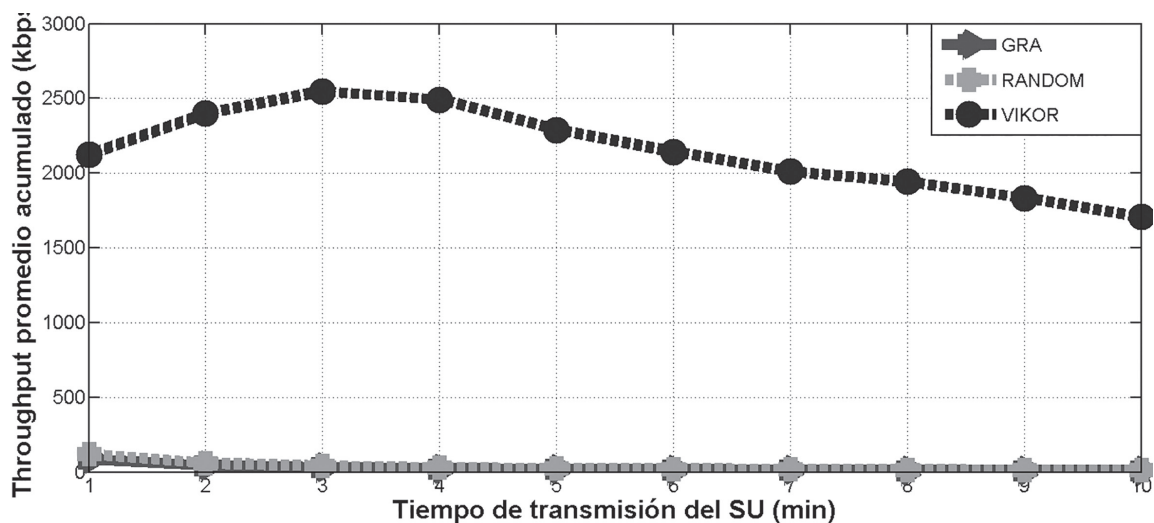


Figura 5. Throughput promedio.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 1. Evaluación comparativa de los tres modelos de handoff espectral

| Algoritmo | Evaluación comparativa | | | | | |
|-----------|------------------------|-----------------|----------------|----------|------------|-----------------|
| | Handoff fallidos | Handoff totales | Ancho de banda | Retardo | Throughput | Desempeño final |
| AHP-VIKOR | Bajo | Bajo | Alto | Bajo | Alto | Alto |
| GRA | Alto | Alto | Bajo | Alto | Muy Bajo | Bajo |
| RANDOM | Muy Alto | Muy Alto | Medio | Muy Alto | Muy Bajo | Muy Bajo |

Fuente: elaboración propia.

Para determinar el throughput promedio acumulado de cada algoritmo, se utilizó como estándar la modulación 16QAM. La figura 5 describe un comportamiento del algoritmo AHP-VIKOR muy superior en comparación con los algoritmos GRA y Random.

La tabla 1 describe la evaluación comparativa de los tres modelos de handoff espectral para redes de radio cognitiva, en términos de las cinco métricas de evaluación ejecutadas.

CONCLUSIÓN

De acuerdo con los resultados obtenidos a través de las simulaciones realizadas, a partir de los datos de ocupación espectral reales, el algoritmo híbrido para toma de decisiones multicriterio AHP-VIKOR es una técnica relativamente sencilla, que proporciona un eficiente y eficaz proceso de selección de canales de frecuencia. Lo anterior permite mejorar y fortalecer el desempeño de las estrategias de handoff espectral en las redes de radio cognitiva, en especial las proactivas.

La heterogeneidad de las redes inalámbricas actuales imponen retos en la práctica de las redes de radio cognitiva debido a las diferencias en la infraestructura de las redes actuales. Lo anterior refuerza la importancia de contar con modelos de handoff espectral que puedan adaptarse a las características de dichas redes y obtener el mejor desempeño posible para las comunicaciones de los usuarios secundarios sin afectar las comunicaciones de los usuarios primarios. Cada modelo de handoff espectral es útil para el contexto para el

que fue diseñado, por tal razón un multi-modelo podría ser una solución interesante.

FINANCIAMIENTO

Colciencias y el Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas

REFERENCIAS

- Akyildiz, I. F., Lee, W.-Y., & Chowdhury, K. R. (2009). CRAHNS: Cognitive Radio Ad Hoc Networks. *Ad Hoc Netw.*, 7(5), 810–836. <http://doi.org/10.1016/j.adhoc.2009.01.001>
- Akyildiz, I. F., Lee, W.-Y., Vuran, M. C., & Mohanty, S. (2006). NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey. *Computer Networks*, 50(13), 2127–2159. <http://doi.org/10.1016/j.comnet.2006.05.001>
- Akyildiz, I. F., Lee, W.-Y., Vuran, M. C., & Mohanty, S. (2008). A survey on spectrum management in cognitive radio networks. *IEEE Communications Magazine*, 46(4), 40–48. <http://doi.org/10.1109/MCOM.2008.4481339>
- Bari, F., & Leung, V. (2007). Application of ELECTRE to Network Selection in A Heterogeneous Wireless Network Environment (pp. 3810–3815). <http://doi.org/10.1109/WCNC.2007.697>
- Christian, I., Moh, S., Chung, I., & Lee, J. (2012). Spectrum mobility in cognitive radio networks. *IEEE Communications Magazine*, 50(6), 114–121. <http://doi.org/10.1109/MCOM.2012.6211495>

- Forero, F. (2012, November). *Detección de códigos de usuarios primarios para redes de radio cognitiva en un canal de acceso DCMA*. Colombia.
- Kibria, M. R., Jamalipour, A., & Mirchandani, V. (2005). A location aware three-step vertical handoff scheme for 4G/B3G networks (Vol. 5, pp. 2752–2756). <http://doi.org/10.1109/GLOCOM.2005.1578260>
- Marinho, J., & Monteiro, E. (2011). Cognitive radio: survey on communication protocols, spectrum decision issues, and future research directions. *Wireless Networks*, 18(2), 147–164. <http://doi.org/10.1007/s11276-011-0392-1>
- Miranda, E. (2001). Improving subjective estimates using paired comparisons. *IEEE Software*, 18(1), 87–91. <http://doi.org/10.1109/52.903173>
- Mohamed, L., Leghris, C., & Adib, A. (2011). A Hybrid Approach for Network Selection in Heterogeneous Multi-Access Environments (pp. 1–5). <http://doi.org/10.1109/NTMS.2011.5720658>
- Ramírez Pérez, C., & Ramos Ramos, V. M. (2010). Handover vertical: un problema de toma de decisión múltiple. In *VIII Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico*. Cuernavaca Morelos, México. Retrieved from <http://mcyti.izt.uam.mx/ARTICULOS/ramirezperezCIINDET2010.pdf>
- Ramirez-Perez, C., & Ramos, R. V. M. (2012). A QoS hierarchical decision scheme for vertical handoff (pp. 1–4). <http://doi.org/10.1109/ICCDCS.2012.6188942>
- Rodriguez-Colina, E., Ramirez P, C., & Carrillo A, C. E. (2011). Multiple attribute dynamic spectrum decision making for cognitive radio networks (pp. 1–5). <http://doi.org/10.1109/WOCN.2011.5872960>
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9–26. [http://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-1](http://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-1)
- Song, Q., & Jamalipour, A. (2005). A network selection mechanism for next generation networks (Vol. 2, pp. 1418–1422 Vol. 2). <http://doi.org/10.1109/ICC.2005.1494578>
- Stevens-Navarro, E., Gallardo-Medina, R., Pineda-Rico, U., & Acosta-Elias, J. (2012). Application of MADM method VIKOR for vertical handoff in heterogeneous wireless networks. *IEICE Transactions on Communications*, 95(2), 599–602.
- Stevens-Navarro, E., Lin, Y., & Wong, V. W. S. (2008). An MDP-Based Vertical Handoff Decision Algorithm for Heterogeneous Wireless Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 57(2), 1243–1254. <http://doi.org/10.1109/TVT.2007.907072>
- Stevens-Navarro, E., Martinez-Morales, J. D., & Pineda-Rico, U. (2013). Evaluation of Vertical Handoff Decision Algorithms Based on MADM Methods for Heterogeneous Wireless Networks. *Journal of Applied Research and Technology*, 10(4), 534–538. Retrieved from <http://www.revistas.unam.mx/index.php/jart/article/view/40602>
- Stevens-Navarro, E., & Wong, V. W. S. (2006). Comparison between Vertical Handoff Decision Algorithms for Heterogeneous Wireless Networks (Vol. 2, pp. 947–951). <http://doi.org/10.1109/VETECS.2006.1682964>
- Tanino, T., Tanaka, T., & Inuiguchi, M. (2003). *Multi-Objective Programming and Goal Programming*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Tsai, M.-C. (2007). Multi-Attributes Handover Decision Mechanism across Wi-Fi & WiMAX Using MIH Services.
- Wang, C.-W., & Wang, L.-C. (2009). Modeling and Analysis for Proactive-Decision Spectrum Handoff in Cognitive Radio Networks. In *IEEE International Conference on Communications, 2009. ICC '09* (pp. 1–6). <http://doi.org/10.1109/ICC.2009.5199189>
- Wang, L.-C., Wang, C.-W., & Chang, C.-J. (2012). Modeling and Analysis for Spectrum Handoffs in Cognitive Radio Networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 11(9), 1499–1513. <http://doi.org/10.1109/TMC.2011.155>
- Yang, S.-F., & Jung-ShyrWu. (2008). A IEEE 802.21 Handover design with QOS provision across WLAN and WMAN (pp. 548–552). <http://doi.org/10.1109/ICCCAS.2008.4657833>
- Yang Shin-Jer, T. W.-C. (2013). Design novel weighted rating of multiple attributes scheme to enhance handoff efficiency in heterogeneous wireless networks. *Computer Communications*, 36(14), 1498–1514. <http://doi.org/10.1016/j.comcom.2013.06.005>

Ying, W., Jun, Y., Yun, Z., Gen, L., & Ping, Z. (2008). Vertical Handover Decision in an Enhanced Media Independent Handover Framework (pp. 2693–2698). <http://doi.org/10.1109/WCNC.2008.472>

Zapata Cortés, J. A., Arango Serna, M. D., & Adarme Jaimés, W. (2012). Applying fuzzy extended analytical hierarchy (FEAHP) for selecting logistics software. *Ingeniería E Investigación*, 32(1), 94–99. Retrieved

from <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/ingevin/article/view/28521/33581>

Zhang, W. (2004). Handover decision using fuzzy MADM in heterogeneous networks (Vol. 2, pp. 653–658 Vol.2). <http://doi.org/10.1109/WCNC.2004.1311263>





Caracterización fisicoquímica de cuarzo en el municipio de La Playa de Belén, departamento de Norte de Santander

Physicochemical characterization of quartz in the municipality of La Playa de Belén–North Santander department

Lina Marcela Hoyos Palacio*, Edwin Espinel Blanco**, Yeixon Quintero Martínez***

Fecha de recepción: 15 de septiembre de 2014

Fecha de aceptación: 6 de abril de 2015

Como citar: Hoyos Palacio, L. M., Espinel Blanco, E., & Quintero Martínez, Y. (2015). Caracterización fisicoquímica de cuarzo en el municipio de La Playa de Belén, departamento de Norte de Santander. *Revista Tecnura*, 19(45), 41-51. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.3.a03

RESUMEN

El cuarzo es un silicato, se presenta en una gran variedad de condiciones geológicas, aparece en muchas rocas ígneas y metamórficas, y es un constituyente principal de pegmatitas graníticas. Entre los minerales, el cuarzo es el más próximo a un compuesto químico puro y tiene propiedades físicas constantes. Debido a sus aplicaciones y usos, se convierte en un material que contribuye a mejorar las condiciones de vida del hombre, por tal razón se hace evidente la necesidad de conocer sus propiedades para proponer aplicaciones óptimas. Este trabajo describe las propiedades físicas y químicas del cuarzo en el municipio de La Playa de Belén, departamento de Norte de Santander, Colombia, mediante el uso de técnicas elementales. Se utilizan las técnicas de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) con analizador de energías dispersas (EDS), difracción de rayos X (DRX), análisis termogravimétrico (TGA) y diferencial termogravimétrico (DTG). Con este análisis se obtuvieron las características

composicionales, químicas, morfológicas y se evaluó el comportamiento térmico de acuerdo con la composición.

Palabras clave: caracterización, cuarzo, fisicoquímicas, materiales, propiedades.

ABSTRACT

Quartz is a silicate, available in a variety of geological conditions, it appears in many igneous and metamorphic rocks, and it is a major constituent of granite pegmatite. Among minerals, quartz is the closest to a pure chemical compound and has constant physical properties, and due to their applications and uses it becomes a material that contributes to improving the living conditions of man. For that reason, it is necessary to know their properties to propose optimal applications. This work presents the physicochemical characterization of quartz in the municipality of La Playa de Belén (North Santander Department, Colombia) using elementary techniques through studies to establish the physical

* Ingeniera química, doctora en Ingeniería y Termodinámica. Coordinadora de la Línea de Nanotecnología y Biomateriales, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia. Contacto: lina.hoyos@upb.edu.co

** Ingeniero mecánico, magister en Ingeniería. Investigador del grupo GITYD, Universidad Francisco de Paula Santander, Seccional Ocaña, Ocaña, Colombia. Contacto: eespinelb@ufps.edu.co

*** Ingeniero mecánico. Investigador del grupo GITYD, Universidad Francisco de Paula Santander, Seccional Ocaña, Ocaña, Colombia. Contacto: yquinterom@ufps.edu.co

and chemical properties of this mineral. Techniques such as scanning electron microscopy (SEM) with disperse energy analyzer (EDS), X-ray diffraction (XRD), thermogravimetric (TGA) and differential thermogravimetric analysis (DTG) were used. The

compositional, chemical and morphological characteristics are obtained, and the thermal behavior is evaluated according to the composition.

Keywords: characterization, materials, physicochemical, properties, quartz.

INTRODUCCIÓN

Los minerales son materiales que conforman las rocas de la corteza terrestre, son los que más abundan y están formados por silicatos, óxidos y otros compuestos de oxígeno, como carbonatos en cantidades mínimas (Mendoza, Baron Gonzalez, & Parra Vargas, 2007). Las diferentes asociaciones de minerales caracterizan las rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, y así como las venas minerales, las pegmatitas, las rocas meteorizadas y los suelos, tienen la facultad de dar información sobre las condiciones ambientales en que se formaron, sus componentes, la determinación de propiedades químicas y físicas. El suelo está constituido en gran parte por silicatos; los ladrillos, las piedras, el cemento y el vidrio empleados en la construcción son silicatos o se derivan de estos y son los materiales cerámicos más importantes (Cornellis, Cornelius, & Hurbult, 1996).

Existen otras razones por las cuales se deben estudiar los silicatos: el silicio es el elemento más abundante después del oxígeno, y el óxido de silicio, SiO_2 , es el más abundante de todos los óxidos, siendo el cuarzo la forma más conocida (Holmes, 1980). Este compuesto forma una estructura ordenada regular y una irregular que se llama vidrio de cuarzo o sílice (Alipour & Denoyel, 2011). El cuarzo se emplea en aparatos ópticos y científicos, en chips de silicio, en la producción de vidrio (Anderson, 1998), es además la materia prima de artesanías, utensilios domésticos, producción de porcelanas, vidrios y objetos refractarios (Shackelford, 2010), tallado en lentes y prismas. A los usos ya mencionados se une su utilización como material de relleno en la preparación de resinas

compuestas o composites dentales (Veranes, 2003), escoria activada alcalinamente autoclave mezclada con polvo de cuarzo (Rashad, 2012).

Los estudios sobre las propiedades y aplicaciones del cuarzo a través de técnicas elementales han permitido comprender este material (Leal, Cortona, & Pagan, 2005), la evolución de la cementación y la historia de la formación basada de isótopos de oxígeno en los cubrimientos de cuarzo (Hyodo, Kozdon, Pollington, & Valley, 2014), así como su aplicación en la técnica de deflexión de microbalanza de cristal de cuarzo y haz de sonda electroquímica combinado en disolventes eutécticas profundas (Hilman, Ryder, Zaleski, Ferreira, Beasley, & Vieil, 2014), entre otras muchas aplicaciones que tienen este mineral.

La caracterización fisicoquímica del cuarzo se realiza para conocer las propiedades de mayor relevancia de este mineral. Para esto se empleó una metodología descriptiva, el diseño de un plan de muestreo y técnicas elementales para la caracterización de materiales, las cuales permitieron conocer su composición química y morfológica; además se evaluó el comportamiento térmico de acuerdo con la composición.

METODOLOGÍA

Ubicación

La zona donde se extrajeron las muestras se encuentra ubicada en el municipio de La Playa de Belén, departamento de Norte de Santander, Colombia, a una altitud de 1.754 metros sobre el nivel del mar, bajo las coordenadas N $08^{\circ}11'13,2''$ y W $073^{\circ}16'22,3''$, con una temperatura promedio de 21°C .

Selección de muestras

La selección de las muestras en el área de estudio se realizó por medio del diseño de un muestreo estratificado, como lo muestra la Tabla 1. Este método consiste en dividir el área de estudio en estratos sin que estos solapen o interfieran entre sí (Alfaro, 2002), de esta manera se logra obtener muestras representativas que permiten conocer las características del conjunto de rocas estudiadas. Para garantizar que todas las muestras tengan la misma posibilidad de ser elegidas, se estableció dividir el área de estudio en cuatro estratos, cada uno dividido a su vez en tres secciones; por cada sección se tomaron muestras de tres kilogramos, de las cuales se seleccionaron muestras al azar para comprobar la variabilidad o uniformidad.

El tamaño de la muestra tomada de campo se redujo al tamaño de estudio del laboratorio. Se realizó de acuerdo con el procedimiento definido en la Norma Técnica Colombiana NTC 3674, la cual describe las prácticas para la reducción del tamaño de las muestras de agregados, tomadas en campo, para realizar ensayos. De acuerdo con la norma se eligió trabajar con el Método B cuarteo.

Las muestras se redujeron en cantidad y tamaño, por lo cual se utilizó una porra para impactar las rocas y fragmentarlas hasta obtener partículas del tamaño de 75 micras. Además se utilizó un mortero de porcelana para macerar el mineral y conseguir partículas homogéneas.

Determinación del porcentaje de humedad

Para determinar la humedad de las muestras de cuarzo se adaptó la norma mexicana NMX-L-159-SCFI-2003, la cual especifica el procedimiento para determinar las propiedades de la barita empleada en fluidos de perforación. Se utilizó el mineral en polvo con un tamaño de grano de 75 μm pasante del tamiz número 200. Se usó una cantidad de 80 gramos de masa, medidos en una balanza digital marca Pioneer Ohaus Corp. Pinebrook, con una precisión de 0,05 gramos. Se vertió el mineral en recipientes secos de vidrio, se introdujeron en un horno digital de precisión marca Pinzuar Ltda., modelo PG 190, a una temperatura de ± 110 °C por un tiempo de 24 horas.

Tabla 1. Diseño del muestreo estratificado

| Estrato | Nombre de la muestra | Coordenada |
|----------------|----------------------|------------|
| E ₁ | M ₁ | (0,0) |
| | M ₂ | (2.5,4) |
| | M ₃ | (5,0) |
| E ₂ | M ₄ | (0,0) |
| | M ₅ | (2.5,4) |
| | M ₆ | (5,0) |
| E ₃ | M ₇ | (0,0) |
| | M ₈ | (2.5,4) |
| | M ₉ | (5,0) |
| E ₄ | M ₁₀ | (0,0) |
| | M ₁₁ | (2.5,4) |
| | M ₁₂ | (5,0) |

Fuente: elaboración propia.

Determinación de la densidad

Esta propiedad del mineral se determinó por medio de la adecuación de la norma técnica colombiana NTC 221, la cual establece el método para establecer la densidad del cemento hidráulico. El material fue secado durante 24 horas a 100 °C, se pesó cada muestra de 63 gramos de tamaño de grano del pasante en tamiz número 200 (75µm), de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma.

Análisis termogravimétrico y diferencial termogravimétrico

Las condiciones que se utilizaron para este caso de estudio son las siguientes: atmósfera oxidante de O₂ (aire), la velocidad lineal de calentamiento fue de 10 °C/min y el límite máximo de temperatura de 700 °C.

Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), con analizador del Espectrómetro de Energías Dispersas (EDS)

El recubrimiento de las muestras se realizó en un equipo marca Denton Vacuum, y se utilizó recubrimiento de oro. El cuarzo fue adherido al soporte

con cinta de grafito. El microscopio que se usó para analizar las muestras es marca Jeol JSM-6490LV.

Difracción de rayos X

Para el empleo de la técnica de difracción de rayos x se utilizó un equipo marca Panalytical, cuya referencia es X'pert PRO MPD. El tipo de radiación empleada fue radiación de cobre con una longitud de onda característica lambda (λ) de 1,5406 angstrom (Å). El barrido se realizó entre 6 y 70 grados, el paso fue de 0,013 grados y el tiempo por paso de 59 segundos. El tubo fue polarizado con una potencia de 1,8 kW (40 mAmp, 45kV).

RESULTADOS

Humedad

El método se basa en el cálculo de la humedad higroscópica, que se realiza para determinar el cambio de masa del mineral mediante un proceso de secado a una temperatura constante en un horno. Al ser calentadas las muestras se elimina el agua libre contenida en los espacios porosos dentro de las partículas constituyentes (NMX-L-159-SCFI, 2003), se compara la masa inicial de la muestra y la final luego del secado, definido en la ecuación

Tabla 2. Contenido de humedad de las muestras de cuarzo

| Número muestra | Masa inicial (gramos) | Masa final (gramos) | % de humedad |
|-----------------|-----------------------|---------------------|--------------|
| M ₁ | 80 | 79,93 | 0,0875 |
| M ₂ | 80 | 79,94 | 0,0750 |
| M ₃ | 80 | 79,97 | 0,0375 |
| M ₄ | 80 | 79,95 | 0,0625 |
| M ₅ | 80 | 79,95 | 0,0625 |
| M ₆ | 80 | 79,94 | 0,0750 |
| M ₇ | 80 | 79,98 | 0,0250 |
| M ₈ | 80 | 79,98 | 0,0250 |
| M ₉ | 80 | 79,96 | 0,0500 |
| M ₁₀ | 80 | 79,97 | 0,0375 |
| M ₁₁ | 80 | 79,96 | 0,0500 |
| M ₁₂ | 80 | 79,98 | 0,0250 |

Fuente: elaboración propia.

(1). Los cálculos obtenidos con esta práctica se resumen en la tabla 2.

$$\% \text{ humedad} = \frac{m - m_s}{m} \times 100 \quad (1)$$

Donde,

m : es la masa inicial de la muestra, en gramos g.

m_s : es la masa de la muestra seca, en gramos g.

La humedad determinada por la práctica es menor que 0,1%, lo cual garantiza que las muestras estudiadas presentan bajo contenido de agua. Esto se debe a que los enlaces que unen el mineral son considerados de tipo iónico en el 50% y covalente en el otro 50%, lo que hace del cuarzo un mineral con enlaces químicos fuertes y por esta característica no lo afecta.

Densidad

El método usado permitió determinar la densidad específica de las muestras de cuarzo. La práctica de encontrar la densidad de un mineral consiste en establecer la relación entre una cantidad determinada de masa y el volumen del líquido desplazado por dicha cantidad de masa en el frasco de

Le Chatelier y se establece en la ecuación (2). Los valores de densidad encontrados se resumen en la Tabla 3.

$$\rho = \frac{m}{v_d} \quad (2)$$

Donde,

ρ : Densidad calculada del cuarzo (g/cm^3).

m : es la masa de la muestra de cuarzo en gramos (g).

v_d : es el volumen desplazado (cm^3).

La densidad de las muestras de cuarzo encontrada fue de $2,65 \text{ g/cm}^3$ con $\pm 0,01 \text{ g/cm}^3$, que es igual al valor teórico estandarizado para el material de $2,65 \text{ g/cm}^3$, lo cual evidencia la pureza encontrada en la composición química y la calidad del mineral.

Análisis termogravimétrico y diferencial termogravimétrico

La técnica usada permite comparar los termogramas obtenidos con datos teóricos y de esta manera determinar la presencia o no de materiales diferentes al cuarzo. En la figura 1 se observan los termogramas para las muestras 1, 4, 7 y 11.

Tabla 3. Densidad específica de las muestras de cuarzo

| Muestra | Masa (gramos) | Volumen desplazado (cm^3) | Densidad g/cm^3 |
|----------|---------------|--------------------------------------|--------------------------|
| M_1 | 63 | 23,8 | 2,65 |
| M_2 | 63 | 23,8 | 2,65 |
| M_3 | 63 | 23,9 | 2,64 |
| M_4 | 63 | 23,7 | 2,66 |
| M_5 | 63 | 23,8 | 2,65 |
| M_6 | 63 | 23,8 | 2,65 |
| M_7 | 63 | 23,8 | 2,65 |
| M_8 | 63 | 23,9 | 2,64 |
| M_9 | 63 | 23,9 | 2,64 |
| M_{10} | 63 | 23,9 | 2,64 |
| M_{11} | 63 | 23,9 | 2,64 |
| M_{12} | 63 | 23,9 | 2,64 |

Fuente: elaboración propia.

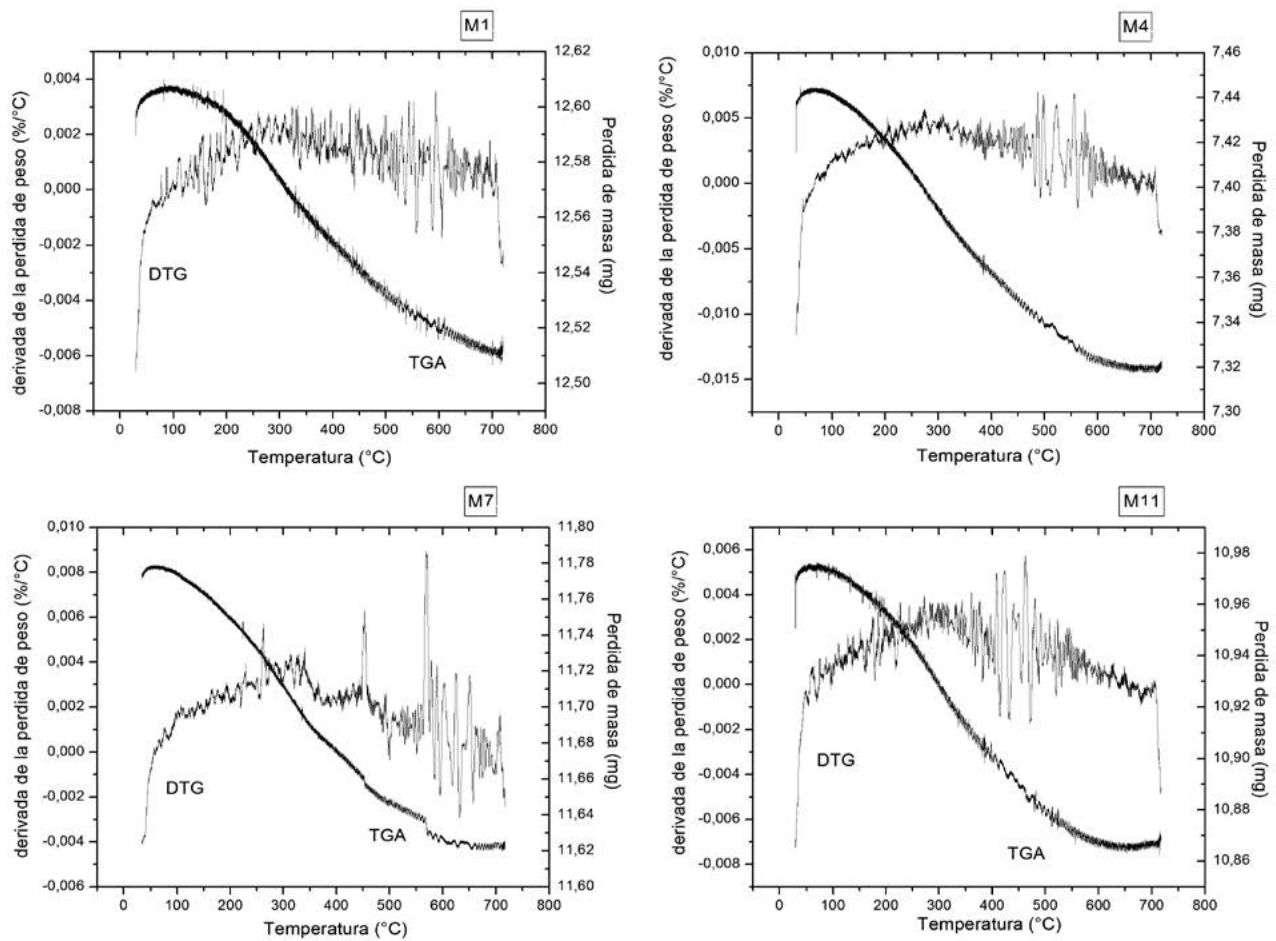


Figura 1. Termogramas de las muestras 1, 4, 7 y 11 de cuarzo. En ellas se observa el comportamiento con el cambio de temperatura en el análisis termogravimétrico (TGA) y el cambio de fase de cuarzo- α a cuarzo- β alrededor de la temperatura de 573 °C en el análisis diferencial termogravimétrico (DTG).

Fuente: elaboración propia.

Los termogramas permiten observar que alrededor de los 573 °C se presenta altas variaciones en las curvas pertenecientes a la derivada de la pérdida de masa (DTG). Esto se debe al cambio de fase cristalina de cuarzo- α a cuarzo- β , transición de tipo desplazativo que indica que el volumen de la muestra aumenta debido al cambio en las dimensiones de la red cristalina sin que se presente ruptura de los enlaces. Todos los termogramas presentan variación en la pérdida de masa y su derivada en el rango de temperatura comprendido entre 60 °C y 260 °C debido a la deshidratación de los silicatos y a la pérdida de peso.

Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), con analizador del Espectrómetro de Energías Dispersas (EDS)

En la figura 2 se presentan las micrografías con las cuales se evaluó las características morfológicas para cada una de las muestras observadas a 500 X. Las imágenes permitieron comprobar el tipo de fractura concoidal o en capas característica del cuarzo. Asimismo se observa la forma irregular de los cristales, un aspecto importante para la influencia si se utiliza como material industrial por

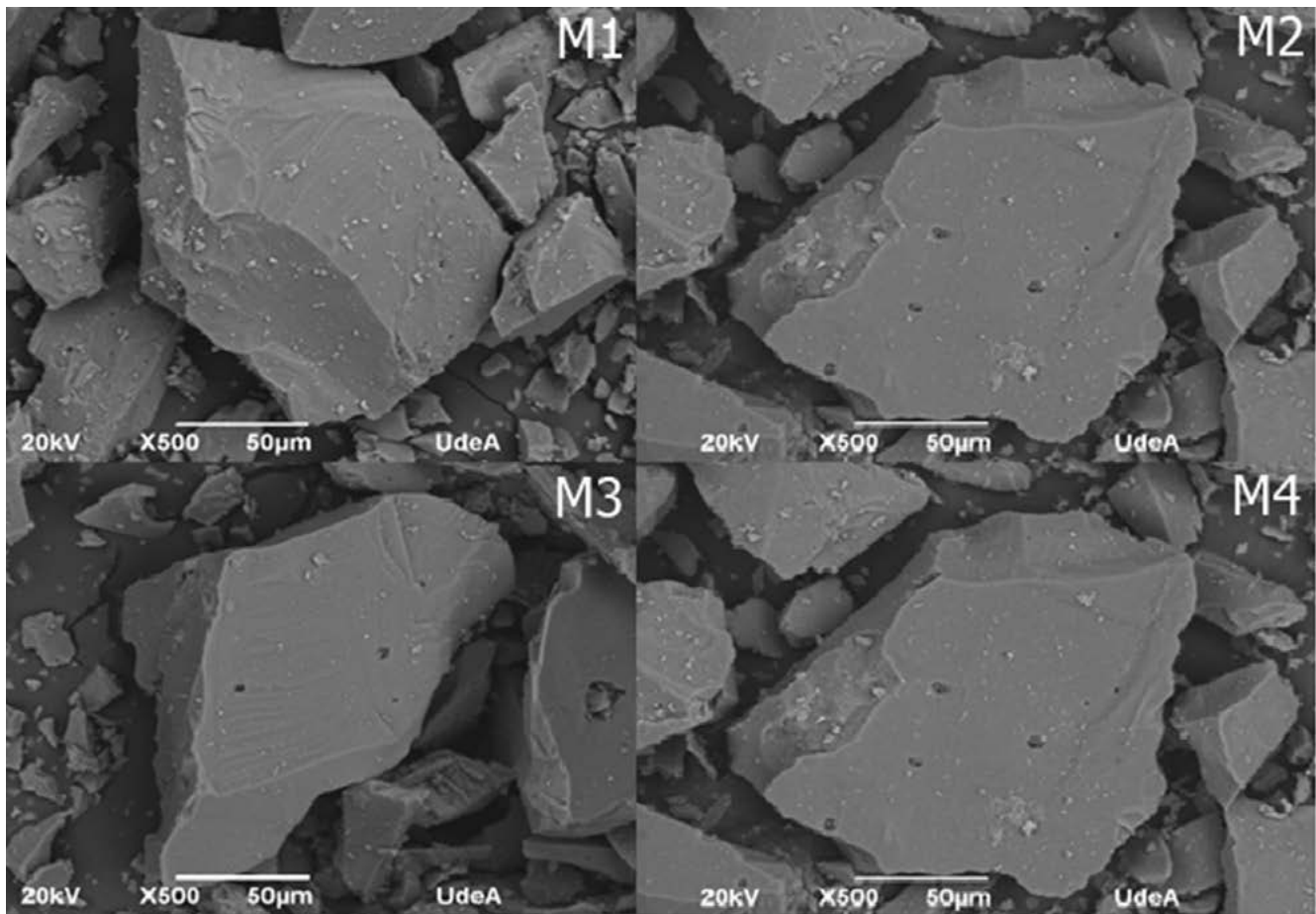


Figura 2. Micrografía a 500 X de las muestras 1, 4, 6 y 8 de las muestras de cuarzo. Se observa la forma irregular de los cristales.

Fuente: elaboración propia.

la unión mecánica que se produce si se aglomera con otros compuestos.

En las micrografías a 100 X que se muestran en la figura 3 se observa que las partículas son irregulares en su forma y homogéneas la distribución de tamaño de grano, lo cual permite verificar y mejorar las apreciaciones de acuerdo con la superficie de los cristales y con ello la calidad del material porque se observa la superficie irregular y alisada característica del cuarzo. Asimismo, se observa que existe una gran distribución de partículas que van desde tamaños de $1\mu\text{m}$ hasta mayores de $75\mu\text{m}$.

Con la finalidad de conocer la composición química de las muestras, se analizaron con una

microsonda de dispersión energética, lo cual permitió determinar la composición química de las muestras de cuarzo (tabla 4). Se encontró que todas las muestras son puras, excepto la primera, en la cual aparece una pequeña inclusión de hierro de 1,05% del peso total de la muestra debido a la contaminación durante la trituration.

La composición química del cuarzo corresponde a un mineral de alta pureza por su contenido único de SiO_2 , que cumple con los requerimientos de calidad industriales tales como la cristalería, componentes ópticos, electrónico y como materia prima para la obtención de sílice fundida (Leal, Cortona, & Pagan, 2005).

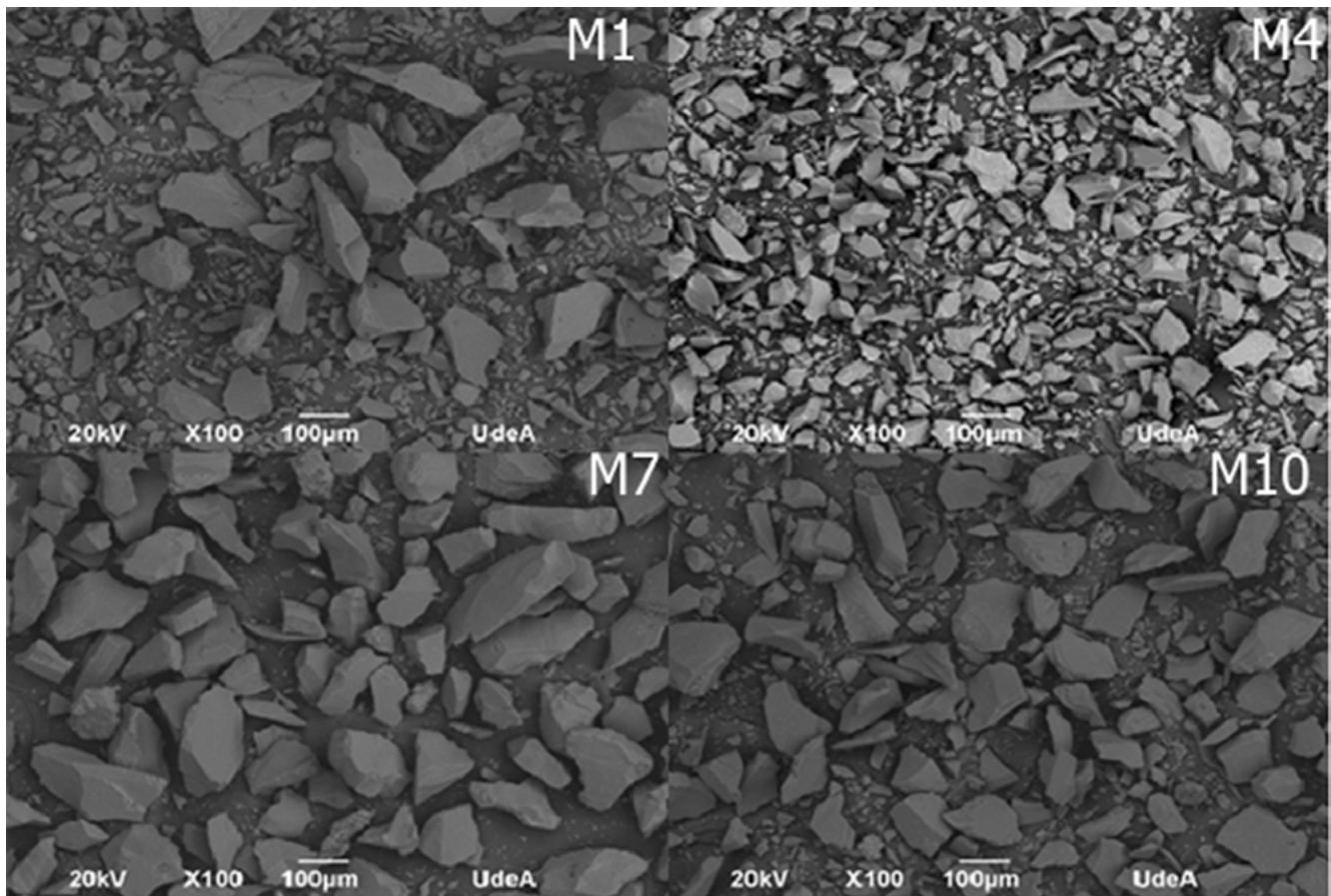


Figura 3. Micrografía a 500 X de las muestras de cuarzo 1, 4, 7 y 10. Se observa la forma irregular de los cristales y su distribución.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Composición química del cuarzo determinado por el espectrómetro de energías dispersas (EDS)

| MUESTRA | % EN PESO | | | % ATÓMICO | | % | TOTAL |
|-----------------|-----------|-------|------|-----------|-------|------|-------|
| | O | Si | Fe | O | Si | | |
| M ₁ | 52,56 | 46,39 | 1,05 | 66,29 | 33,33 | 0,38 | 100 |
| M ₂ | 54,56 | 45,95 | | 67,37 | 32,63 | | 100 |
| M ₃ | 55,99 | 44,01 | | 69,07 | 30,93 | | 100 |
| M ₄ | 50,87 | 49,13 | | 64,51 | 35,49 | | 100 |
| M ₅ | 52,07 | 47,93 | | 65,60 | 34,40 | | 100 |
| M ₆ | 52,66 | 47,34 | | 66,13 | 33,87 | | 100 |
| M ₇ | 53,88 | 46,12 | | 67,22 | 32,78 | | 100 |
| M ₈ | 55,82 | 44,18 | | 68,92 | 31,09 | | 100 |
| M ₉ | 56,93 | 43,07 | | 69,88 | 30,12 | | 100 |
| M ₁₀ | 56,94 | 43,06 | | 69,89 | 30,11 | | 100 |
| M ₁₁ | 55,19 | 44,81 | | 68,37 | 31,63 | | 100 |
| M ₁₂ | 55,19 | 44,81 | | 68,37 | 31,63 | | 100 |

Fuente: elaboración propia.

Difracción de rayos X

Las intensidades encontradas en la difracción de rayos X se compararon con las descritas en el Manual de Mineralogía (Dana & Hurlbut, 1960). Se comprobó que las intensidades corresponden al mismo valor del intervalo angular 2θ , como se

puede observar en los difractogramas de la figura 4, en la cual se aprecia que la única fase presente es del cuarzo, y complementa los resultados obtenidos mediante la técnica del espectroscopio de energías dispersas, en el cual se determinó la alta pureza de las muestras de cuarzo.

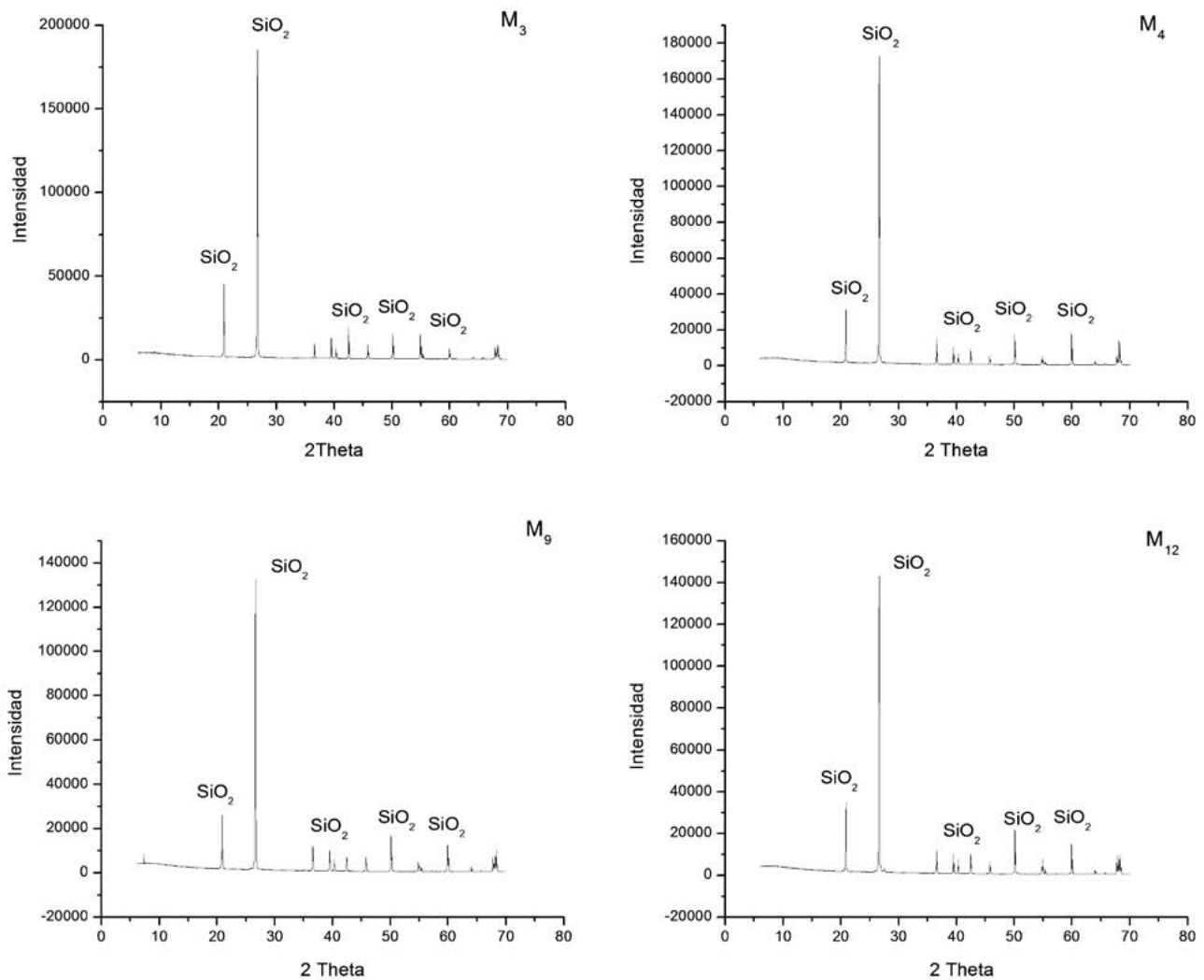


Figura 4. Difractogramas de las muestras de cuarzo 3, 4, 9 y 12. Se observa las intensidades perteneciente al mineral.

Fuente: elaboración propia.

En los difractogramas se observan diferentes picos de intensidades de rayos X difractados por la muestra de cuarzo. El valor más intenso se toma como 100, se toman los otros dos picos más intensos y por regla de tres se halla la intensidad relativa (I/I_0). Los datos son comparados con la tarjeta 33-116 de la base de datos PDF-2 Power Diffraction File, International Center Diffraction. Los resultados se resumen en la tabla 5.

Para calcular el tamaño de los cristallitos se utilizó la ecuación de Scherrer. Este método consiste en extraer la información del tamaño del cristallito. Si la red cristalina está libre de deformación y los cristales predominan de manera general en las muestras, entonces se puede estimar el tamaño

promedio del cristal empleando la ecuación (3). Los resultados se resumen en la tabla 6.

$$\beta = \frac{\lambda \times k}{FWHM \times \cos\theta} \quad (3)$$

Donde,

β : es el tamaño promedio de cristal.

k : es el factor de forma del cristal y su valor es de 0,89.

λ : es la longitud de onda de la radiación utilizada (λ_{Cu}), que es de 1,5406.

θ : es la posición del pico de difracción.

$FWHM$: es el ancho a la altura media del pico de difracción de la muestra.

Tabla 5. Distancia entre los planos cristalográficos y valores de intensidad relativa de los picos I/I_0 de las muestras de cuarzo

| | Angulo 2 θ | Distancia nanómetros (nm) | I/I_0 | Distancia nanómetros (nm)* | I/I_0^* |
|----------|-------------------|---------------------------|---------|----------------------------|-----------|
| M_3 | 26,61° | 0,335 | 100 | 0,334 | 100 |
| | 20,851° | 0,426 | 24,41 | 0,424 | 22 |
| | 50,158° | 0,182 | 8,71 | 0,181 | 10 |
| M_4 | 26,614° | 0,335 | 100 | 0,334 | 100 |
| | 20,856° | 0,426 | 18,34 | 0,424 | 22 |
| | 50,119° | 0,182 | 10,01 | 0,181 | 10 |
| M_9 | 26,618° | 0,335 | 100 | 0,334 | 100 |
| | 20,856° | 0,426 | 19,79 | 0,424 | 22 |
| | 50,132° | 10,82 | 12,8 | 0,181 | 10 |
| M_{12} | 26,618° | 0,335 | 100 | 0,334 | 100 |
| | 20,849° | 0,426 | 24,57 | 0,424 | 22 |
| | 50,132° | 0,182 | 10,27 | 0,181 | 10 |

* PDF-2 Power Diffraction File, International Center Diffraction.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Tamaño de los cristallitos de cuarzo

| | Ángulo 2 θ | Tamaño del cristal nanómetros (nm) |
|----------|-------------------|------------------------------------|
| M_3 | 26,61° | 29,5630 |
| M_4 | 26,614° | 28,2162 |
| M_9 | 26,618° | 28,2169 |
| M_{12} | 26,618° | 28,2169 |

Fuente: Elaboración Propia.

CONCLUSIONES

Con la caracterización del cuarzo del municipio de La Playa de Belén se encontró, por medio de las tres técnicas utilizadas y la determinación de la densidad, que el mineral es 100% puro, que lo categoriza como cuarzo de alta pureza, al estar por encima de 99,95% de composición de SiO_2 .

Con el estudio realizado se establecieron las características del afloramiento de cuarzo del municipio, tales como la composición química elemental, el porcentaje de los elementos, la morfología y el comportamiento térmico con el cambio de temperatura.

FINANCIAMIENTO

Este trabajo se llevó a cabo en el marco del proyecto "Desarrollo de un sistema de monitoreo cardiaco vestible mediante el uso de nanosensores de base textil reforzados con nanotubos de carbono", el cual fue aprobado por el Sistema General de Regalías en el año 2010. La investigación realizada tiene como objetivo principal realizar la caracterización específica de cuarzos en una zona del país, de gran interés para futuras explotaciones y exploraciones mineras, que posibilite el uso de este material en el desarrollo de aplicaciones biomédicas.

REFERENCIAS

- Alfaro, M. (2002). Introducción al muestreo minero. Santiago de Chile: Instituto de Ingenieros de Minas de Chile.
- Alipour, V., & Denoyel, R. (2011). Characterization of wettability alteration of calcite, quartz and kaolinite: Surface energy analysis. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 98-108.
- Anderson, J. (1998). *Ciencia de los materiales* (2 ed.). LIMUSA, S.A. México
- Cornellis, K., Cornelius, K., & Hurbult, S. y. (1996). *Manual de minerología* (4 ed.). Reverte, S.A.
- Dana, & Hurlbut. (1960). *Manual de minerología de dana* (2 ed.). Barcelona-Buenos Aires-México: REVERTÉ, S.A.
- Hilman, A., Ryder, K., Zaleski, C., Ferreira, V., Beasley, C., & Vieil, E. (2014). Application of the combined electrochemical quartz crystal microbalance and probe beam deflection technique in deep eutectic solvents. *Electrochimica Acta*, 134(1) 42-51.
- Holmes, A. (1980). *Geología Física*. Ediciones Omega S.A.
- Hyodo, A., Kozdon, R., Pollington, A. D., & Valley, J. W. (2014). Evolution of quartz cementation and burial history of the Eau Claire Formation based on in situ oxygen isotope analysis of quartz overgrowths. *Chemical Geology*, 384(1), 168-180.
- Leal, P., Cortona, O., & Pagan, F. J. (2005). *Vetas de cuarzo al sur de Santiago del Estero*. Asociación Geológica de Argentina, 389-401.
- Mendoza, H. H., Baron Gonzalez, A. J., & Parra Vargas, C. A. (2007). Caracterización composicional de sílice de Ramiriquí Boyacá. *Sciencia et Technica*, 34(1), 647-651.
- NMX-L-159-SCFI. (2003). *Exploración del petróleo-barita empleada en fluidos de perforación, terminación y mantenimiento de pozos petroleros-especificaciones y métodos de prueba*. Ciudad de México: Normas Técnicas Mexicanas.
- Rashad, A. M. (2012). A preliminary study of autoclaved alkali-activated slag blended with quartz powder. *Construction and Building Materials*, 33(1), 70-77.
- Shackelford, J. (2010). *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros*. Pearson Educación, 6ta ed. Madrid.
- Veranes, Y. (2003). Caracterización del cuarzo del yacimiento "El Cacahual" para la preparación de resinas compuestas. *Revista Cubana de Química*, 15 (2), 81-88.





Análisis del comportamiento de los frenos de disco de los vehículos a partir de la aceleración del proceso de corrosión

Behavioral analysis of disc brake vehicle from accelerating the process of corrosion

Ricardo Andrés García León*, María Angélica Acosta Pérez**, Eder Flórez Solano ***

Fecha de recepción: 23 de agosto de 2014

Fecha de aceptación: 6 de abril de 2015

Como citar: García León, R. A., Acosta Pérez, M. A., & Flórez Solano, E. (2015). Análisis del comportamiento de los frenos de disco de los vehículos a partir de la aceleración del proceso de corrosión. *Revista Tecnura*, 19(45), 53-63. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.3.a04

RESUMEN

El sistema de frenado de un automóvil debe satisfacer un complejo conjunto de requerimientos, entre los cuales la seguridad es lo más importante. Los frenos deben trabajar en forma segura y predecible en cualquier circunstancia, lo cual implica disponer de un nivel estable de fricción, en cualquier condición de temperatura, humedad y salinidad del medio ambiente.

Para un correcto diseño y operación de los discos de freno, es necesario considerar diferentes aspectos, tales como la geometría, el tipo de material, la resistencia mecánica, la temperatura máxima, la deformación térmica, la resistencia al agrietamiento, entre otros. Todos estos aspectos inciden en que el proceso de corrosión se acelere y se genere así desgaste de los componentes de los discos y por ende la inseguridad en el proceso de frenado.

Palabras clave: corrosión, deformación, desgaste, fricción, resistencia, seguridad, temperatura.

ABSTRACT

The braking system of a car must meet a complex set of requirements, among which safety is paramount. The brakes must work safely and predictably under all circumstances, which means having a stable level of friction, under all conditions of temperature, as well as environmental factors.

For proper design and operation of the brake discs it is necessary to consider different aspects such as geometry, material type, mechanical strength, maximum temperature, thermal deformation, resistance to cracking, among others. All these aspects make the corrosion process be accelerated, generating component wear thus, and of course uncertainty in the braking process.

Keywords: corrosion, friction, resistance, safety, strain, temperature, wear.

* Ingeniero mecánico, estudiante de maestría en Ingeniería Industrial, profesional universitario. Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Ocaña, Colombia. Contacto: ragarcial@ufpso.edu.co

** Ingeniera mecánica, magíster en Ingeniería Mecánica, Extensión Universitaria. Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Ocaña, Colombia. Contacto: maacostap@ufpso.edu.co

*** Ingeniero mecánico, magíster en Ingeniería Mecánica, decano de la Facultad de Ingenierías. Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Ocaña, Colombia. Contacto: enflorezs@ufpso.edu.co

INTRODUCCIÓN

El sistema de frenos es, sin duda, el componente más importante para la seguridad vial del automóvil, ya que de este depende la detención total o parcial del vehículo, y en consecuencia la integridad de sus pasajeros. Generalmente el 70% de la energía cinética producida en el movimiento es absorbida por los frenos de disco delanteros y el restante por el freno trasero, que suele ser de tambor. Estos sistemas se fundamentan en la fricción para detener el movimiento del vehículo, teniendo como principio la presión hidráulica que empuja las pastillas de freno contra el disco de hierro fundido. En consecuencia, el comportamiento que produce este tipo de dispositivos, a través de la energía cinética, es crear un calor considerablemente alto durante el frenado, aumentando la temperatura por fricción; este calor se disipa rápidamente con el aire circundante por medio del fenómeno de convección (transferencia de calor que se produce entre masas a diferente temperatura). Los factores ambientales también son determinantes para que la etapa de transferencia de calor se produzca, y debido a estos comportamientos el proceso de corrosión se acelera rápidamente. Además, cuando la temperatura alcanza valores elevados aparece el fenómeno por radiación, que también ayuda a disipar la energía en forma de calor almacenada en el disco.

En estudios recientes, se presentó un modelo explicativo de la situación del contacto entre un complejo de pastillas de freno orgánico y un disco de hierro fundido. En este modelo, las fibras metálicas u otros materiales duros en la almohadilla del material forman mesetas primarias estables o parches, que llevan a la parte principal de la carga (figura 1) (Wahlström, 2011):

De esto se pudo concluir que la dureza en las mesetas primaria y secundaria es aproximadamente la misma, y que la dureza del material de la matriz metálica es de aproximadamente 20 veces menor. Es decir, las mesetas más difíciles de proteger en el material de la matriz metálica se desgastan. En mediciones realizadas se encontró que las mesetas contacto normalmente pueden exhibir valores de dureza considerablemente más altos que la media dureza de la almohadilla compuesta (por ejemplo, en comparación 3.000 MPa con 200 MPa), esto se debe a que las mesetas están típicamente formadas por fibras de metal rodeadas por los constituyentes de la matriz metálica más suaves y compactados (Söderberg & Andersson, 2009).

Asimismo, con la disponibilidad actual de las herramientas de cálculo asistido por computador, tales como softwares comerciales para análisis mecánicos y térmicos, la simulación numérica es el método más adecuado y conveniente para analizar el comportamiento de los frenos de disco, ya sea durante su funcionamiento o bajo distintas

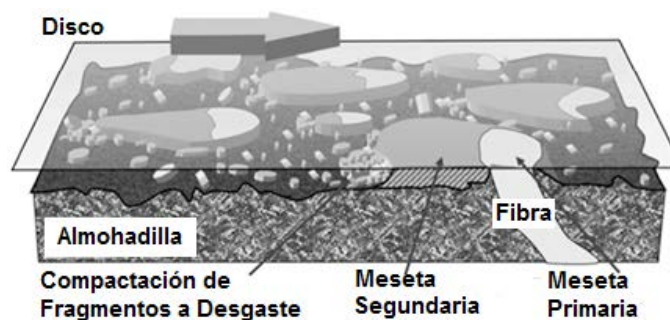


Figura 1. Ejemplo de la situación de contacto entre la pastilla y el disco.

Fuente: elaboración propia.

condiciones de trabajo; sin embargo, en cualquier nuevo diseño se pueden emplear las herramientas de cálculo asistido por computador, las cuales deben ser validadas o comprobadas con ensayos de laboratorios y cálculos matemáticos. Estos métodos de estudio, análisis numérico y experimental deben estar incorporados en cualquier metodología de diseño de frenos de disco, si se desea que esta sea realmente válida.

METODOLOGÍA

Con el fin de tener una visión más amplia del comportamiento de los frenos de disco, se seleccionaron tres (3) tipos de muestras de diferentes vehículos, de los cuales se escogieron modelos de aquellos que se encuentran sometidos a distintas capacidades de carga o de transporte: un automóvil particular de la Renault, una camioneta de la Toyota y un microbus de transporte urbano de la Mitsubishi. Se realizó el análisis físico-mecánico del material de fabricación de los discos de cada uno de ellos y sus propiedades térmicas (calor específico, conductividad térmica, coeficiente de dilatación térmica, entre otras), para poder compararlos con aquellos encontrados en la literatura. Se realizaron ensayos de microestructura del material, características estructurales (tracción, compresión y dureza), además de los análisis térmicos y estáticos de los discos, en donde se simuló la geometría y los efectos de su comportamiento con el apoyo de los softwares ANSYS y SolidWorks.

Debido a la alta conductividad térmica, la buena resistencia al desgaste, la facilidad de fabricación y relativamente su bajo costo, el disco de freno es fabricado generalmente de una fundición gris, desde las primeras etapas de desarrollo del vehículo, pero a pesar de estas propiedades favorables, el comportamiento de la corrosión de hierro fundido sigue siendo un problema ya que a menudo contribuye a una situación indeseable llamada *judder* del freno, es decir, la aparición de manchas (Kikuchi, Hara, Sakairi, Yonezawa, Yonezawa, & Takahashi, 2010).

Pocos estudios han examinado el tamaño, la forma o composición elemental con que los discos de freno se corroen tan rápidamente, fenómeno que depende de las condiciones a las cuales están enfrentados. Por tal motivo, se han desarrollado investigaciones sobre cómo la fricción genera fallas de corrosión y desgaste en los frenos, además del efecto en las propiedades mecánicas del material por las altas temperaturas que se producen (Ashby & Jones, 2000).

Asimismo, se realizaron varios proyectos para investigar una alternativa, cómo materiales más ligeros podrían mejorar la eficacia del frenado al tiempo que contribuye a la eficiencia energética. Estos materiales de compuestos cerámicos incluidos y los materiales de carbono y grafito han encontrado un uso limitado (Blau, 2010).

Para implementar un nuevo material en la fabricación de discos de frenos, el coeficiente de fricción debe ser relativamente alto, pero lo más importante es que sea estable, independientemente de la temperatura, la humedad, el tiempo de uso, el grado de desgaste, la corrosión, la presencia de polvo y chorros de agua desde la carretera, etc. Además de estas propiedades, se deben tener en cuenta los requisitos para una larga vida y un alto confort, es decir, ausencia de vibración, ruido y chirrido (Blau, Jolly, Peter, & Blue, 2007).

Durante frenadas normales, relativamente suaves, la fuerza de presión de la almohadilla contra el disco es de aproximadamente 5 KiloNewton (KN), lo cual resulta en un valor nominal de presión en la superficie de la almohadilla justo por encima de 1,2 MPa. En extremas situaciones, la presión podría ser aproximadamente de 10 MPa. Durante frenadas bruscas, la disipación de potencia en una pastilla de freno fácilmente excede de 30 kW. Estas altas densidades de energía dan como resultado muy altas temperaturas de la superficie y por lo tanto ponen exigencias especiales en los materiales de fricción (Eriksson, Bergman, & Jacobson, 2002).

Todas estas observaciones son parte de un proyecto sobre la generación del chirrido de los frenos. Como el chirrido por lo general se produce a bajas

velocidades y a presiones moderadas, el freno se ha diseñado con un equipo de prueba destinado principalmente para esta aplicación. Esto significa que los frenos solo han estado expuestos al frenado en condiciones de velocidades relativamente bajas (0-25 km/h); estas pruebas son realizadas en el laboratorio con la humedad ambiente y temperatura casi constante (20-25 °C). En el transporte de mayores cargas en los vehículos se verán influenciados los componentes resistentes al desgaste en el coeficiente de fricción que se genera por su fracción de volumen. Por lo tanto, a pesar de los materiales que componen la estructura del disco de freno y de la pastilla se origina un desgaste en la mayor parte del volumen del revestimiento, esta situación se produce por el contacto metal – metal que existe entre los dos componentes (Jacobson, 2007).

Las altas temperaturas en la superficie del disco de freno, junto con el contacto deslizante directo de la guarnición de freno con el rotor, son responsables de las reacciones mecánicas y químicas, en este caso las reacciones triboquímicas que se producen durante el frenado. Debido a la compleja composición de las pastillas de freno, es difícil describir todas las reacciones triboquímicas en detalle. Un fenómeno típico que ocurre a menores temperaturas es una degradación de la resina fenólica. Otras reacciones reportadas como triboquímicas comprenden la oxidación de los componentes metálicos, por ejemplo hierro o cobre (Matějka & Vlastimil, 2011).

Respecto a estudios de análisis numérico, se tomó como referencia un número considerable de discos de freno de los vehículos de extinción de incendios utilizados en el apoyo a las actividades aeronáuticas, a los cuales le fueron encontrados grietas mediante softwares especializados. La macrofractografía de los discos fabricados en hierro de fundición gris reveló que tenían varias grietas a lo largo del radio de las superficies de la pista del disco con una longitud aproximadamente en el rango de 1-7,5 cm. Además, mediante un análisis en microscopio óptico y de emisión de campo en un microscopio electrónico de barrido (MEB)

se encontró que las grietas se propagaron en forma semielíptica a través del espesor de las superficies de fricción de acuerdo con un mecanismo de fatiga térmica. También se observaron zonas que mostraron signos definidos de calefacción por el efecto *judder*. El análisis de elementos finitos (FEA) se llevó a cabo para determinar el perfil de temperaturas en el disco, así como para estimar la distribución de tensiones durante el frenado. También se confirmó que las temperaturas relativamente altas alcanzadas durante las acciones de frenado, se atribuyen a la tensión de tracción residual que son ocasionadas por la repetición de la tensión térmica en ciclos, produciendo la aparición de las grietas en la superficie de contacto del disco (Bulthé & Lise, 2008).

El análisis de elementos finitos (FEA) sirve para determinar el perfil de temperatura y además estimar el Von Mises. Hay resultados que muestran que las grietas son producidas por la fatiga térmica durante las etapas de calentamiento y enfriamiento de las acciones de frenado. En particular, debido al gradiente térmico producido a través del grosor del rotor; la tensión de tracción residual se produce durante el enfriamiento que se genera en el proceso de transferencia de calor por conducción. Posteriormente el FEA ha demostrado que tal tensión se localiza principalmente en la dirección radial de la superficie de fricción en el borde de los orificios de refrigeración (Bagnoli, Dolce, & Bernabei, 2009).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados obtenidos mediante los cálculos realizados a los parámetros críticos, en la medida en que estos son indispensables para la construcción y el buen funcionamiento de los frenos. Para tener un análisis claro mediante cálculos matemáticos es necesario conocer datos técnicos del vehículo, tales como: la masa del vehículo, distribución de pesos por eje, velocidad promedio, radio dinámico de la rueda, etc. De modo que los resultados numéricos puedan ser comparados con los obtenidos experimentalmente.

Los cálculos que se tienen en cuenta en el desarrollo del proyecto se basan en el análisis de transferencia de calor por convección y máquinas hidráulicas debido a los ductos de ventilación presentes en la geometría.

Como se mencionó anteriormente, se tuvo en cuenta la geometría de tres diferentes tipos de frenos de disco con los datos iniciales mostrados en la tabla 1.

Tabla 1: Datos iniciales para la realización de los cálculos

| DISCO | D.1 | D.2 | D.3 |
|------------------------|------|------|------|
| Masa del vehículo (Kg) | 1250 | 1950 | 2250 |
| Masa del disco (Kg) | 3,80 | 4,25 | 6,10 |

Fuente: elaboración propia.

Asimismo, a partir de estos datos se calcularon variables como la fuerza de frenado, la resistencia a la rodadura, el coeficiente de adherencia a la calzada, la fuerza de frenado en el pedal, el tiempo de frenado, la deceleración de frenado, la velocidad periférica, la energía disipada por el disco, la potencia disipada por el sistema de frenos, todo esto con el fin de calcular las temperaturas de contacto en las superficies de contacto de los discos, tomando como referencia el Enfriamiento de Newton, que es un concepto de transferencia de calor, el cual especifica que un objeto sometido a una temperatura T_1 , se enfriará si se deja a temperatura ambiente T_∞ de acuerdo con la ecuación (1) exponencial (Kim & Dae, 2008).

$$T_i - T_\infty = (T_1 - T_\infty) * e^{-\frac{A*U}{m*C_p}*t} \quad (1)$$

Donde,

T_i = Temperatura instantánea (°C).

T_∞ = Temperatura ambiente (°C).

A = Área de transferencia de calor (m²).

U = Coeficiente de transmisión térmica.

m = Masa del disco de freno (Kg).

C_p = Calor específico del material (J/Kg*°C).

t = Tiempo de enfriamiento de Newton (s).

Se determinó que los discos de freno, luego de haber sido sometidos según los cálculos a unas temperaturas de 82, 107 y 90 °C, respectivamente, en una frenada, tomarán una temperatura ambiente de 20°C entre 40 a 60 minutos, siempre y cuando el enfriamiento se dé por convección natural, es decir, que el aire en el ambiente debe tener una velocidad igual a cero.

También se calculó la velocidad de pérdida de calor total frontal del disco, a partir de los diferentes tipos de convección que afectan al disco, como son: periférica y en la campana, mediante la siguiente ecuación (2).

$$Q_{Total} = Q_{Periférica} + Q_{Campana} \quad (2)$$

De la cual se sabe que en la ecuación (3):

$$Q = h * A_s * (T_s - T_\infty) \quad (3)$$

Donde,

\dot{Q} = Velocidad de pérdida de calor (W).

h = Coeficiente de convección (W/m²*°C).

A_s = Área superficial del disco de freno (m²).

T_s = Temperatura superficial (°C).

T_∞ = Temperatura ambiente (°C).

Además se tuvieron en cuenta los diferentes tipos de convección que están presentes en el disco, como la convección lateral, la producida por el efecto rotatorio y la generada en el interior de los ductos de ventilación.

Para nuestros propósitos de análisis numérico de los discos de freno, no existe un software que realice las resoluciones conjuntas de los problemas físico-mecánicos y termo-mecánicos no lineales (cálculos acoplados). Esto hizo que se plantearan varias fases en la metodología propuesta y se utilizaran los Software ANSYS y SolidWorks para distintas disciplinas, y de esta manera encontrar los resultados analíticos del modelo termo-mecánico por FEM.

Durante la puesta a punto de la metodología, la comparación de resultados entre la simulación y la experimentación de los ensayos de laboratorio

fue un objetivo importante. Es fundamental contar con los equipos adecuados para medir las variables y así poder definir las en los análisis numéricos (Criado, 2012).

Para comprobar y analizar los resultados se realizó la correcta geometría de los tres discos de freno, que fueron diseñados en el software SolidWorks, para efectos de la ejecución de la simulación (figuras 2, 3 y 4).

En el caso de las propiedades estructurales, el esfuerzo de tensión es mínimo, como por ejemplo en la compresión: la resistencia a compresión de las fundiciones grises es alta: 3 o 4 veces superior a la resistencia a la tracción. Este comportamiento se debe a que, en compresión, apenas influye el efecto de entalla del grafito y, por tanto,

la contribución negativa de este se reduce simplemente a disminuir la sección eficaz del constituyente matriz metálica.

Por tal razón fue necesario calcular el esfuerzo de tensión, los límites elásticos y la resistencia de los materiales a la plasto-deformación y la fatiga, que son extremadamente importantes en ingeniería, además del límite de elasticidad, el límite de fluencia y el límite de resistencia.

En el caso de las probetas de compresión, los extremos deben ser planos para que no causen concentraciones de esfuerzos, y deben ser perpendiculares al eje de la pieza para que no causen flexión debida a carga excéntrica, como se muestra en las figuras 5 y 6.

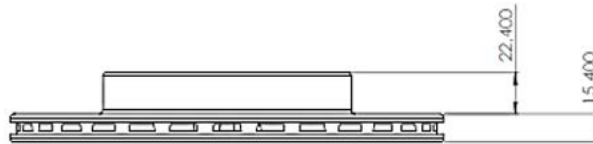


Figura 2. Muestra del disco de freno 1 para el análisis de los resultados.

Fuente: elaboración propia.

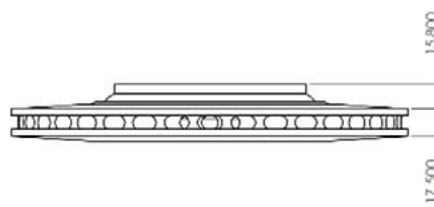


Figura 3. Muestra del disco de freno 2 para el análisis de los resultados.

Fuente: elaboración propia.



Figura 4. Muestra del disco de freno 3 para el análisis de los resultados.

Fuente: elaboración propia.

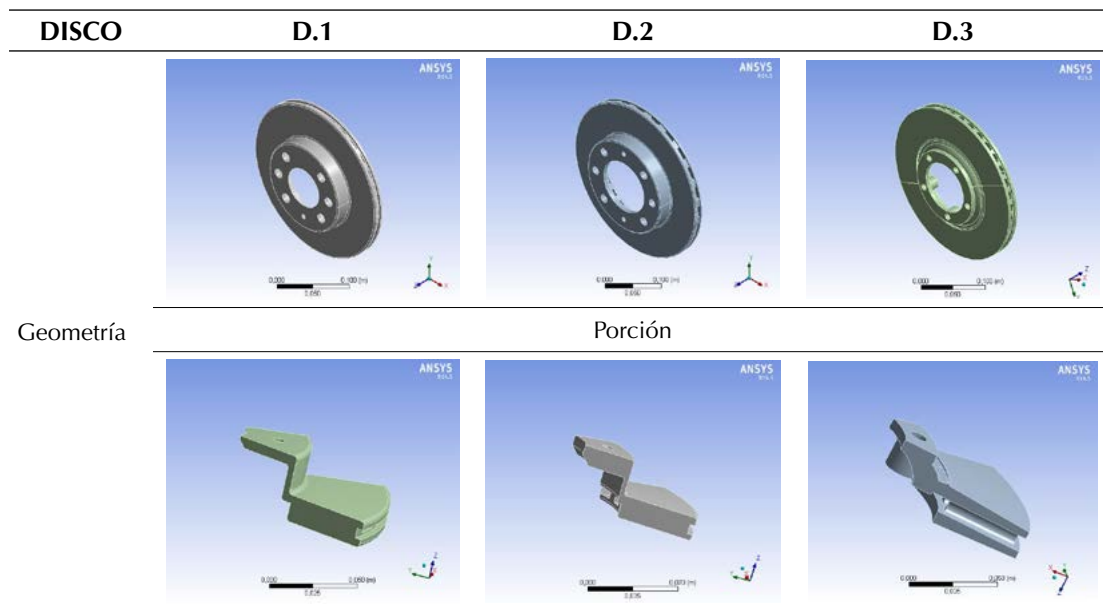


Figura 5. Geometría de los discos realizados en el software SolidWorks.

Fuente: elaboración propia.

El ensayo de compresión se realizó con esta geometría debido a que la norma ASTM E9 especifica el tamaño mínimo para las probetas.

En la figura 7 se puede observar que las deformaciones más grandes se presentan en los extremos de los discos y que son milimétricas a causa del desgaste generado por el área de contacto con las pastillas del sistema de frenado, por lo cual se producen altas temperaturas, desgaste y aceleración del proceso de corrosión.

Asimismo, también se realizó el ensayo de dureza para determinar qué características de maquinabilidad tenía el material y de esta forma comprobar y evaluar las condiciones de compresión a las cuales es sometido este tipo de frenos. Se obtuvieron los siguientes resultados (tabla 2):

Tabla 2. Ensayo de dureza y sus resultados promedios

| DISCO | D.1 | D.2 | D.3 |
|--------------------|------|------|------|
| Valor Promedio HRB | 84,7 | 80,2 | 82,0 |
| Valor HB | 164 | 151 | 156 |

Fuente: elaboración propia.

En el caso de la fundición gris para este tipo de frenos se determinó que poseen una dureza de entre 140 y 250 Brinell, lo cual significa, según la bibliografía, que este tipo de material puede mecanizar fácilmente.

El análisis metalográfico fue realizado con el objetivo de obtener las características principales de las fundiciones grises, en lo que respecta a la microestructura y morfología del material, ya sea la de los grafitos o de las fases presentes (ferrita y perlita), y de los grafitos, ya sea el tamaño, el tipo, las fases o su distribución, como se pueden observar en la figura 8.

Por otra parte, la caracterización de los elementos presentes en la composición química de este tipo de frenos de disco tuvo el objetivo de conocer el efecto de los elementos de la aleación de manganeso, silicio, cromo y demás componentes de la matriz metálica que influyen en la microestructura del material (Sanz Pero, 2000).

Asimismo, se utilizó la bibliografía específica para las propiedades estructurales de los hierros de fundición gris y se comparó con los resultados

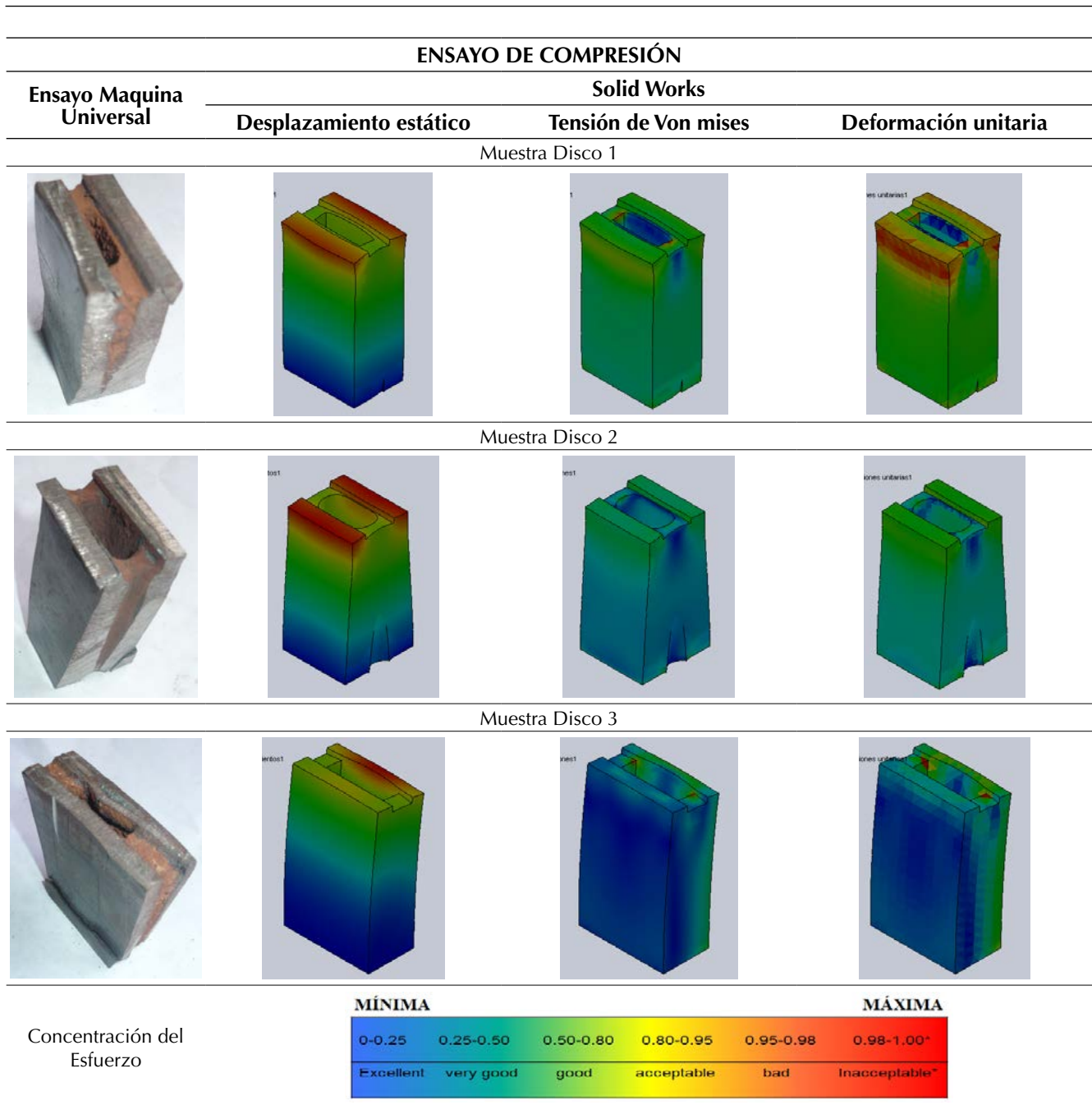


Figura 6. Ensayo de compresión y sus resultados analizados en el software SolidWorks.

Fuente: elaboración propia.

obtenidos en el microscopio, en donde las imágenes obtenidas sí coincidían con las características físicas de una fundición gris.

Finalmente se realizó el análisis termo-mecánico con el propósito de predecir las temperaturas, los correspondientes esfuerzos y deformaciones de

origen térmico en el disco de freno. Como resultado de este análisis se encontró que el calor generado por fricción entre las pastillas del freno y el disco se distribuye uniformemente sobre todo el área exterior de las pistas del freno de disco, por lo anterior el flujo de entrada de calor Q , se calcula a partir de la

velocidad de rotación y de la fuerza de fricción, para unas condiciones particulares de funcionamiento.

Además, como para este análisis térmico es necesario tomar un punto de partida, determinamos la energía y potencia disipada en el proceso de frenados como primer paso, calculados con las ecuaciones (1), (2) y (3).

Mediante la realización del análisis térmico a los tres discos de frenos se pudo observar con una visión más amplia el comportamiento de la distribución de la temperatura, el flujo de calor y la dirección del flujo de los discos en toda su geometría, lo que es de gran interés para la investigación.

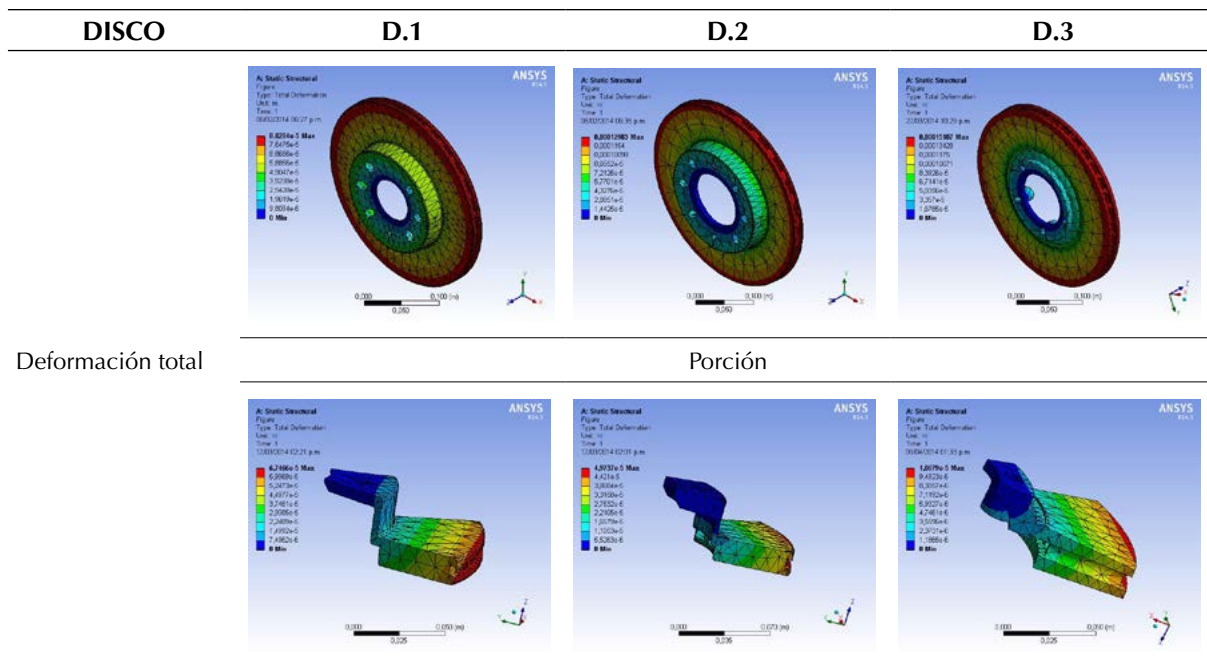


Figura 7. Deformaciones totales analizadas en el software ANSYS.

Fuente: elaboración propia.

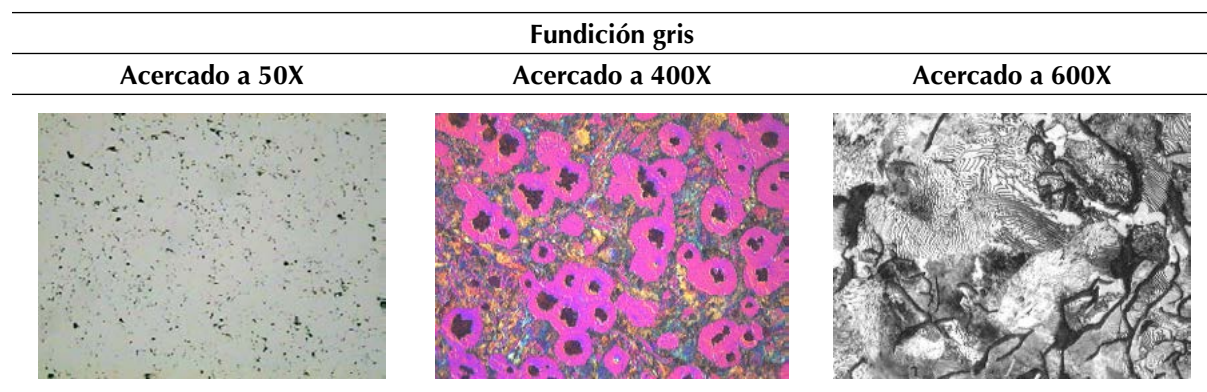
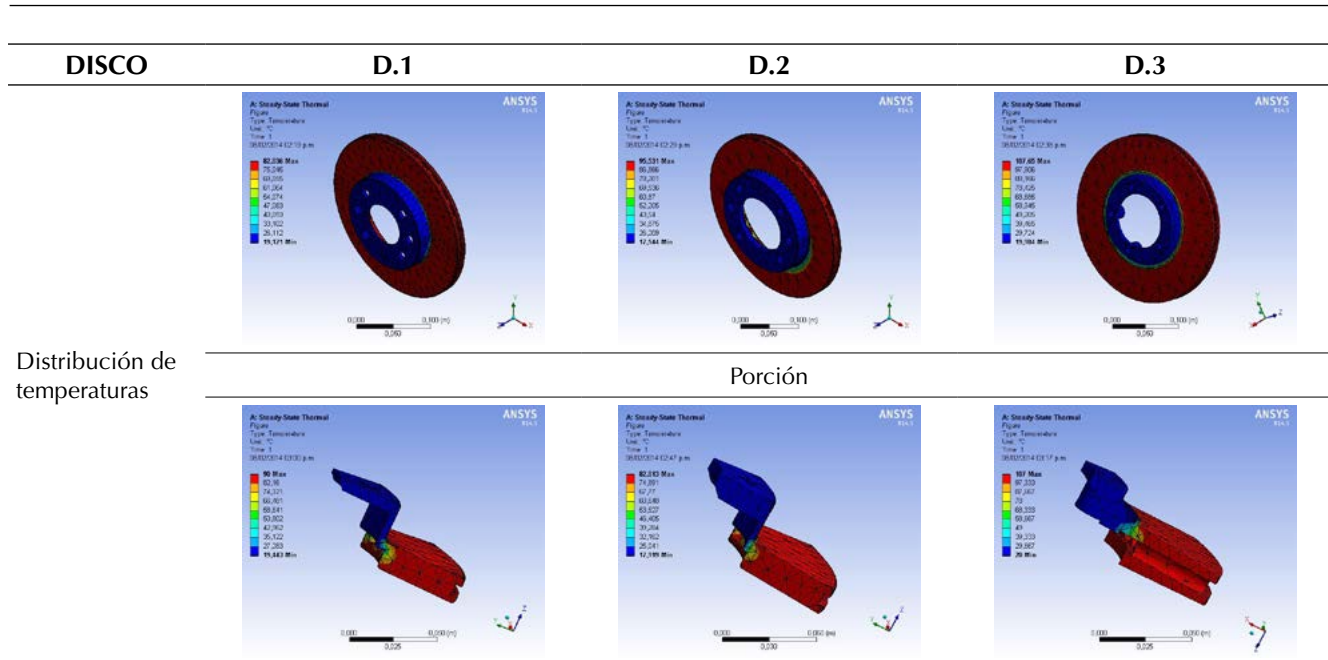


Figura 8. Imágenes de las muestras en el microscopio.

Fuente: elaboración propia



La aceleración del proceso de corrosión en los frenos de disco es influido específicamente por los cambios térmicos a los cuales está expuesto el disco por la acción de la fricción entre las pastillas, la interacción con el medio al cual se encuentra expuesto, la utilización de un líquido para frenos con características inadecuadas, además de la falta de mantenimiento de los componentes del sistema de frenado, lo cual conduce a que las propiedades físico-mecánicas y estructurales del disco resulten afectadas.

FINANCIACIÓN

El proyecto se desarrolló con recursos propios, con un estimado aproximado de \$845.000 pesos moneda corriente, en lo que concierne a gastos en préstamo de equipos de laboratorios y compra de materiales, además de otros gastos derivados del desarrollo del proyecto.

REFERENCIAS

- Ashby, M., & Jones, D. (2000). *Engineering Materials*. Boston: Heinemann.
- Bagnoli, F., Dolce, F., & Bernabei, M. (2009). Thermal fatigue cracks of the fighting vehicles gray iron brake discs. *Engineering Failure Analysis*, 16 (1), 152-163.
- Blau, P. (2010). Compositions, functions, and testing of friction brake materials and their additives. *Oak Ridge National Laboratory Technical Report ORNL/TM*, 64, 24-27.
- Blau, P., Jolly, B., Peter, W., & Blue, C. (2007). Tribological investigation of titanium-based materials for brakes. *Science*, 263 (7), 1202-1211.
- Bulthé, J. C., & Lise, A. (2008). Mechanical and chemical investigation of the temperature influence on the tribological mechanisms occurring in OMC/cast iron friction contact. *Science*, 264 (9), 815-825.
- Criado, E. (2012). *Diseño y cálculo del sistema de frenado para un prototipo formula student*. Leganes, España: Universidad Carlos III de Madrid.
- Eriksson, M., Bergman, F., & Jacobson, S. (2002). On the nature of tribological contact in automotive brakes. *Science*, 252 (1), 26-36.
- Jacobson, R. (2007). Applications of a new model for the abrasive wear resistance of multiphase materials. *Composites and Coated Materials*, 174, 1459-1463.
- Kikuchi, T., Hara, Y., Sakairi, M., Yonezawa, T., Yonezawa, A., & Takahashi, H. (2010). Corrosion of Al-Sn-Bi alloys in alcohol at high temperatures. Part I: Effects of the metallurgical structure of the alloys and the metal salt additions to alcohol. *Corrosion Science*, 52 (4), 1482-1491.
- Kim, & Dae, J. (2008). Thermal stress analysis for a disk brake of railway vehicles with consideration of the pressure distribution on a frictional surface. *Materials Science and Engineering*, 483, 456-459.
- Matějka, & Vlastimil. (2011). Possible stibnite transformation at the friction surface of the semi-metallic friction composites designed for car brake linings. *Applied Surface Science*, 258 (5), 1862-1868.
- Piña, M. (2008). *Estudio de la influencia de la morfología gráfica sobre las propiedades mecánicas de los discos de freno automotrices*. México: Instituto Politécnico Nacional.
- Roadhouse. (2006). *Manual técnico de la pastilla de freno (Discos de frenos)*. España: Road.
- Sanz Pero, J. (2000). ACEROS. En *Metalurgia Física Selección y diseño* (págs. 159-161). Madrid, España: CIE Dossat.
- Söderberg, A., & Andersson, S. (2009). Simulation of wear and contact pressure distribution at the pad-to-rotor interface in a disc brake using general purpose finite element analysis software. *Science Direct*, 267 (12), 2243-2251.
- Wahlström, J. (2011). A study of airborne wear particles from automotive disc brakes. *The Royal Institute of Technology*, 11, 1040-1179.





Efectos de la radiación electromagnética sobre la germinación del maíz

Electromagnetic radiation effects on germination of corn

Alexander Armesto Arenas*, Wilson Angarita**, Ramón Lobo Jácome***

Fecha de recepción: 12 de octubre de 2014

Fecha de aceptación: 6 de abril de 2015

Como citar: Armesto Arenas, A., Angarita, W., & Lobo Jácome, R. (2015). Efectos de la radiación electromagnética sobre la germinación del maíz. *Revista Tecnura*, 19(45), 65-73. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.3.a05

RESUMEN

En este artículo se evaluó el efecto de radiaciones electromagnéticas sobre la germinación del maíz *Zea mays*, semilla normalmente cultivada en el municipio de Ocaña, Norte de Santander, Colombia, y cuyo nombre vulgar está descrito como maíz pullita. Se hicieron tres tratamientos, uno con frecuencias de 945 MHz (Megahertz), otros de 440 MHz y la testigo, cada una de estas con tres repeticiones. Dichas emisiones de onda se hicieron con antenas de media onda, situadas a una distancia de 37 centímetros del sustrato donde fueron sembradas las semillas. La radiación electromagnética fue emitida las 24 horas del día, durante ocho días, y los resultados mostraron diferencias estadísticas significativas: a los ocho días se observó un porcentaje de germinación de 92%, 80% y 50%, y a los 15 días de 98, 95 y 84%, para los tratamientos con emisiones de onda de 945 MHz, 440 MHz y las testigos, respectivamente. En este mismo orden se observó un bajo porcentaje de cenizas en comparación con las testigos, con unos resultados de 12,69, 16,17 y 18,45%. Con respecto a la altura, se en los primeros días se encontró una ganancia de longitud para las plantas sometidas a

la más alta frecuencia, seguido de las más baja frecuencia y la testigo. Finalmente, en el último día se notó una mayor altura para las de menor frecuencia, seguido de la más alta frecuencia y la testigo.

Palabras clave: electromagnetismo, frecuencia, germinación, *Zea mays*.

ABSTRACT

This work evaluated the electromagnetic effects on germination of corn *Zea mays*, seed usually cultivated in the municipality of Ocaña (North Santander, Colombia), whose common name is described as pullita corn. Three treatments were carried, one with 945 MHz (Megahertz frequencies), other with 440 MHz and a witness one, all of them with three repetitions. Such wave emissions were made with half wave antennas, located at a distance of 37 cm from the substrate to which the seeds were planted. The electromagnetic radiation emitted was 24 hours a day, for 8 days and the results showed statistically significant differences; observing after those eight days a germination rate of 92%, 80% and 50%, and past 15 days 98%, 95% and 84%, for treatments with wave emissions of 945 MHz, 440 MHz and the

* Ingeniero ambiental, candidato a magister en Ingeniería Ambiental, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Ocaña, Colombia. Contacto: aarmestoa@ufpso.edu.co

** Ingeniero ambiental. Decano de la Facultad de Ciencias Agrarias y del Ambiente, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Ocaña, Colombia. Contacto: wangarita@ufpso.edu.co

*** Ingeniero químico. Docente de la Facultad de Ciencias Agrarias y del Ambiente, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Ocaña, Colombia. Contacto: rjloboj@ufpso.edu.co

witness ones, respectively. Likewise, low percentage of ash was observed in comparison to witnesses, having results of 12,69%, 16,17% and 18,45%. In terms of height, it was observed in the early days, a gain in length for plants subjected to the highest frequencies, followed by the lowest frequency and

the witness. For the last day a greater height was noted for lower frequency, followed by the highest frequency and the witness.

Keywords: electromagnetism, frequency, germination, *Zea mays*.

INTRODUCCIÓN

La latencia de las semillas tiene su causa en factores externos, ambientales (agua, luz, temperatura, etc.) o en factores internos, propios de ellas (testa dura o impermeable, embrión inmaduro, etc.). Este período puede prolongarse artificialmente, negando a las semillas las condiciones para su germinación. (Ramírez, Romero, & Henríquez, 1980). Sin embargo, aun en las mejores condiciones de almacenamiento, las semillas sufren una progresiva pérdida de viabilidad, lo cual obliga a realizar controles periódicos para proceder a la regeneración de las muestras si la germinación es menor al 80-85% (Cardoso Almeida, Pita Villamil, & Gomes de Gouveia, 2000). La energía electromagnética actúa sobre la materia e interrelaciona con los organismos biológicos, en cada etapa de desarrollo desde la germinación, y por ello puede ser una técnica de bajo costo para mejorar la calidad de la semilla. En esta investigación se evaluó el efecto de la irradiación electromagnética sobre la calidad fisiológica de la semilla de maíz *Zea mays L*, del híbrido experimental 'CL-11 x CL-12', con un campo electromagnético de baja frecuencia. Se compararon doce tratamientos de campos magnéticos, con intensidades de 160 y 560 mT (militeslas) y siete tiempos de exposición (t) de 0, 30, 60, 120, 240, 360 y 480 min, en un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Hubo diferencias estadísticas significativas en la velocidad de emergencia y porcentaje de establecimiento de plántulas al cuarto día, y al día 17 en el peso seco. Se detectó bioestimulación positiva con exposición de 30 y 60 min a una intensidad de 560 y 160 mT

(dosis de 705,6 y 27,42 K J m⁻³ s⁻¹, respectivamente). Con la dosis de 705,6 K J m⁻³ s⁻¹ hubo un incremento significativo de 69,2% en comparación con el testigo en velocidad de emergencia, de 90,5% en establecimiento de plántulas y de 36,6% en peso seco (Domínguez Pacheco, et al., 2010).

Otros estudios demuestran que la irradiación de semillas con láseres de baja intensidad dan lugar a incremento en la biomasa de las plantas (Stoyanova & Ivanova, 2000). Un estudio sobre los efectos que la acción de un campo magnético artificial estacionario tiene sobre la germinación de semillas de guisante ha determinado y cuantificado el posible aumento en la velocidad germinativa de semillas de guisante sometidas a la acción de un campo magnético estacionario de 125 mT y 250 mT durante diferentes tiempos de exposición (1 minuto, 10 minutos, 20 minutos, 1 hora, 24 horas y exposición crónica). Los parámetros utilizados han sido: porcentaje de semillas germinadas (Gmáx), tiempo medio de germinación (TMG) y tiempo necesario para que germine el 1, 10, 25, 50, 75 y 90% de las semillas utilizadas en cada tratamiento (T1, T10, T25, T50, T75 y T90). Del análisis de los datos se puede concluir que la velocidad de germinación de las semillas >sometidas a la acción del campo magnético es mayor que la de las semillas no tratadas (García Rebollar & Pérez Cabal, 2008). En la India se realizó un experimento para determinar el efecto de la baja dosis de radiación gamma sobre la germinación, el crecimiento, el nitrógeno y la fijación de carbono del cacahuete, en los resultados se encontró que la germinación de semillas se aumentó en un 10-25% a las dosis más bajas de hasta 5 Gy, mientras que la mejora en vigor de la planta en el

mismo intervalo de dosis fue mucho más alta (22-84%) que las plantas no irradiadas (Singhal, Venu, Ahuja, Singh, & Kumar Gupta, 2014). La exposición a campos electromagnéticos de 445 MHz y diferentes intensidades de campo en el frijol mungo *Vigna radiata L.* e *Ipomoea aquatica Ipomoea aquatica forsk.* En las etapas de crecimiento muestran mejoras en la germinación (Prakob, Jinapang, Wongwattananard, Islam, & Kirawanich, 2010). Semillas de garbanzo *Cicer arietinum L.* fueron expuestas en lotes a los campos magnéticos estáticos de fuerza de 0 a 250 mT en pasos de 50 mT durante 1-4 h en pasos de 1 h para todos los campos. Los resultados mostraron que la aplicación del campo magnético aumenta el rendimiento de semillas en términos de la germinación de laboratorio, velocidad de germinación, longitud de las plántulas y el peso seco de plántulas significativamente en comparación con el control no expuesto (Vashistha & Nagarajan, 2008). Plantas de tomate *Lycopersicon esculentum Mill VFN8* expuestas a campos electromagnéticos de 900 MHz, 5 V m⁻¹ durante un período corto (10 min) muestra que poco después de la exposición, las plantas perciben la radiación como un estímulo nocivo (Roux, et al., 2008). Semillas de girasol sometidas a un campo magnético estacionario de 125 mT y 250 mT tienen un aumento en la velocidad de germinación, que se pone de manifiesto en una reducción del tiempo requerido para que germine un determinado porcentaje de semillas; este efecto es más pronunciado cuando el tratamiento se realiza de forma crónica (dosis D6 y D12) (Carbonell Padrino, Martínez Ramírez, Flórez García, & Amaya García de la Escosura, 2005).

Hoy en día se debe reconocer que las empresas agrícolas, en su afán de obtener producciones de una manera más limpia y rápida, están al tanto de cualquier avance tecnológico para favorecerse en tal problemática. Pues bien, uno de esos tantos inconvenientes de siembra y obtención de cosechas es lograr una rápida germinación sin tener ningún efecto en los procesos metabólicos de la planta. Así, aprovechando la energía electromagnética como opción, el objetivo de este trabajo

consistió en acelerar la germinación de las plantas de maíz *Zea mays* por medio de ondas electromagnéticas de entre 945 MHz y 440 MHz, con potencia de cinco watts (5w), emitidas por antenas de media onda, teniendo en cuenta de forma hipotética que las ondas electromagnéticas aceleran la emergencia o germinación de las plantas y que en su efecto dicho campo electromagnético de mayor frecuencia tiene mejor influencia en su respectivo desarrollo. Todo esto con el fin de buscar nuevas alternativas de producción agrícola sustentable y sostenible en pro de un ambiente sano.

METODOLOGÍA

El ensayo fue hecho en el vivero de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña en Norte de Santander, Colombia. Se utilizaron 100 semillas de maíz *Zea mays* por réplica, con un porcentaje de germinación promedio del 85% y con una masa promedio de 34 gramos, homogeneizadas por tamaño y escogidas al azar, con un total de 900 unidades. En su siembra se utilizó sustrato a base de arena y semilleros de plástico, ubicados dentro de jaulas de mallas metálicas a 35 cm de la antena.

Para la respectiva radiación electromagnética se utilizaron dos circuitos transmisores de 5w de potencia y dos antenas de media onda con diferente frecuencia (tabla 1).

Tabla 1. Descripción de la radiación de las antenas

| f MHz | I w/m ² | Campo magnético A/m |
|----------|------------------------|-------------------------|
| 945 | 7,5 x 10 ⁻³ | 4,46 x 10 ⁻³ |
| 440 | 7,1 x 10 ⁻³ | 4,33 x 10 ⁻³ |

Amperio/metro (A/m); Intensidad (I);

Fuente: elaboración propia.

La intensidad y el campo magnético promedio fueron medidos a 35 centímetros de distancia desde la fuente.

A partir de la siembra los cultivos empezaron a ser irradiados, durante ocho días las 24 horas del día.

La temperatura promedio del sitio de prueba fue de 21 °C, con una temperatura máxima de 27 °C y una mínima de 17 °C. Dicho experimento fue realizado a cielo abierto y el monitoreo de intensidad de potencia en el respectivo sitio, teniendo en cuenta las diferentes bandas de alta frecuencia, fue de $7,5 \times 10^{-4}$ microwatts/cm² ($\mu\text{w}/\text{cm}^2$).

Todas las mediciones se hicieron con un analizador de espectro de alta frecuencia (1MHz – 9,5 GHz) Marca Spectran 60105 – Aaronia.

El diseño experimental que se utilizó fue completamente al azar (DCA) con tres tratamientos: uno con emisiones de onda de 945 MHz, otro con 440 MHz y un último sin ningún tipo de radiación electromagnética. Para cada una de estas pruebas se hicieron tres repeticiones.

Para los análisis del comportamiento de las variables (tabla 2) se utilizó el programa Minitab 15. Este es un programa de computadora diseñado para ejecutar funciones estadísticas básicas y avanzadas. Combina el uso de Microsoft Excel con la capacidad de ejecución de análisis estadísticos.

Tabla 2. Variables dependientes e independientes

| Variable dependiente | Variable independiente |
|-----------------------|---------------------------------|
| Germinación | Tiempo(días) |
| Altura de las plantas | Frecuencia (MHz) |
| Color | Intensidad (w/cm ²) |
| Cenizas | Campo magnético (T) |

Fuente: elaboración propia.

RESULTADOS

Con respecto a los resultados se observa que hay mayor porcentaje de germinación en las plantas que presentan mayor frecuencia de radiación (tabla 3).

Tabla 3. Porcentaje de germinación por tratamiento y total de plantas germinadas. Día 8

| Tratamiento | Repeticiones (r) | | | Promedio | TOTAL |
|-------------|------------------|----|----|----------|-------|
| | r1 | r2 | r3 | | |
| 945 | 89 | 98 | 88 | 92 | 275 |
| 440 | 83 | 76 | 80 | 80 | 239 |
| 000 | 53 | 54 | 43 | 50 | 150 |
| | TOTAL | | | | 664 |

Fuente: elaboración propia.

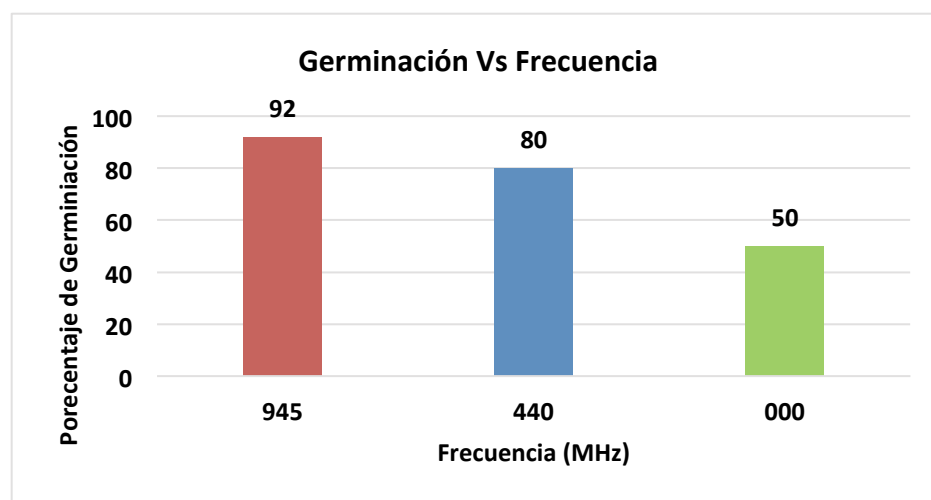


Figura 1. Porcentaje de germinación vs frecuencia. Día 8

Fuente: elaboración propia.

El tratamiento 945 MHz supera en 12 y 42% de germinación al tratamiento 440 y 000 MHz (figura 1), y el tratamiento 440 MHz supera en 30% de germinación al tratamiento 000 MHz.

En estos resultados se muestran diferencias significativas entre los tratamientos (tabla 4): las semillas sometidas a radiaciones electromagnéticas de 945 MHz lograron mayor germinación en comparación con las sometidas a 440 MHz y las testigos, de igual forma las semillas sometidas a frecuencia más baja estaban por encima de las pruebas que no fueron sometidas a radiación (testigo).

Tabla 4. Análisis de varianza (Germinación día 8)

| Factor | Tipo | Niveles | Valores | | |
|---|-----------|---------|-------------|-------|-------|
| Tratamiento | aleatorio | 3 | 0. 440. 945 | | |
| Análisis de varianza | | | | | |
| Fuente | Gl | Sc | Cm | (F) | (P) |
| Tratamiento | 2 | 2760,2 | 1380,1 | 51,97 | 0,000 |
| Error | 6 | 159,3 | 26,6 | | |
| Total | 8 | 2919,6 | | | |
| Varianza (S) = 5,15321, Coeficiente de determinación (R ²) = 94,54%, R ² (ajustado) = 92,72% | | | | | |
| Distribución = F Significancia = (P) Cuadrados medios = Cm, Suma de cuadrados = Sc Grados de libertad = Gl | | | | | |

Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta que a partir del día ocho las plantas dejaron de ser irradiadas, el día quince (tabla 5) se volvió a hacer un análisis de germinación y se encontró que las plantas sometidas a mayor frecuencia tuvieron mayor porcentaje de germinación.

Tabla 5. Porcentaje de germinación por tratamiento y total de plantas germinadas. Día 15

| Tratamiento | Repeticiones | | | Promedio | TOTAL |
|-------------|--------------|----|----|----------|-------|
| | r1 | r2 | r3 | | |
| 945 | 98 | 98 | 99 | 98 | 295 |
| 440 | 98 | 95 | 93 | 95 | 286 |
| 000 | 87 | 83 | 81 | 84 | 251 |
| TOTAL | | | | | 832 |

Fuente: elaboración propia

En este análisis se aprecian diferencias significativas en los respectivos tratamientos (tabla 6), pues el porcentaje alto de germinación se mantiene en las semillas sometidas a la más alta frecuencia, seguido de la prueba a baja frecuencia y la testigo.

Tabla 6. Análisis de Varianza (Germinación día 15)

| Factor | Tipo | Niveles | Valores | | |
|---|-----------|---------|-------------|------|-------|
| Tratamiento | aleatorio | 3 | 0. 440. 945 | | |
| Análisis de varianza | | | | | |
| Fuente | Gl | Sc | Cm | F | P |
| Tratamiento | 2 | 360,22 | 180,11 | 33,7 | 0,001 |
| Error | 6 | 32 | 5,33 | | |
| Total | 8 | 392,22 | | | |
| S = 2,3094, R ² = 91,84%, R ² (ajustado) = 89,12% | | | | | |

Fuente: elaboración propia.

El tratamiento 945 MHz supera en 3% y 14% de germinación al tratamiento 440 y 000 MHz (figura 2). Y el tratamiento 440 MHz supera en 11% de germinación al tratamiento 000 MHz.

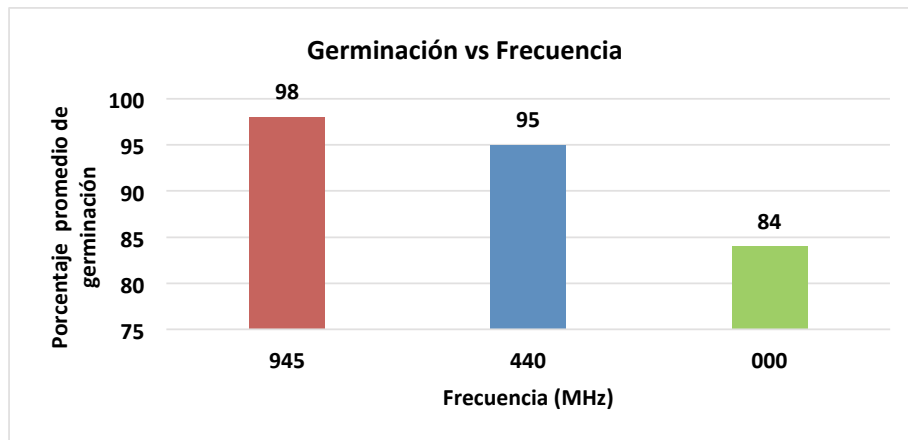


Figura 2. Porcentaje de germinación vs. frecuencia. Día 15

Fuente: elaboración Propia

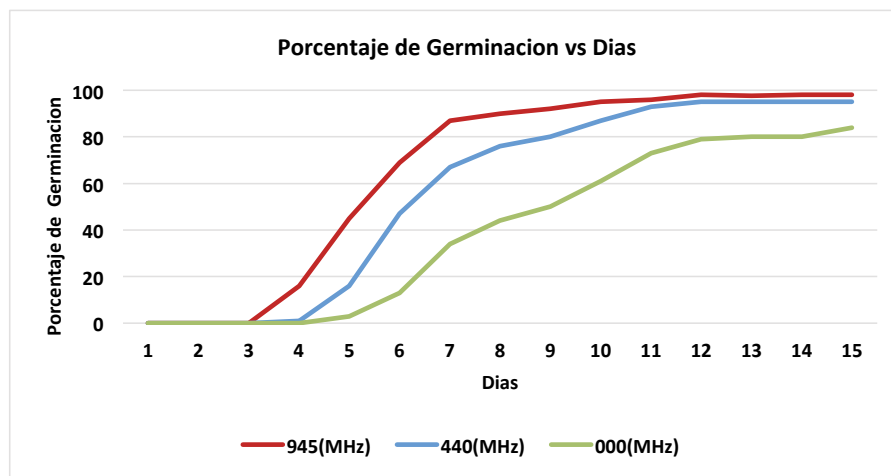


Figura 3. Porcentaje de germinación por día. Día 0 hasta día 15.

Fuente: elaboración propia.

Con respecto a la velocidad de la germinación, se observó que las plantas sometidas a 945 MHz comenzaron primero el proceso de germinación, seguidas de la que recibieron el tratamiento de 440 MHz y 000 MHz.

El tratamiento que presentó mayor porcentaje de plantas anormales fue el testigo (tabla 7), y el tratamiento que menos presentó estas características fue el de 440 MHz. Para determinar esto se tuvo en cuenta que las plantas anormales formaron parte del número de plantas que germinaron.

Tabla 7. Porcentaje de plantas anormales y que no terminaron su germinación

| Tratamiento | % Anormales | % No Germinaron |
|-------------|-------------|-----------------|
| 945 | 3 | 2 |
| 440 | 1 | 5 |
| 000 | 6 | 16 |

Fuente: Fuente: elaboración propia.

De lo anterior se puede observar que las semillas sometidas a ondas electromagnéticas de 945 MHz sobrepasaron el nivel de germinación normal de la planta cuando es cultivada en condiciones normales, teniendo en cuenta que las semillas sometidas a la más alta frecuencia mostraron un color amarillento en el noveno día.

Acercas de la altura en centímetros (cm) promedio que alcanzaron las plantas a los quince días (tabla 8), se observó que las plantas que fueron sometidas a las respectivas radiaciones electromagnéticas estuvieron por encima del tratamiento testigo.

Tabla 8. Altura promedio por tratamiento

| Tratamiento | Altura promedio (cm) | | | |
|-------------|----------------------|-------|-------|----------|
| | Repeticiones | | | Promedio |
| | r1 | r2 | r3 | |
| 945 | 11,45 | 13,48 | 11,20 | 12,04 |
| 440 | 12,90 | 12,94 | 13,03 | 12,96 |
| 000 | 9,4 | 10,83 | 10,99 | 10,40 |

Fuente: elaboración propia.

Las plantas sometidas a 440 MHz superaron en altura (figura 4) a las plantas de 945 MHz y 000

MHz en 0,92 cm y 2,56 cm, respectivamente. El tratamiento de 945 MHz superó en altura a los testigos en 1,64 cm.

Con respecto a la altura, se apreciaron diferencias significativas en los respectivos tratamientos (tabla 9): al final de la prueba ganaron mayor altura las plantas sometidas a una radiación de 440 MHz, seguidas de las plantas del tratamiento de 945 MHz y 000 MHz. De esto hay que tener en cuenta que por su rápida germinación, las plantas que empezaron ganando altura fueron las sometidas a 945 MHz.

Tabla 9. Análisis de varianza (altura alcanzada el día 15)

| Factor | Tipo | Niveles | Valores | | |
|---|-----------|---------|-------------|------|-------|
| Tratamiento | aleatorio | 3 | 0. 440. 945 | | |
| Análisis de varianza | | | | | |
| Fuente | Gl | SC | Cm | F | P |
| Tratamiento | 2 | 10,0154 | 5,0077 | 6,44 | 0,032 |
| Error | 6 | 4,6690 | 0,7782 | | |
| Total | 8 | 14,6844 | | | |
| S = 0,882138, R ² = 68,20%, R ² (ajustado) = 57,61% | | | | | |

Fuente: elaboración propia.

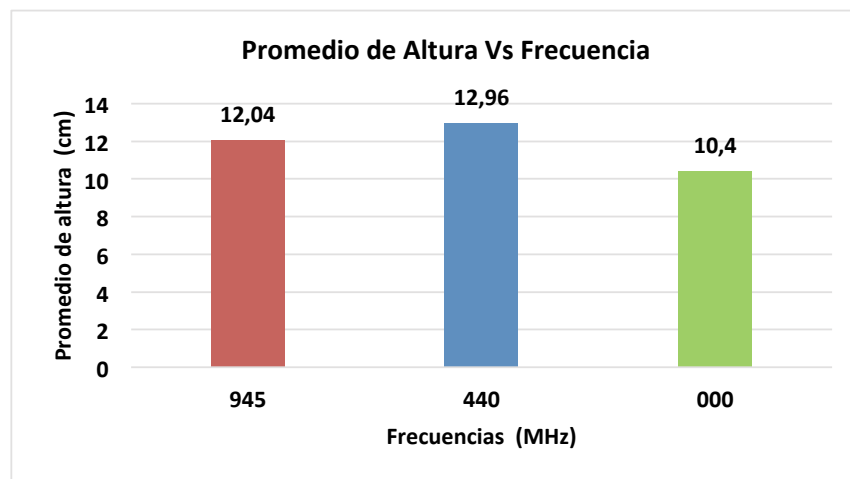


Figura 4. Altura promedio alcanzada el día 15.

Fuente: elaboración propia.

En cuanto al análisis del porcentaje de ceniza (tabla 10), se encontró que las plantas sometidas a 945 y 440MHz tuvieron un 5.7597% y 2.2768 % menos ceniza que las plantas testigo.

Tabla 10. Porcentaje promedio de ceniza

| Tratamiento | Porcentaje de ceniza | | | % Promedio |
|-------------|----------------------|---------|---------|------------|
| | Repeticiones | | | |
| | r1 | r2 | r3 | |
| 945 | 13,7221 | 13,0619 | 11,2869 | 12,6903 |
| 440 | 16,6198 | 13,2126 | 18,6873 | 16,1732 |
| 000 | 19,6015 | 16,0728 | 19,6785 | 18,45 |

Fuente: elaboración propia.

Estos resultados muestran que las plantas sometidas a 945 MHz y 440 MHz describieron poca diferencia significativa con la testigo (tabla 11), aunque cabe anotar que las plantas sometidas a la mayor frecuencia electromagnética tuvieron menor porcentaje de ceniza.

Tabla 11. Análisis de varianza. Porcentaje de Ceniza

| FACTOR | TIPO | NIVELES | VALORES | | |
|--|-----------|---------|-------------|------|-------|
| Tratamiento | Aleatorio | 3 | 0. 440. 945 | | |
| Análisis de varianza | | | | | |
| Fuente | Gl | Sc | Cm | F | P |
| Tratamiento | 2 | 50,091 | 25,046 | 5,64 | 0,042 |
| Error | 6 | 26,646 | 4,441 | | |
| Total | 8 | 76,737 | | | |
| S = 2,10738, R ² = 65,28%, R ² (ajustado) = 53,70% | | | | | |

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

Cuanta mayor fue la frecuencia de radiación electromagnética a la que estuvieron sometidas las plantas de maíz, mayor fue la rapidez de su germinación y menor su cenizas. Las plantas de maíz sometidas a radiación electromagnética superaron en número de plantas totales germinadas a las testigos, es decir, la radiación mejoró el porcentaje

de germinación de las plantas. Se observó que las plantas sometidas a alta frecuencia de radiación (945 MHz) perdieron altura, mostraron un color amarillento en las hojas y debilitamiento en su textura, lo cual conllevó un estrés a dichas plantas en relación con el aumento de frecuencia.

FINANCIAMIENTO

El proyecto fue financiado por la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña y orientado desde el Plan de Estudio de Ingeniería Ambiental.

REFERENCIAS

- Carbonell Padrino, M. V., Martínez Ramírez, E., Flórez García, M., & Amaya García de la Escosura, J. M. (2005). Influencia de campos magnéticos estacionarios de 125mT y 250 mT en la germinación de semillas de girasol. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*(3), 34-39. Obtenido de <http://www.redalyc.org/pdf/2311/231117496006.pdf>
- Cardoso Almeida, F. d., Pita Villamil, J. M., & Gomes de Gouveia, J. P. (2000). Efecto de la crioconservación sobre la germinación de semillas de leguminosas. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, 2, 67-71. Retrieved 2015, from <http://www.deag.ufcg.edu.br/rbpa/rev21/Art218.pdf>
- Domínguez Pacheco, A., Hernández Aguilar, C., Cruz Orea, A., Carballo Carballo, A., Zepada Bautista, R., & Martínez Ortiz, E. (2010). Semilla de maíz bajo la influencia de irradiación de campos electromagnéticos. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 33(2), 183-188. Retrieved from http://www.researchgate.net/publication/45492504_SEMILLA_DE_MAZ_BAJO_LA_INFLUENCIA_DE_IRRADIACION_DE_CAMPOS_ELECTROMAGNETICOS
- García Rebollar, P., & Pérez Cabal, M. d. (2008). Efecto de la exposición a campos magnéticos estacionarios de 125mt y 250 mt en la germinación de semillas de guisante. . *I Congreso de Estudiantes Universitarios de Ciencia, Tecnología e Ingeniería Agronómica* (págs. 93-96). Madrid- España: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de la

- Universidad Politécnica de Madrid. Obtenido de http://oa.upm.es/6568/1/Actas_I_Congreso_Estudiantes.pdf
- Prakob, P., Jinapang, P., Wongwattananard, P., Islam, N., & Kirawanich, P. (2010). Growth characteristics of mung beans and water convolvuluses exposed to 425-MHz electromagnetic fields. *Bioelectromagnetics*, 31(7), 519. doi:10.1002/bem.20584.
- Ramírez, C., Romero, M., & Henríquez, O. (1980). Estudios de germinación en semillas de mirtáceas chilenas. *Bosque*, 3(2), 106-114. Obtenido de <http://mingaonline.uach.cl/pdf/bosque/v3n2/art06.pdf>
- Roux, D., Vian, A., Girard, S., Paladian, F., Davies, E., & Ledoigt, G. (2008). High frequency (900 MHz) low amplitude (5 V m⁻¹) electromagnetic field: a genuine environmental stimulus that affects transcription, translation, calcium and energy charge in tomato. *Planta*, 227(4), 91. doi:10.1007/s00425-007-0664-2
- Singhal, R., Venu, B., Ahuja, S., Singh, B., & Kumar Gupta, V. (2014). ery low dose gamma irradiation stimulates gaseous exchange and carboxylation efficiency, but inhibits vascular sap flow in groundnut (*Arachis hypogaea* L.). *International Journal of Radiation Biology*, 90 (2), 179-186. doi:doi:10.3109/09553002.2014.868615
- Stoyanova, S., & Ivanova, R. (2000). Effect of presowing irradiation of seed from winter rapeseed by helium-neon laser on the growth, yield and quality of the green mass. *Biotechnology in Animal Husbandry*, 16, 75-83. Obtenido de <http://cabdirect.org/abstracts/20003017917.html>
- Vashistha, A., & Nagarajan, S. (2008). Exposure of seeds to static magnetic field enhances germination and early growth characteristics in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Bioelectromagnetic*, 29(7), 8. doi:10.1002/bem.20426.





Comportamiento de las ecuaciones de Saint-Venant en 1D y aproximaciones para diferentes condiciones en régimen permanente y variable

Performance of the Saint Venant equations in 1D and approaches to different conditions in steady and variable state

Gloria Estefany Amarís Castro*, Thomas Edison Guerrero Barbosa**, Edgar Antonio Sánchez Ortiz***

Fecha de recepción: 6 de septiembre de 2014

Fecha de aceptación: 6 de abril de 2015

Como citar: Amarís Castro, G. E., Guerrero Barbosa, T. E., & Sánchez Ortiz, E. A. (2015). Comportamiento de las ecuaciones de Saint-Venant en 1D y aproximaciones para diferentes condiciones en régimen permanente y variable. *Revista Tecnura*, 19(45), 75-87. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.3.a06

RESUMEN

La importancia del comportamiento de las ecuaciones de Saint-Venant y sus implicaciones en el análisis del flujo aplicado a modelos de tránsito hidráulico es el tema principal de esta investigación. Partiendo de las aplicaciones y usos de dichos modelos matemáticos, se determina y se evalúa el comportamiento de estas ecuaciones en 1D y sus aproximaciones para diferentes condiciones posibles de una situación real mediante la experimentación numérica computacional para un tramo de un cauce con una sección hidráulica prismática, en casos en los cuales la pendiente del canal presenta tres tipos de condiciones: supercrítica, subcrítica y pendiente horizontal, para un caudal de referencia. El objetivo principal de esta investigación es encontrar una demostración de la aplicabilidad de las ecuaciones de Saint-Venant para diferentes condiciones de acercamiento a esta problemática desde el punto de vista de la solución de las ecuaciones de Saint-Venant en una dimensión. Se propone un esquema de solución

simple que produzca soluciones útiles a las necesidades de la ingeniería, y se encuentra que dentro del análisis de redes de alcantarillado hay muchos factores que pueden afectar la solución de las ecuaciones de Saint-Venant.

Palabras clave: ecuaciones de Saint-Venant, modelos matemáticos, onda dinámica, pendiente subcrítica, pendiente supercrítica.

ABSTRACT

The importance of the behavior of the Saint Venant equations and its implications for flow analysis applied to models of hydraulic transit is the main theme of this research, where the basis of the applications and uses of these mathematical models is determined and the performance is evaluated these equations in 1D and its possible approaches for different conditions of a real situation using computational numerical experimentation for a section of a prismatic channel with a hydraulic section, in cases where the channel slope presents three types of

* Ingeniera civil, estudiante de la Maestría en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hídricos, Universidad del Norte, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Barranquilla, Colombia. Contacto: gloriacastro-18@hotmail.com

** Ingeniero civil, magister en Ingeniería Civil. Docente Auxiliar, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Departamento de Ingeniería Civil, Ocaña, Colombia. Contacto: teguerrerob@ufpso.edu.co

*** Licenciado en Física y Matemáticas, magister en Educación. Director seccional, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Ocaña, Colombia. Contacto: esanchez@ufpso.edu.co

conditions: supercritical, subcritical and horizontal slope for a design rate. The main objective of this research is to find a demonstration of the applicability of the Saint Venant equations for different conditions of approaching this problem from the point of view of the solution of the Saint Venant equations in one dimension. Scheme simple solution that produces

useful solutions to the needs of engineering, finding that within the sewer network analysis there are many factors that can affect the solution of the Saint Venant equations.

Keywords: mathematical modeling, Saint-Venant equations, slope subcritical, supercritical slope, wave dynamics.

INTRODUCCIÓN

En Colombia los modelos de tránsito permanente son de uso común en las modelaciones en ingeniería. Software de uso frecuente como el Sistema de Análisis de Ríos, desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica de California, EUA (HEC-RAS, por su sigla en inglés), permite determinar la altura requerida para construir estructuras de control como puentes, diques, vertederos y obras de protección en aguas bajas, redes hídricas y flujo libre; sin embargo, cuando la lámina del flujo crece rápidamente, los errores de los esquemas no linealizados aumentan.

Las ecuaciones de Saint-Venant (1871) han demostrado ser un modelo matemático útil con aplicaciones en varias ramas de la ingeniería hidráulica y costera; estos modelos se basan en el desarrollo de ecuaciones diferenciales encargadas de modelar variación de caudal y nivel de un flujo en un espacio unidimensional y el tiempo de manera no permanente en canales abiertos. En general estas modelaciones se presentan en tres dimensiones, pero las aplicaciones prácticas suelen utilizar una aproximación unidimensional en la dirección de mayor relevancia, que usualmente suele ser a lo largo del canal en la dirección de flujo.

En la revisión bibliográfica se encuentran evidencias de otros estudios que se encargan de proponer diferentes escenarios con el fin de explicar el comportamiento del flujo mediante las ecuaciones de Saint-Venant y establecer su aplicabilidad para determinar el comportamiento del flujo.

En las modelaciones de flujo en canales de alta pendiente ($S_o > 5\%$) se generan soluciones

inestables debido a la alta acumulación de errores (Tsai, 2003). En estos casos generalmente se sugiere el uso de un esquema de solución mediante la formulación y desarrollo de la onda cinemática, de tal forma que considere la no linealidad en flujos bajo estas condiciones. Estas modelaciones matemáticas son consideradas como una aproximación a la realidad, por lo cual es primordial establecer las condiciones de frontera que permitan determinar las condiciones aproximadas del comportamiento del flujo y del canal, ya que cuanto más se adapten las ecuaciones de partida y la programación numérica para su resolución al fenómeno real que se está estudiando, mejores resultados se obtendrán.

Generalmente en los estudios hidráulicos, como es el caso de los efectos de la propagación de avenidas en ríos, cálculos de velocidades y niveles de agua, son usados métodos de abstracciones unidimensionales en régimen permanente gradualmente variado y fondo fijo, pues se les considera como una herramienta suficiente para determinar el comportamiento del río y se deja a un lado la evolución temporal en el proceso. Aplicaciones de partículas hidrodinámicas con modelos matemáticos basados en las ecuaciones de Saint-Venant en canales abiertos son mostradas por (Chang, Kao, Chang, & Hsu, 2011).

La onda dinámica se considera como el modelo de tránsito distribuido más completo existente, ya que tiene en cuenta todas las fuerzas que interactúan en el tránsito de la creciente (inerciales, presión, gravitacional, fricción) y tiene en cuenta los efectos de remanso en el cálculo; en su forma

completa, estas ecuaciones se consideran de solución compleja aun con el uso de las más modernas herramientas computacionales (Cea, 2008).

A pesar de la complejidad de estas ecuaciones, son estudiadas con el fin de entenderlas y con esto mejorar las ideas en el campo de la mecánica de los fluidos en las soluciones de flujos particulares y para examinar leyes de modelamiento matemático (White, 1991).

Otros estudios aplicativos referentes a la implementación del esquema numérico en volúmenes finitos para las ecuaciones de flujo Saint-Venant han permitido conocer el perfil de flujo superficial y la infiltración en el suelo en sistemas de riego, como es el caso de Pino, Mejía y Chávarry (2012), quienes determinaron, tras un proceso de simulación de varios casos, que la pendiente longitudinal tiene un papel importante en el flujo para las melgas; según su modelo, la pendiente debe ser menor a 0,001 m/m. Las pendientes mayores generan flujos rápidos o supercríticos.

Al aplicar el análisis de flujo de régimen variable es imprescindible considerar las restricciones que permiten el desarrollo de las ecuaciones de Saint-Venant, por lo tanto es necesario utilizar un software que permita modelar las situaciones en que sea aplicable la suposición de onda cinemática como la onda dinámica.

Aplicaciones de las ecuaciones de Saint-Venant contrarias a los casos ya conocidos, como en redes fijas convencionales o métodos de partículas en movimiento, se evidencian en Yao-Hsin (2013), quien muestra una formulación a partir de la reasignación de partículas computacionales a lo largo de las curvas características. En la predicción de las variables de flujo para diferentes condiciones tiene gran importancia desarrollar modelos y simulaciones numéricas hidrodinámicas con precisión adecuada que permitan la correcta planificación de obras.

El objetivo principal de esta investigación es evaluar el comportamiento de las ecuaciones de Saint-Venant para condiciones en régimen permanente y variable, bajo diferentes escenarios de estudio y modificando las condiciones de frontera

mediante condiciones de piscina nivelada, pendiente subcrítica y condición aguas abajo profundidad crítica, pendiente supercrítica y condición aguas abajo profundidad normal.

METODOLOGÍA

Teniendo en cuenta el concepto de onda cinemática como un modelo simplificado del flujo no permanente en canales abiertos y conociendo que las ondas dinámicas resuelven las ecuaciones completas, se concluiría que las ondas dinámicas resuelven las ecuaciones completas, pues se esperaría que la onda dinámica presentara mejor comportamiento que la onda cinemática debido a que la onda dinámica contiene términos inerciales (aceleración local y aceleración convectiva), fuerza gravitacional, fuerza de fricción; por el contrario, la onda cinemática únicamente contiene los términos de fuerza gravitacional y de fuerza de fricción pero según estudios realizados los últimos 100 años indican lo contrario. Lighthill y Whitham (1955) afirman que bajo las condiciones apropiadas para el flujo de avenida, las ondas dinámicas se atenúan muy rápidamente, y son las ondas cinemáticas, viajando a una velocidad menor, las que asumen el papel preponderante.

Tipos de tránsito hidráulico

Las ecuaciones de Saint-Venant tienen varias formas simplificadas, cada una de las cuales define un modelo de tránsito distribuido unidimensional (Zapata Gaviria, 2012). Aunque las fuerzas expresadas en la ecuación de *momentum* siempre están presentes en cualquier problema de hidrodinámica, se puede dar el caso de que no todas sean relevantes. Esto hace que sea posible tener varios tipos de tránsito hidráulico de crecientes, como se muestra en la ecuación (1).

$$\left(\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t}\right) + \left(\frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \frac{Q^2}{A}\right) + \left(g \frac{\partial y}{\partial x}\right) - (gS_0) + (gS_f) = 0 \quad (1)$$

Modelo de onda cinemática

El modelo de onda cinemática es la mejor alternativa en la modelación del tránsito hidráulico en redes debido a la simplicidad de su estructura, buen comportamiento y representatividad ante una modelación, sin embargo el que desprecie ciertas condiciones como términos de aceleración local, aceleración convectiva y fuerzas de presión, limita en cierta medida al modelo para ciertas circunstancias de escenarios dependiendo del caso específico (condiciones de pendiente y velocidad entre otras).

En este caso la ecuación de Saint Venant de conservación de *momentum* se reduce a la ecuación (2) y la ecuación (3).

$$(gA)(-S_0 + S_f) = 0 \quad (2)$$

$$S_0 = S_f \quad (3)$$

Lo anterior implica que el flujo puede ser tratado como "uniforme no permanente". Esto significa que no hay efectos transientes de curvas de remanso. En este caso existe un balance entre el efecto de la aceleración debido a la gravedad y el efecto de retraso de las fuerzas de fricción.

La celeridad de onda es la velocidad con la cual se mueve el frente de onda con respecto a los bordes del conducto. En el caso de la onda cinemática, los términos de aceleración y de presión son muy pequeños comparados con los gravitacionales y los de fricción; es decir, el movimiento de la onda está descrito más por la ecuación de continuidad que por la de *momentum*.

Esquema numérico

Las ecuaciones de Saint Venant para la onda cinemática son dos ecuaciones diferenciales parciales,

$$Q_{i+1}^j = \frac{\frac{\Delta t}{\Delta x} Q_i^j + ab Q_{i+1}^{j-1} \left(\frac{Q_{i+1}^{j-1} + Q_i^j}{2} \right)^{b-1} + \Delta t \left(\frac{q_{i+1}^j + q_{i+1}^{j-1}}{2} \right)}{\frac{\Delta t}{\Delta x} Q_i^j + ab \left(\frac{Q_{i+1}^{j-1} + Q_i^j}{2} \right)^{b-1}} \quad (5)$$

una de continuidad y otra de *momentum*. La solución de las ecuaciones requiere de métodos numéricos directos, los cuales convierten las ecuaciones diferenciales en ecuaciones de diferencias finitas para la conservación de la masa y del *momentum* lineal, las cuales pueden ser lineales o no lineales. Los cálculos de las variables desconocidas se hacen simultáneamente en función del espacio y del tiempo. En el caso del tránsito hidráulico de crecientes, las variables desconocidas son: Q y A.

Si se tiene una función $f(x)$ continua en un intervalo (a,b) , el valor de $f(x+\Delta x)$ puede ser calculado utilizando el valor de $f(x)$, que se supone conocido, y las derivadas de la función f en el punto x conocido. Utilizando series de Taylor y resolviendo para $f'(x)$, se obtiene la ecuación (4).

$$f'(x) = \left(\frac{f(x) - f(x - \Delta x)}{\Delta x} \right) \quad (4)$$

Esta ecuación puede ser utilizada para solucionar la ecuación diferencial parcial, en donde la derivada es función de los valores conocidos de la función inicial.

Solución por diferencias finitas

El esquema de diferencias finitas debe solucionar las ecuaciones de Saint Venant. La variable dependiente únicamente es Q. La ecuación de continuidad, por ser una ecuación diferencial parcial, se puede aplicar al método de las diferencias finitas, con el fin de conocer Q para cualquier lugar x del conducto en cualquier instante de tiempo.

La otra variable dependiente (y o A) se calcula utilizando $Q(x,t)$ y una ecuación de resistencia fluida, tal como la ecuación de Gauckler Manning. Luego de un sencillo procedimiento matemático se llega a la ecuación (5).

Donde los valores a y b dependen de la geometría del conducto, y los términos de Δx y Δt deben estar relacionados mediante la condición de Courant correspondiente a la ecuación (6).

$$\Delta t = \left(\frac{\Delta x}{C_x} \right) \quad (6)$$

APLICACIÓN PARA EVALUAR LAS ECUACIONES DE SAINT-VENANT

Mediante el uso de las ecuaciones de Saint-Venant y los métodos de solución tanto implícito como explícito, se procedió a desarrollar los siguientes casos de estudios y para cada uno se obtuvo resultados en una situación en particular. La sección transversal del canal de irrigación se muestra en la figura 1, así como otras características de esta se presentan a continuación:

- Tipo de cauce: canal prefabricado.
- Uso: irrigación.
- Forma de la sección transversal: trapezoidal.
- Relación de taludes laterales: 2H:1V.
- Base: 6,1 m.
- Longitud: 2743,2 m.
- Cota inicial: 29,1 m.s.n.m.
- Rugosidad (n de Manning): 0,025.

La pendiente longitudinal utilizada varió según las condiciones hidráulicas que se deseaban evaluar,

tales como la propagación de la onda sobre una pendiente horizontal, subcrítica o supercrítica. En cuanto al cálculo del tránsito distribuido de la onda sobre el canal evaluado, fue necesario implementar una rutina (algoritmo) que lograra la resolución numérica de las ecuaciones diferenciales de momento y continuidad de una forma rápida y estable. Esta rutina fue elaborada en Matlab 2011 y consideró dentro de su estructura la posibilidad de evaluar diferentes condiciones de frontera, tales como: hidrograma y limnigrama en la frontera aguas arriba e hidrogramas, limnigramas, condiciones de flujo normal y flujo crítico sobre la frontera aguas abajo.

El análisis del escenario propuesto indica que el caudal pico mostrado en la gráfica del hidrograma de entrada es un tiempo de 3,65 hr (condiciones típicas de la ciudad de Barranquilla); para la programación es necesario que el tiempo de modelación sea superior por lo menos al caudal pico del hidrograma es por esto que se decidió tomar 5 h de tal forma que supere el caudal pico mostrado en el hidrograma; adicionalmente se utilizó un diferencial de tiempo (Δt) de 0,1 hrs y un diferencial de posición (Δx) de 305 m. Los casos sobre los cuales se evaluó la ecuación de Saint Venant se presentan a continuación.

Caso 1: flujo horizontal

Para este escenario de modelación se planteó una pendiente de fondo de $S_0=0,0000005$,

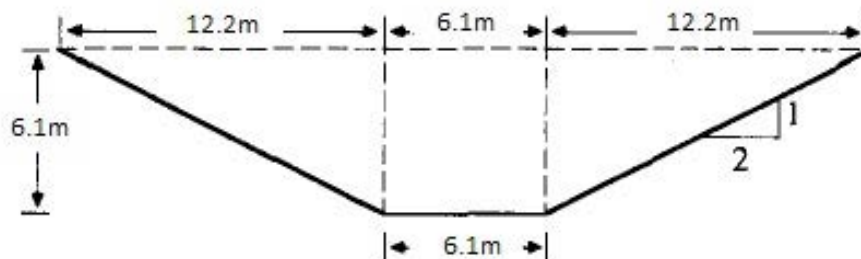


Figura 1. Sección Transversal del Canal de Irrigación.

Fuente: elaboración propia.

suficientemente baja, simulando las condiciones de un embalse. Las condiciones de frontera para simulación fueron:

- Aguas arriba: hidrograma de caudales.
- Aguas abajo: profundidad normal.

A continuación se presentan las condiciones de frontera aguas arriba y aguas abajo definidas para

la simulación de flujo horizontal correspondiente a las figuras 2 y 3.

Al igual que las simulaciones de los escenarios anteriores, esta se ejecutó con el modelo de onda dinámica, seleccionando como valor de $\theta=0,75$. Para este caso las condiciones iniciales definidas son:

- Caudal inicial: $10 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Profundidad inicial: $7,119 \text{ m}$.

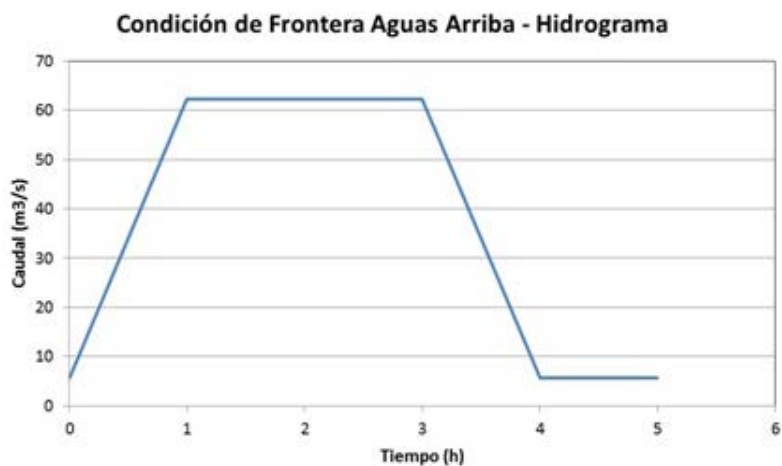


Figura 2. Condición de frontera aguas arriba, simulación de flujo horizontal.

Fuente: elaboración propia.

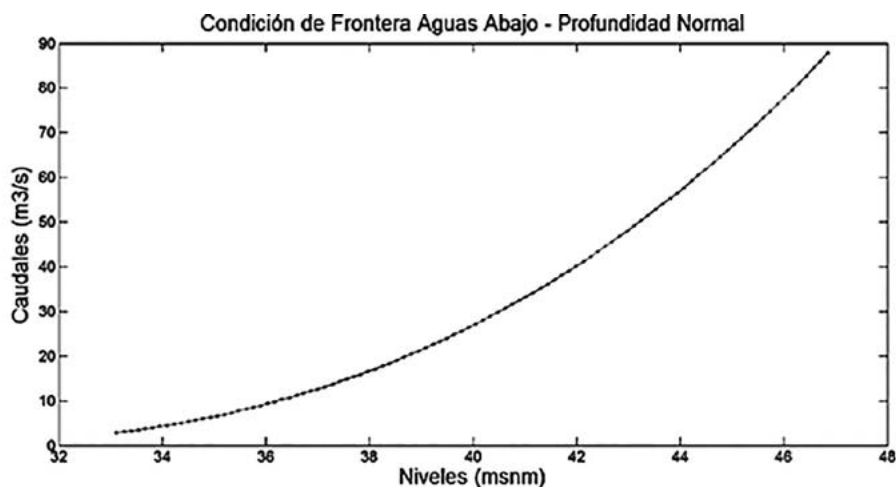


Figura 3. Simulación de flujo horizontal.

Fuente: elaboración propia.

Caso 2: flujo subcrítico

Se ha considerado un flujo subcrítico, con pendiente de fondo de $S_0=0,0005$; las condiciones de frontera aplicadas en esta simulación fueron:

- Limnigrama de niveles aguas arriba.
- Limnigrama de niveles aguas abajo.

Las figuras 4 y 5 muestran las condiciones de frontera aguas arriba y aguas abajo utilizadas para esta simulación.

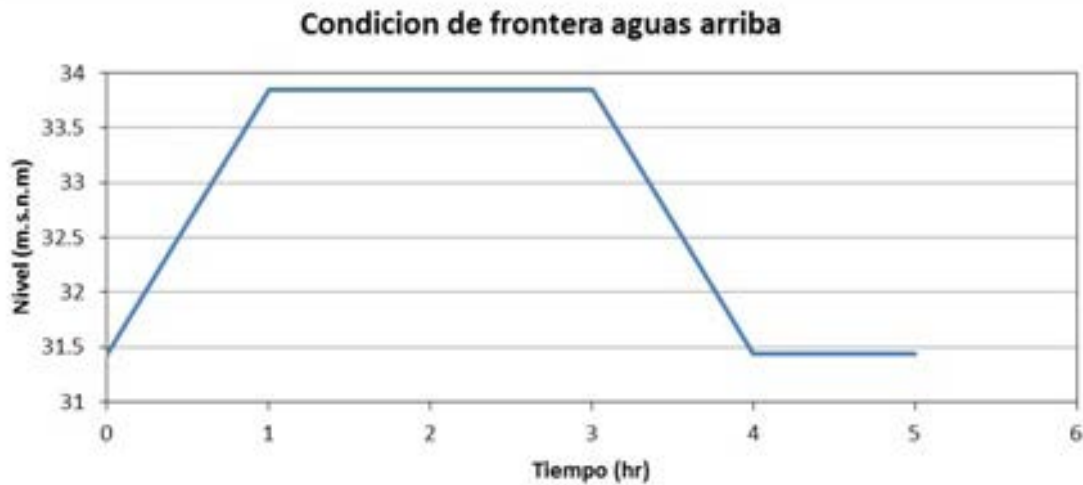


Figura 4. Condición de frontera aguas arriba, simulación de flujo subcrítico.

Fuente: elaboración propia.

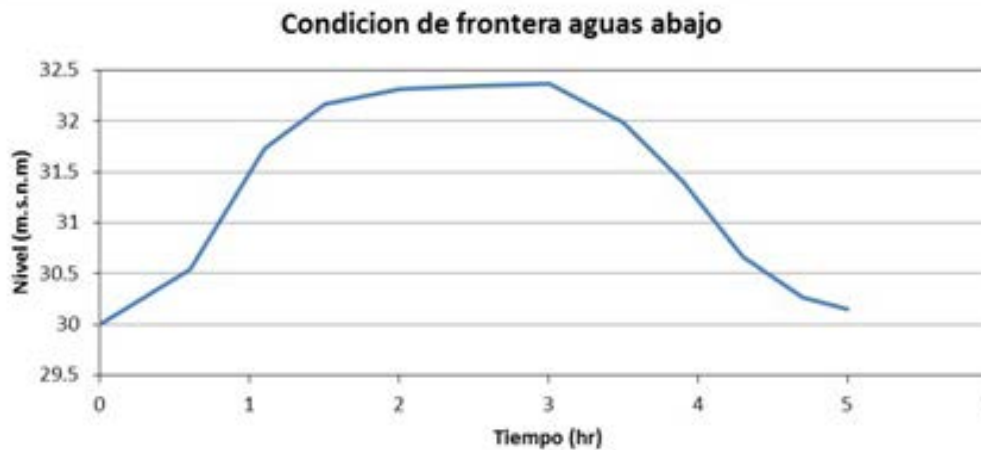


Figura 5. Condición de frontera aguas arriba, simulación de flujo subcrítico.

Fuente: elaboración propia.

Caso 3: flujo supercrítico

Se ha considerado un flujo supercrítico con pendiente de fondo de $S_0=0,05$; las condiciones de frontera aplicadas en esta simulación fueron:

Hidrograma de caudales aguas arriba.

- Hidrograma de caudales aguas abajo.

Las figuras 6 y 7 muestran las condiciones de frontera aguas arriba y aguas abajo utilizadas para esta simulación.



Figura 6. Condición de frontera aguas arriba, simulación de flujo supercrítico.

Fuente: elaboración propia



Figura 7. Condición de frontera aguas abajo, simulación de flujo supercrítico.

Fuente: elaboración propia.

RESULTADOS

Caso 1

A continuación se presenta el tránsito del hidrograma de caudales y del limnigrama de profundidades a lo largo del canal para las condiciones iniciales y finales, como se ve en la figura 8. Respecto a los hidrogramas observamos que en el tiempo 3,65 h el caudal pico de la salida ($26,82 \text{ m}^3/\text{s}$) cruza el hidrograma de

la entrada y a las 5 horas el caudal en la salida es de $23,3 \text{ m}^3/\text{s}$ y en la entrada el caudal es de $5,66 \text{ m}^3/\text{s}$. Mientras tanto, en el limnigrama notamos que la variación de la profundidad en la entrada es muy similar a la variación de la profundidad en la salida.

Anteriormente observamos las variaciones de los caudales y las profundidades respecto al tiempo; ahora bien, en la figura 9 se presenta la variación de los caudales y las profundidades respecto al tiempo y al espacio.

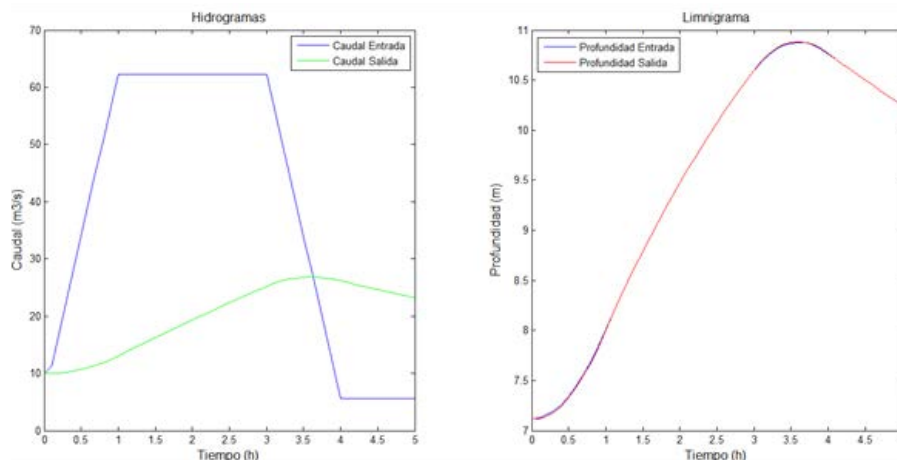


Figura 8. Hidrogramas y limnigramas de entrada y salida para simulación de flujo horizontal.

Fuente: elaboración propia.

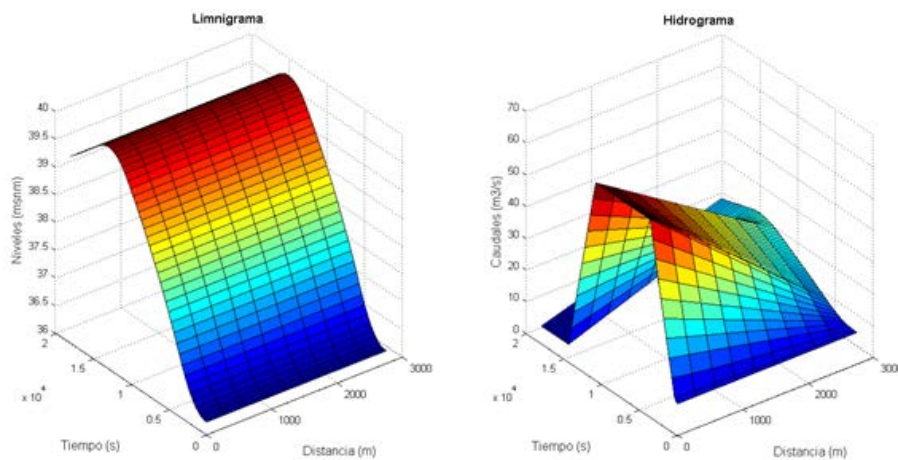


Figura 9. Resultados de la simulación de flujo horizontal con modelo de onda dinámica.

Fuente: elaboración propia.

Caso 2

La simulación de este escenario se llevó a cabo con el modelo de onda dinámica. En la figura 10 se presenta el hidrograma de entrada, el hidrograma de salida, las profundidades de entrada y las profundidades de salida. En la figura 11 se muestra cómo transitan el hidrograma y el limnograma a lo largo del canal.

El hidrograma de salida alcanza el mismo caudal pico que el hidrograma de entrada ($62,3 \text{ m}^3/\text{s}$) pico después de 4 horas de simulación. Se aprecia que el modelo de onda dinámica simula correctamente el escenario de flujo subcrítico unidimensional para el escenario de limnogramas como condiciones de frontera. Los resultados no tienen inconsistencias en el hidrograma de salida con un valor de $\theta = 0,75$.

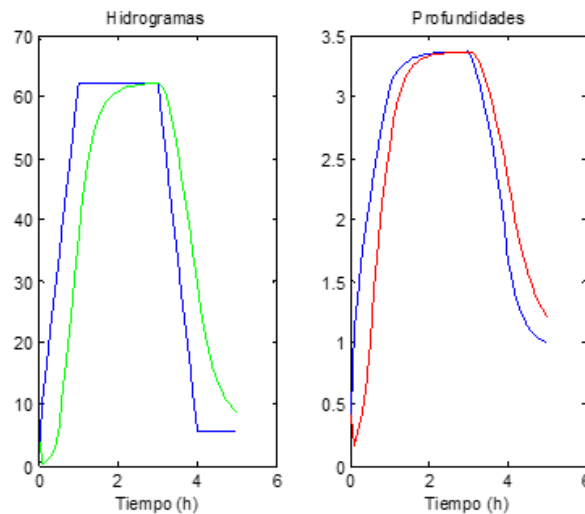


Figura 10. Hidrogramas y limnogramas de entrada y salida para simulación de flujo subcrítico.

Fuente: elaboración propia.

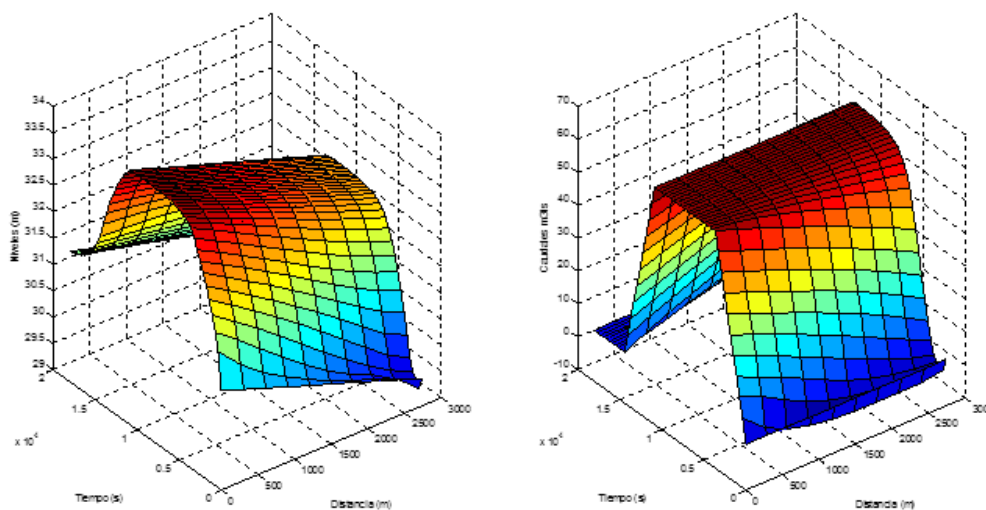


Figura 11. Resultados de la simulación de flujo subcrítico con modelo de onda dinámica.

Fuente: elaboración propia.

Caso 3

La simulación de este escenario se llevó a cabo con el modelo de onda dinámica. En la figura 12 se presenta el hidrograma de entrada, el hidrograma de salida, las profundidades de entrada y las profundidades de salida. En la figura 13 se muestra cómo transitan el hidrograma y el limnograma a lo

largo del canal. El hidrograma de salida alcanza el mismo caudal pico que el hidrograma de entrada ($62,3 \text{ m}^3/\text{s}$) pico en menos de 0,3 horas de simulación debido a la gran velocidad en la que se mueve la onda. Se pudo observar que el tiempo de respuesta del sistema a la onda fue tal que los hidrogramas de niveles y caudales de las fronteras están muy cercanos entre sí. Se aprecia que el

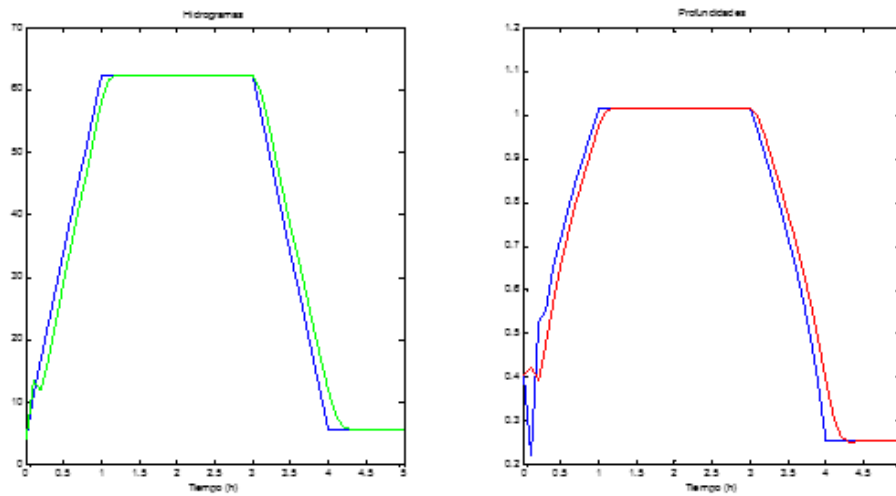


Figura 12. Hidrogramas y limnogramas de entrada y salida para simulación de flujo supercrítico.

Fuente: elaboración propia.

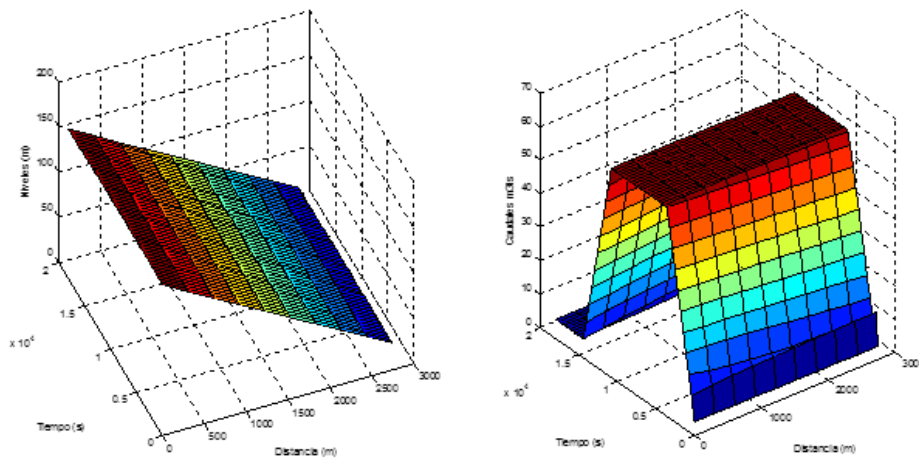


Figura 13. Resultados de la simulación de flujo supercrítico con modelo de onda dinámica.

Fuente: elaboración propia.

modelo de onda dinámica simula correctamente el escenario de flujo supercrítico para las condiciones de frontera dadas. Los resultados presentan una ligera inestabilidad en el arranque de la simulación, y es debido a que el modelo para esos intervalos de tiempo no convergió en una solución adecuada, lo cual era de esperarse para el caso de flujo evaluado.

CONCLUSIONES

El modelo de la onda dinámica demuestra ser aplicable a todos los casos, a menos que sea posible demostrar que los modelos o aproximaciones de la onda difusa y la onda cinemática son adecuados para representar el flujo.

Las condiciones para las cuales son aplicables las ecuaciones de Saint-Venant que se basan en la solución de la ecuación de continuidad acompañada por la ecuación de *momentum* lineal son: para condiciones de pendiente menores al 10% y situaciones hidráulicas que cuenten con pendientes pronunciadas, se puede hacer uso del método de la onda cinemática; si por el contrario las condiciones a modelar cuentan con pendientes suaves (terrenos planos con pendiente inferiores al 0,05%), se debe hacer uso del método de la onda dinámica, de tal manera que ajuste de forma adecuada a las condiciones del fenómeno que se desea modelar.

Durante el desarrollo de la investigación se demuestra que existen factores que afectan la solución de las ecuaciones, entre los cuales están el Δx (variación de la distancia) que se escoja para el cálculo, las condiciones de frontera, la geometría y el tipo de estructura hidráulica.

Para verificar el efecto del Δx , se modeló con el programa Matlab un tramo con una longitud de 2743,2 m y se variaron los Δx para el cálculo. El uso de las ecuaciones simplificadas de la onda cinemática, en el tránsito de crecientes para canales de alta pendiente, se muestran bastante útiles, tal y como lo reportan Chow, Maidment y Mays

(1988), Singh (1996), Tsai (2003), y Macchione y Morelli (2003).

El modelo basado en la simplificación de la onda dinámica permite simular los frentes de ondas manteniendo la continuidad en la masa y adicionalmente disminuyendo la atenuación en el caudal pico. Sin embargo, para condiciones de flujo en canales, donde se pueda generar un frente de onda, las ecuaciones de Saint-Venant no son válidas en las vecindades de la discontinuidad.

De acuerdo con los resultados obtenidos para cada aplicación, se debe cuestionar el uso de los softwares de manera que se tenga en cuenta en las modelaciones todos los parámetros que afectan las ecuaciones de Saint-Venant.

La evaluación y modelación del comportamiento del flujo es importante para la aplicación de la ingeniería hidráulica y costera, es por esto que las modelaciones que se realizan deben ajustarse a las situaciones reales encontradas en campo para definir las condiciones de frontera de la estructura hidráulica y sus limitaciones, con el fin de que las modelaciones simulen una situación cercana a la real presentada.

Los resultados sugieren que los efectos de los errores de los parámetros de entrada en los resultados de salida son más significativos en situaciones especiales, como los valores más bajos de coeficiente de rugosidad de Manning y una pendiente base más pronunciada en las características de un hidrograma de diseño, tal como lo sugiere Barti, Sajjad y Akbari (2012).

FINANCIAMIENTO

La investigación es resultado del financiamiento entregado por la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña (UFPSO) a través de la División de Investigación y Extensión (DIE) del proyecto titulado "Estudio del sistema de drenaje del campus de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña y diseño de estructuras hidroeconómicas mediante el principio de incertidumbre".

REFERENCIAS

- Barati, R., Sajjad, R., & Akbari, G. (2012). Analysis of dynamic wave model for flood routing in natural rivers. *Water Science and Engineering*, 5 (3), 243-258.
- Cea, L. (2008). Modelación matemática en lecho fijo del flujo en ríos. Modelos 1D y 2D en régimen permanente y variable. *Jornadas Técnicas sobre Hidráulica Fluvial, CEDEX-Ministerio de Fomento*. Madrid.
- Chang, T. J., Kao, H. M., Chang, K. H., & Hsu, M. H. (2011). Numerical simulation of shallow water dam break flows in open channels using smoothed particle hydrodynamics. *Journal Hydrology*, 408, 78-90.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. (1988). *Applied Hydrology*. Estados Unidos: Mac Graw Hill.
- De Saint-Venant, B. (1871). Theorie du mouvement non permanent des eaux, avec application aux crues de rivieras at a l'introduction des marces dans leur lit. *Compt Rend Acad Sci*, 147-154.
- Lighthill, M. J., & Whitham, G. B. (1955). On kinetic wave II: a theory of traffic flow on crowded roads. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, 229, pp. 317- 345.
- Macchione, F., & Morelli, M. (2003). Pactical aspect comparing shock-capturing schemes for dam break problems. *Journal hydraulic engineering*, 129 (3), 187-195.
- Pino Vargas, E., Mejía Marcacuzo, J. A., & Chávarry Velarde, E. (2012). Un Modelo Numérico 1D en Volúmenes Finitos para la Solución de las Ecuaciones de Flujo e Infiltración del Riego por Gravedad en Melgas. *Revista ECIPerú*, 9 (1), 22-30.
- Singh, V. P. (1996). *Kinematic wave modeling in water resources: Sourface water hydrology*. New York: John Wiley.
- Tsai, C. W. (2003). Applicability of kinematic, non-inertia, and quasi-steady dynamic wave models for bend-flow simulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 613-627.
- White, M. F. (1991). *Viscous Fluid Flow*. Estados Unidos: University of Rhode Island.
- Yao-Hsin, H. (2013). A characteristic particle method for the Saint-Venant equations. *Computers & Fluids*, 76, 58-72.
- Zapata Gaviria, J. F. (2012). Propuesta metodológica para la conceptualización de sistemas de drenaje urbano. *Revista EPM*, 6, 20-31.





Recomendación de productos a partir de perfiles de usuario interpretables

Products recommendation based on interpretable user profiles

Claudia Jeanneth Becerra Cortés* Sergio Gonzalo Jiménez Vargas**,
Fabio A. González***, Alexander Gelbukh****

Fecha de recepción: 9 de octubre de 2014

Fecha de aceptación: 6 de abril de 2015

Como citar: Becerra Cortés, C. J., Jiménez Vargas, S. G., González, F. A., & Gelbukh, A. (2015). Recomendación de productos a partir de perfiles de usuario interpretables. *Revista Tecnura*, 19(45), 89-100. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.3.a07

RESUMEN

Los sistemas de recomendación automática de productos permiten que los usuarios tengan una visión personalizada de grandes conjuntos de productos, lo cual alivia el problema de la sobrecarga de opciones en los sitios de comercio electrónico. Usualmente las recomendaciones se obtienen usando la técnica denominada "filtrado colaborativo". Esta técnica permite filtrar los productos que el usuario desea de aquellos que no desea, infiriendo las afinidades entre productos, y usuarios, en un espacio de características abstracto. Si bien estas técnicas han mostrado ser de gran valor predictivo, su baja (o nula) interpretabilidad hace que el usuario, al no poder modificar su perfil, quede encerrado en una especie de burbuja, en la cual solo recibe recomendaciones colaborativas condicionadas por su comportamiento histórico. En este trabajo proponemos construir perfiles de usuario definidos en espacios interpretables como el de las etiquetas colaborativas (*tags*) o bien palabras claves extractadas automáticamente

de las descripciones de los productos, que al ser interpretables permitan al usuario modificar su propio perfil. Este modelo se basa en la obtención de perfiles usando modelos lineales, cuyos coeficientes, positivos o negativos, reflejan la afinidad del usuario hacia la etiqueta o a la palabra clave. Para probar nuestra hipótesis, utilizamos el conjunto de datos de investigación en sistemas de recomendación de películas de la Universidad de Minnesota, MovieLens; los resultados obtenidos muestran que la capacidad predictiva del modelo es comparable a la de los métodos no interpretables, con el beneficio adicional de la interpretabilidad.

Palabras clave: etiquetado social, filtrado colaborativo, interfaces de usuario, sistemas de etiquetado colaborativo, sistemas de recomendación.

ABSTRACT

Recommender systems allow users to have a personalized view of large sets of products, relieving the overload problem of choice in e-commerce sites. Usually,

* Ingeniera de sistemas, magíster y candidata a doctor en Ingeniería de Sistemas y Computación de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Contacto: cjbecerrac@unal.edu.co

** Ingeniero de sistemas, magíster y candidato a doctor en Ingeniería de Sistemas y Computación de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Contacto: sgjimenezv@unal.edu.co

*** Ingeniero de sistemas, magíster en Matemáticas, magíster y doctor en Ciencias de la Computación. Profesor Asociado del Departamento de Ingeniería de Sistemas e Industrial, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Contacto: fagonzalezo@unal.edu.co

**** Bachelor of Science, magíster en Matemáticas, doctor en Ciencias de la Computación. Profesor-investigador y profesor colegiado del Laboratorio de Lenguaje Natural y Procesamiento de Texto del Centro de Investigación en Computación del Instituto Politécnico Nacional de México, Ciudad de México, México. Contacto: gelbukh@cic.ipn.mx

recommendations are obtained using the technique called “collaborative filtering”. This technique filters the products the users wish, from those they don’t want, inferring affinities between products and users in a space of abstract features, also called a latent space. These techniques have proven to be of great predictive value, but these created profiles are neither understandable, nor editable for users, enclosing users in a *bubble*, in which they only receive collaborative recommendations conditioned by their historical behaviors. In our work we propose a method to build user profiles, defined in interpretable spaces, or defined in terms of collaborative tags or keywords (i.e. words extracted from the descriptions of the product),

which can be interpreted and modified by users. The model proposed generate linear profiles, whose coefficients, positive or negative, reflect the user’s affinity towards tags or keywords, according to the space selected. To test our hypothesis, we used the dataset of research in movie recommender systems from the University of Minnesota: Movielens. The results show that the predictive ability of the model, based on interpretable user profiles, is comparable to those models based on abstract profiles with the added benefit that these profiles are interpretable.

Keywords: collaborative filtering, collaborative tagging systems, recommender systems, social tagging, user interfaces.

INTRODUCCIÓN

Las técnicas utilizadas en la exploración de grandes colecciones de productos, tales como libros (e.g. librarything.com), películas (e.g. netflix.com), fotos (e.g. flickr.com), artículos científicos (e.g. citeulike.com), web bookmarks (e.g. del.icio.us), etc., se construyen a partir de la investigación en artefactos colaborativos que permitan que el conocimiento, de ciertos individuos acerca de ciertos ítems, se propague a otros, siendo su objetivo generar una inteligencia colaborativa que permita guiar a los usuarios en búsquedas, personalizándolas hacia sus gustos, alejándolo de sus preferencias negativas. De esta forma se logra una experiencia de exploración que elimina la frustración que genera el recorrer inmensas colecciones de productos sin descubrir nada nuevo o interesante.

Los métodos tradicionales de recomendación y también los más precisos construyen perfiles de usuarios, basados en su historial de navegación o basados en evaluaciones explícitas de los productos. A partir de estas evaluaciones, el sistema infiere un conjunto común de características, en un espacio abstracto, que comparten el producto y el usuario, con lo cual se minimiza el error de predicción del conjunto de datos de entrenamiento.

En otras palabras, la evaluación es equivalente a la medida de afinidad entre el vector usuario y el vector producto definido en este espacio abstracto. Este método logra capturar así las interrelaciones entre usuarios y productos, de modo que permite predecir la evaluación que un usuario dará a un producto a partir de sus evaluaciones pasadas y de las evaluaciones que usuarios similares han hecho de este producto.

Sin embargo, estos espacios latentes no son interpretables e imposibilitan la interacción directa de los usuarios con sus perfiles. El usuario queda inmerso en una especie de burbuja condicionada a su historial previo, y cambiar su perfil ya solo es posible de manera indirecta, esto es, cambiando sus evaluaciones pasadas o encontrando nuevos productos que modifiquen su perfil de manera manual. Por tal razón, en este trabajo queremos proponer un método de obtención de perfiles de usuarios interpretables, construidos en espacios ya no abstractos, sino espacios que tengan sentido para el usuario y con los cuales pueda interactuar. Ejemplos de estos espacios pueden ser: espacios de palabras claves extractadas de las descripciones textuales de los productos (Lops, Gemmis, & Semeraro, 2011), o espacios de etiquetas colaborativas, las cuales denominaremos en adelante *tags*,

dado el extendido uso de ese término en aplicaciones en internet (Lops *et al.*, 2011). No obstante, estos espacios no necesariamente quedan limitados a los anteriores. Este modelo puede ser utilizado para calcular los perfiles de usuario en cualquier espacio, como por ejemplo espacios de características de los productos como géneros, actores, o en combinaciones de varios espacios.

Para ilustrar gráficamente la idea de los perfiles interpretables de usuario que pretendemos calcular, y su potencial como artefacto de interacción con usuarios, las figuras 1 y 2 muestran un ejemplo de interacción con un perfil de usuario basado en *tags*. Para esto se utilizó el conjunto de películas MovieLens (movielens.org, de la Universidad de Minnesota) y el subconjunto de *tags* correspondiente al trabajo The Tag Genome (Vig, Jesse, Sen, & Riedl, 2012). La visualización corresponde al prototipo de recomendación que se ha estado desarrollando con el proyecto financiado por Colciencias y la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, código 1101-521-28465,

denominado “Sistema de recomendación basado en conocimiento extractado de manera automática para ambientes de comercio electrónico”.

En la figura 1 se observan las preferencias de un usuario divididas verticalmente en dos zonas. En la parte izquierda se muestran los *tags* y las evaluaciones de las películas que le agradan al usuario, y en la parte derecha los que le desagradan. El objetivo de este trabajo es obtener un modelo lineal donde los coeficientes de afinidad del usuario para cada uno de los *tags* se obtienen a partir de las evaluaciones que el usuario realiza. Estos coeficientes pueden ser positivos, como los mostrados en el lado izquierdo de la figura 1, o negativos, como los que están a la derecha. Al leer el perfil del usuario del ejemplo, vemos que sus *tags* preferidos, en orden de mayor a menor preferencia, son: “miyasaki, superhero, boarding school, sequel, franchise, fantasy, adventure, pixar...”, y los *tags* de mayor preferencia negativa son: “talking animals, heartwarming, alternate reality, hilarious, underdog...”. Estos *tags* nos podrían dar una

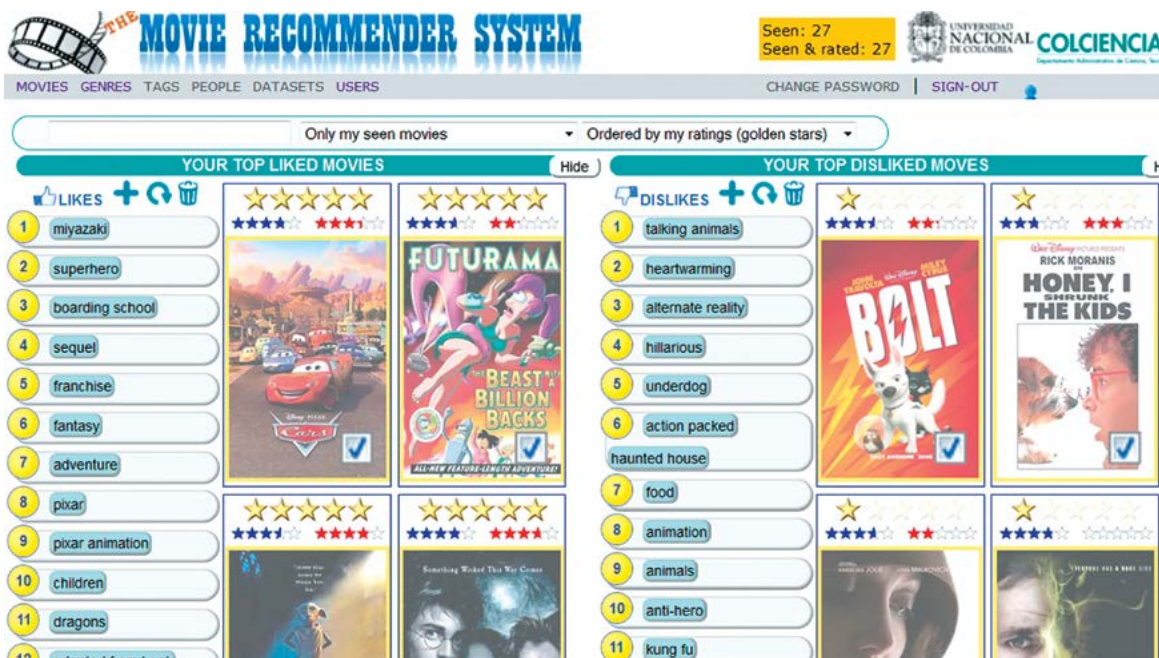


Figura 1. Ejemplo de perfil de usuario basado en *tags*.

Fuente: elaboración propia.

idea de las preferencias y del filtrado colaborativo que el sistema de recomendación utiliza para formular sus recomendaciones.

Ahora bien, para ilustrar la idea del potencial de interacción con los perfiles, en la figura 2 se muestran las nuevas recomendaciones que el usuario recibe después de ajustar su perfil insertando en primer lugar de preferencia los *tags* relacionados con las diferentes categorías de los premios Oscar. Como se puede observar, esta es una manera bastante rápida de escapar de la burbuja e inmediatamente recibir recomendaciones colaborativas de usuarios ya familiarizados con las películas y que las han etiquetado, sin dejar atrás su perfil.

En este trabajo se experimentó con la construcción de perfiles de usuario interpretables basados en *keywords* y en *tags*. Su alcance se centra en dos objetivos principales, a saber: 1) proponer un método para obtener perfiles interpretables y 2) comparar la calidad de las recomendaciones generadas con perfiles interpretables con aquellas obtenidas

con perfiles no interpretables utilizando el método de factorización de matrices. Como plataforma de pruebas se trabajó con los datos del sistema de recomendación de películas movieLens.org de la Universidad de Minnesota.

La organización de este artículo es la siguiente: en primer lugar se mostrará el trabajo relacionado en el cálculo de perfiles de usuario; posteriormente se explicará el modelo de cálculo propuesto; se describirá el marco experimental y las medidas de desempeño a utilizar; luego se mostrarán los resultados y, para terminar, se propondrá una visualización de los perfiles obtenidos.

TRABAJO RELACIONADO: EL MÉTODO DE FACTORIZACIÓN DE MATRICES

Probablemente, el método más preciso y popular utilizado para recomendar productos es la factorización de matrices (Bell R.M., Koren Y. & C, 2007; Koren, Bell, & Volinsky, 2009). En este modelo el

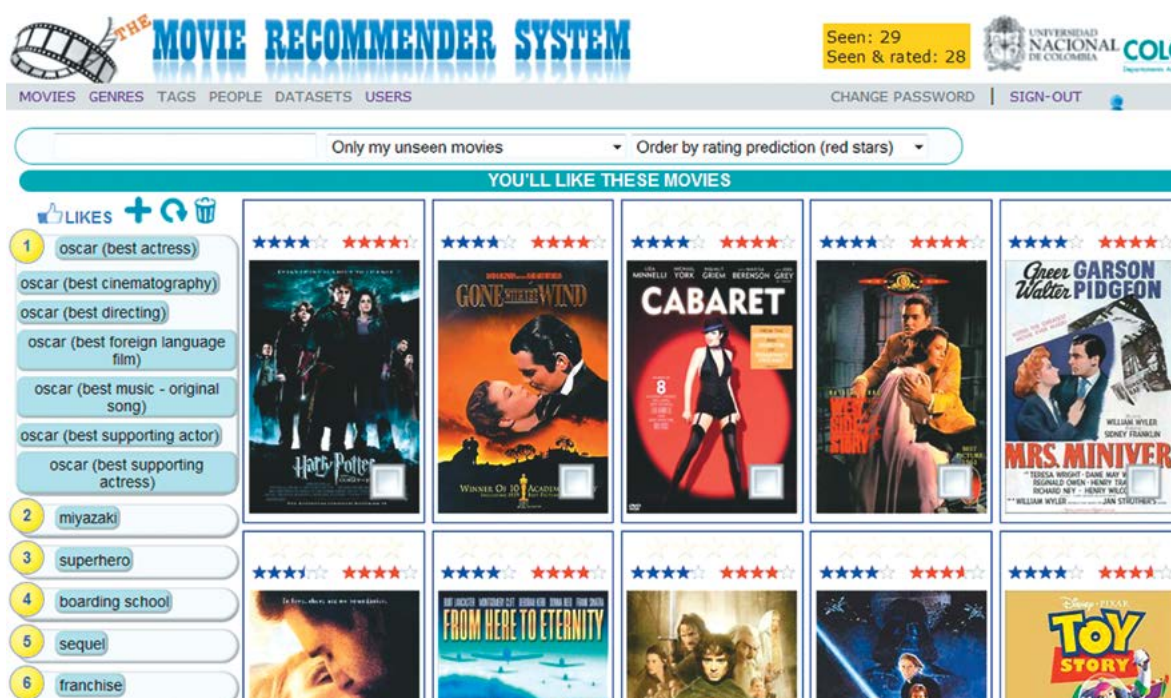


Figura 2. Ejemplo de interacción con perfiles de usuarios basados en *tags*.

Fuente: elaboración propia.

valor estimado de la evaluación (*rating*) \hat{r}_{um} que daría el usuario u al ítem m , es modelado como la suma de los sesgos del usuario y del ítem, más una medida de afinidad \hat{r}_{um} entre el usuario y el ítem. Para determinar esta afinidad, se encuentra la caracterización tanto de los usuarios como de los ítems, en un espacio abstracto de dimensión pre-establecida f , que da lugar a la medida de afinidad observada en los datos de entrenamiento. De esta manera, la parte de la evaluación explicada por la afinidad entre el usuario y el ítem podría escribirse como se plantea en la ecuación (1).

$$\hat{r}_{um} = \vec{U}_{u \rightarrow \mathcal{R}^f} \cdot (\vec{M}_{m \rightarrow \mathcal{R}^f}) \quad (1)$$

Donde $\vec{U}_{u \rightarrow \mathcal{R}^f}$ y $\vec{M}_{m \rightarrow \mathcal{R}^f}$ denotan la caracterización del usuario u y el ítem m en el espacio latente \mathcal{R}^f respectivamente. Aquí, la medida de afinidad utilizada es el producto punto. A su vez, los vectores de caracterización del usuario $\vec{U}_{u \rightarrow \mathcal{R}^f} = [U_{u1}, \dots, U_{ui}, \dots, U_{uf}]$ y del ítem $\vec{M}_{m \rightarrow \mathcal{R}^f} = [M_{m1}, \dots, M_{ui}, \dots, M_{mf}]$ están compuestos bien por los *coeficientes individuales de afinidad* en el caso de los usuarios, o por los *coeficientes de relevancia* M_{ui} en el caso de los ítems. El subíndice i define la i -ésima dimensión del espacio

latente, donde $1 \leq i \leq f$. Por tal razón la evaluación del producto puede describirse como la ecuación (2).

$$\hat{r}_{um} = \sum_{i=1}^f (U_{ui} \cdot M_{mi}) \quad (2)$$

En la cual los coeficientes de caracterización U_{ui} y M_{mi} se encuentran minimizando el error de predicción e_{um} , el cual se calcula con expresión de la ecuación (3).

$$e_{um} = \left(r_{um} - \sum_{i=1}^f (U_{ui} \cdot M_{mi}) \right)^2 \quad (3)$$

Para evitar el sobreajuste, es común introducir un coeficiente de regularización β que penaliza la norma de las caracterizaciones de los usuarios y los ítems. De esta manera el error regularizado de predicción \check{e}_{um} se define como la ecuación (4).

$$\check{e}_{um} = e_{um} + \beta \left(\|\vec{U}_{u \rightarrow \mathcal{R}^f}\|^2 + \|\vec{M}_{m \rightarrow \mathcal{R}^f}\|^2 \right) \quad (4)$$

Finalmente, los vectores de caracterización de usuarios e ítems son encontrados minimizando el error de estimación en el conjunto de entrenamiento en la ecuación (5).

$$\min_{\vec{U}_u, \vec{M}_m} \sum_{r_{um} \in \mathbb{R}_{U \times M} \wedge r_{um} \neq 0} \left(r_{um} - \sum_{i=1}^f (U_{ui} \cdot M_{mi}) \right)^2 + \beta \left(\|\vec{U}_{u \rightarrow \mathcal{R}^f}\|^2 + \|\vec{M}_{m \rightarrow \mathcal{R}^f}\|^2 \right) \quad (5)$$

Una vez encontrados los vectores \vec{U}_u y \vec{M}_m , se calcula la matriz de estimación de evaluaciones $\hat{\mathbb{R}}_{U \times M}$. Esta matriz se utilizará como base para nuestro método.

MÉTODO PROPUESTO

La explicación del modelo propuesto se hará en tres partes. En la primera se presentará el modelo general de cálculo de perfiles en espacios interpretables propuesto; en la segunda se explicará su

aplicación particular a espacios de palabras claves (*keywords*) extractadas directamente de las descripciones textuales de los productos, y en la tercera se explicará su aplicación a espacios de *tags* colaborativos.

Un método general para extracción de perfiles de usuario lineales

Una vez obtenida la matriz de estimación de ratings $\hat{\mathbb{R}}_{U \times M}$, con el método de factorización de

matrices, podemos asumir ahora que esta matriz es una consecuencia de la afinidad de los usuarios a los productos, pero ya no caracterizados en un espacio latente, sino en un espacio de características interpretables de tamaño , como se muestra en la ecuación (6).

$$\widehat{\mathbb{R}}_{U \times M} = \mathbb{U}_{U \times X} \cdot (\mathbb{M}_{M \times X})^T \quad (6)$$

Donde $\mathbb{U}_{U \times X}$ es la matriz de perfiles de usuarios en \mathcal{R}^X , y $\mathbb{M}_{M \times X}$ es la matriz de representación de los ítems en el espacio \mathcal{R}^X , corresponde al número de usuarios, y M corresponde al número de ítems. La matriz $\mathbb{U}_{U \times X}$, de tamaño $U \times X$ también puede ser expresada como en la ecuación (7).

$$\mathbb{U}_{U \times X} = \begin{bmatrix} U_{11} & \cdots & U_{1X} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ U_{U1} & \cdots & U_{UX} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{U}_{1 \rightarrow \mathcal{R}^X} \\ \vdots \\ \vec{U}_{U \rightarrow \mathcal{R}^X} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Donde U_{ux} representan los coeficientes de afinidad entre el u -ésimo usuario y la x -ésima dimensión en el espacio \mathcal{R}^X , para valores de $u \in \{1, \dots, U\}$ en y valores de $x \in \{1, \dots, X\}$. El vector $\vec{U}_{u \rightarrow \mathcal{R}^X}$ denota el perfil del usuario en el espacio \mathcal{R}^X .

De la misma manera, la matriz de perfiles de ítems caracterizados en el espacio \mathcal{R}^X , $\mathbb{M}_{M \times X}$ puede también expresarse como la ecuación (8).

$$\mathbb{M}_{M \times X} = \begin{bmatrix} M_{11} & \cdots & M_{1X} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{M1} & \cdots & M_{MX} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{M}_{1 \rightarrow \mathcal{R}^X} \\ \vdots \\ \vec{M}_{M \rightarrow \mathcal{R}^X} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Donde M_{mx} denota el coeficiente de relevancia del ítem m -ésimo en la x -ésima dimensión del espacio \mathcal{R}^X , para valores de $m \in \{1, \dots, M\}$ y $x \in \{1, \dots, X\}$. $\vec{M}_{m \rightarrow \mathcal{R}^X}$ representa el perfil del ítem m en el espacio \mathcal{R}^X .

Ahora es posible escoger un espacio interpretable \mathcal{R}^X en el cual la matriz de perfiles de producto $\mathbb{M}_{M \times X}$ sea conocida. Así, los perfiles de usuario pueden ser directamente calculados utilizando la ecuación (9).

$$\mathbb{U}_{U \times X} = \widehat{\mathbb{R}}_{U \times M} \cdot ((\mathbb{M}_{M \times X})^T)^\dagger \quad (9)$$

Donde $((\mathbb{M}_{M \times X})^T)^\dagger$ denota la pseudoinversa (Penrose & Todd, n.d.) de la transpuesta de la matriz de la representación de los ítems en \mathcal{R}^X , y $\widehat{\mathbb{R}}_{U \times M}$ es la matriz de evaluaciones conocidas.

Perfiles de usuario basados en palabras claves

La mayoría de enfoques de recomendación basados en descripciones textuales de producto (Lops *et al.*, 2011) utilizan el *modelo de espacio vectorial* (Salton, Wong, & Yang, 1975) para convertir las descripciones textuales de cada ítem m en vectores $\vec{M}_{m \rightarrow \mathcal{R}^W}$, cuyos componentes individuales, denotados por M_{mw} , cuantifican la relevancia de la palabra w para el ítem m .

Los coeficientes de relevancia pueden ser inferidos a partir de las ocurrencias de las palabras en la colección total de descripciones textuales de los ítems. La práctica más común es utilizar un esquema de pesado como *tf-idf* (Jones, 1972; Salton *et al.*, 1975) u Okapi BM-25 (Robertson, 2005). Estas técnicas hacen un balance entre la heurística de asignar pesos pequeños a palabras muy comunes en la colección y la de asignar pesos altos a las palabras frecuentes en una descripción de un ítem. Esta combinación de heurísticas busca encontrar las palabras más representativas para cada ítem.

Con las descripciones textuales de cada ítem, ya representadas como vectores $\vec{M}_{m \rightarrow \mathcal{R}^W}$, se forma la matriz de relevancia ítems-palabras $\mathbb{M}_{M \times W}$ a partir de la cual se calculan los perfiles de usuario $\vec{U}_{U \times W}$ evaluando la ecuación (10).

$$\mathbb{U}_{U \times W} = \widehat{\mathbb{R}}_{U \times M} \cdot ((\mathbb{M}_{M \times W})^T)^\dagger \quad (10)$$

Perfiles de usuario basados en tags

De la misma manera que en los perfiles de usuario basados en palabras, la matriz $\mathbb{U}_{U \times T}$ de perfiles de usuarios basados en *tags* es calculada utilizando la representación de los ítems en el espacio de *tags* $\mathbb{M}_{M \times T}$, evaluando la ecuación (11).

$$\mathbb{U}_{U \times T} = \hat{\mathbb{R}}_{U \times M} \cdot ((\mathbb{M}_{M \times T})^T)^\dagger \quad (11)$$

Los perfiles individuales de los productos $\vec{M}_{m \rightarrow \mathcal{R}^T}$, que componen la matriz $\mathbb{M}_{M \times T}$ pueden ser obtenidos utilizando una gran variedad de técnicas (Lops et al., 2011; Zhang, Zhou, & Zhang, 2011). El más simple de los enfoques consiste en una aplicación booleana, que asigna $M_{mt} = 1$ cuando el *tag* t ha sido asignado al ítem m y asigna $M_{mt} = 0$ en caso contrario. Es importante notar que en el método propuesto se pueden esperar mejores resultados cuando se utilizan *tags* independientes entre ellos. La independencia puede ser lograda agrupando *tags* que están morfológicamente relacionados utilizando *stemmers* (reducir las palabras a sus raíces) o lematizadores (reducir las palabras a sus lemas). Lops et al. (2009) fueron más allá agrupando los *tags* por similitud semántica utilizando *synsets* de WordNet (Fellbaum, 1998).

Los perfiles de ítems con coeficientes continuos también pueden ser obtenidos con métodos que combinan componentes manuales y automáticos. Por ejemplo, en el trabajo de Vig et al. (2012) se obtiene la relevancia de los *tags* a las películas realizando una encuesta y preguntando directamente a los usuarios la relevancia de los *tags* a los filmes. Con estos resultados se entrena un modelo de regresión basado en vectores de soporte (Smola & Schölkopf, 1998), que utiliza las descripciones textuales de los ítems para predecir los coeficientes de relevancia del vector de caracterización del ítem en el espacio de *tags*.

Como se observa, la propuesta plantea un modelo que independiza el método de caracterización de los ítems del método de caracterización de los perfiles de usuario.

METODOLOGÍA

Los experimentos realizados buscan evaluar la calidad de las recomendaciones producidas con los perfiles de usuario basados en palabras y en *tags* usando el método propuesto. Posteriormente se

comparan estos resultados con los obtenidos utilizando factorización de matrices. Además, esta sección contiene una descripción comprensiva de los datos y la medida utilizada para medir el desempeño de los métodos a comparar.

Datos utilizados

Los datos utilizados corresponden a la unión de los datos de movielens.org, con las descripciones de los productos extractados de la API de Netflix y los *tags* sociales empleados en el trabajo The Tag Genome (Vig, Jesse et al., 2012). A continuación se describe detalladamente el conjunto de datos conformado.

Información colaborativa en el dominio de filmes

El conjunto de usuarios, películas y evaluaciones (*ratings*) fue obtenido de la base de datos de producción del sistema MovieLens en abril de 2012. Este conjunto de datos se filtró extractando aquellos usuarios y películas con más de 1.000 evaluaciones. Así, este conjunto filtrado genera un subconjunto de 200 usuarios, 1.462 películas y 150.915 evaluaciones. La escala de evaluaciones es $\{1, 2, \dots, 5\}$, donde 5 corresponde al máximo grado de preferencia y 1 el mínimo. La distribución de evaluaciones en el conjunto de datos se muestra en la figura 3. Distribución de evaluaciones (*ratings*) en el subconjunto de datos de MovieLens. El número promedio de evaluaciones por película es 101.6 ($\sigma = 37.5$), y por usuario es 742.5 ($\sigma = 188.5$).



Figura 3. Distribución de evaluaciones (*ratings*) en el subconjunto de datos de MovieLens.

Fuente: elaboración propia.

Descripciones textuales de películas

Las descripciones textuales de las películas se obtuvieron utilizando el campo sinopsis de la API de Netflix (<http://developer.netflix.com>) durante el año 2012, y la correspondencia con los filmes de MovieLens se obtuvo mediante una cooperación de investigación con el grupo de investigación GroupLens (<http://www.grouplens.org>).

Estas descripciones textuales se representan como un modelo vectorial de bolsa de palabras. La dimensionalidad de esta representación se reduce con el ánimo de obtener un vocabulario basado en popularidad y relevancia. De esta manera se obtuvo un vocabulario de 5.848 palabras aplicando la siguiente serie de acciones de preprocesamiento: (1) todos los caracteres fueron convertidos a caracteres en minúsculas; (2) los nombres y apellidos de personas fueron concatenados con el símbolo “_”; (3) los números fueron removidos; (4) 334 palabras tomadas de la lista de palabras nulas (*stop words*) de *gensim* (<http://radimrehurek.com/gensim>) fueron removidas; (5) palabras que ocurren en menos de 10 sinopsis y en más del 95% de las sinopsis fueron removidas; y finalmente (6) todas las marcas de puntuación fueron retiradas.

Los pesos asignados a las palabras, con el fin de establecer la relevancia de la palabra en el vector de caracterización del ítem, fueron obtenidos con la fórmula de recuperación Okapi BM-25 (Robertson, 2005) utilizando el método propuesto por Vanegas, Caicedo, Camargo, & Ramos-Pollán (2012), en el cual el peso $w(p, d)$ de una palabra en un documento (sinopsis) d está dada por la ecuación (12).

$$w(p, d) = \log \left(\frac{M - df(p)}{M} \right) \frac{(k_1 + 1)tf(p, d)}{K + tf(p, d)}$$

$$K = k_1 \left((1 - b) + b \frac{dl(d)}{avdl} \right) \quad (12)$$

Donde, $df(p)$ es el número de documentos (sinopsis) en el cual aparece la palabra p , $M = 1.462$ es el número de películas, $tf(p, d)$ es el número de ocurrencias de la palabra p en el documento d , y $avdl = 33$ es el largo promedio de los

documentos. Los parámetros adicionales k_1 y b se asignan en 1,2 y 0,75, respectivamente (Robertson, 2005). En la tabla 1 se muestran dos ejemplos de representación vectorial basada en palabras de las películas *Bewitched* (2005) y *Rocky V* (1990). La agregación de los vectores obtenidos produce la matriz de perfiles de producto $\mathbb{M}_{M \times W}$, cuyas dimensiones son $M = 1.462$ películas y $W = 5.848$ palabras. Esta matriz es dispersa con solo 0,518% de entradas diferentes a cero.

Tabla 1. Ejemplos de palabras clave (keywords) en las descripciones de Netflix

Filme: *Bewitched* (2005)

will_ferrell (0,237), *jack* (0,147), *update* (0,142), *samantha* (0,131), *sitcom* (0,131), *witch* (0,119), *nicole_kidman* (0,119), *convinced* (0,116), *michael_caine* (0,114), *right* (0,107), *hoping* (0,105), *know* (0,103), *career* (0,099), *perfect* (0,098), *doesn't* (0,097), *actor* (0,092), *make* (0,068), *film* (0,045)

Filme: *Rocky V* (1990)

burt_young (0,249), *talia_shire* (0,242), *broke* (0,15), *upandcoming* (0,150), *shots* (0,150), *boxer* (0,150), *crooked* (0,142), *trainer* (0,136), *glory* (0,136), *accountant* (0,131), *ended* (0,131), *lifetime* (0,128), *memory* (0,124), *training* (0,124), *rocky* (0,121), *inspired* (0,107), *taking* (0,101), *career* (0,099), *left* (0,092), *series* (0,071), *takes* (0,063), *finds* (0,058)

Fuente: elaboración propia.

Tags sociales

El conjunto de *tags* utilizados para caracterizar las películas es la selección de *tags* propuesta por Vig *et al.* en The Tag Genome (2012), en la cual se escogen 1.128 *tags* de los cerca de 30.000 *tags* libremente aplicados en el sistema MovieLens. Para su obtención se removieron: *tags* con menos de 10 aplicaciones, *tags* con errores de digitación, nombres de personas y duplicados cercanos. Por último se seleccionaron el 95% de ellos ordenados de acuerdo con la métrica de calidad basada en entropía propuesta por Sen, Harper, LaPitz, & Riedl (2007). Solo 1.081 *tags* de la selección de Vig *et al.* (2012) ocurrieron en los 1.462 filmes. De esta manera las dimensiones finales de la matriz de perfiles de ítems $\mathbb{M}_{M \times T}$ son 1.462 x 1.081.

En el conjunto de datos existen 13.332 aplicaciones de *tags* a las películas. Esto corresponde a 1.370 filmes que tienen al menos un *tag* asociado, para un promedio de 9,7 aplicaciones por película ($\sigma = 8,5$). En consecuencia, la matriz de perfiles de ítems es dispersa, con una densidad de 0,844% de entradas diferentes a 0. La distribución de *tags* es considerablemente más uniforme que la distribución Zipf (1950). Así, los 108 *tags* más frecuentes (10%) representan solo el 42% de las aplicaciones de *tags*. Esto se puede ver en la tabla 2, en la cual se muestran ejemplos de *tags* seleccionados de rangos de frecuencia uniformemente separados (e.g. “based on a book” es el *tag* más frecuente).

Tabla 2. Ejemplos de *tags* del conjunto seleccionado de 1.128 *tags* de MovieLens*

| Rango | Ejemplos de <i>tags</i> |
|-------|--|
| 1-3 | <i>based on a book</i> (194), <i>comedy</i> (182), <i>classic</i> (143) |
| 9-12 | <i>boring</i> (107), <i>70mm</i> (193), <i>romance</i> (98), <i>quirky</i> (91) |
| 17-19 | <i>sci fi</i> (78), <i>stylized</i> (64), <i>adventure</i> (62), <i>humorous</i> (62) |
| 25-26 | <i>crime</i> (53), <i>sequel</i> , <i>tense</i> , <i>violence</i> , <i>remake</i> (52) |
| 34-35 | <i>animation</i> (42), <i>politics</i> , <i>satirical</i> , <i>war</i> , <i>hilarious</i> (41) |
| 42 | <i>bittersweet</i> (34), <i>gay</i> , <i>historical</i> , <i>musical</i> , <i>suspense</i> |
| 50 | <i>forceful</i> (26), <i>military</i> , <i>satire</i> , <i>small town</i> , <i>very good</i> |
| 59 | <i>cult classic</i> (17), <i>dark humor</i> , <i>earnest</i> , <i>epic</i> , <i>japan</i> {17} |
| 67 | <i>action packed</i> (9), <i>alien</i> , <i>aviation</i> , <i>based on comic</i> {41} |
| 75 | <i>3d</i> (1), <i>adoption</i> , <i>airplane</i> , <i>alcatraz</i> , <i>arms dealer</i> : {80} |

* Se coloca en paréntesis el número de películas asociadas al *tag*; si no se coloca, es el mismo número del *tag* precedente. El número de *tags* en el mismo rango es mostrado en corchetes; si no aparece es porque se mostraron todos los *tags* en el mismo rango.

Fuente: elaboración propia.

Medición del desempeño

Con el objetivo de evaluar la calidad de las recomendaciones producidas por los métodos propuestos, se proveen dos escenarios de validación en 10 hojas: validación cruzada y *arranque en frío de producto* (Schein, Penneck, & Ungar, 2002). En el escenario de validación cruzada las evaluaciones se permutan aleatoriamente y se dividen en 10

hojas. En cada hoja, 90% de las evaluaciones son utilizadas para entrenamiento y el restante 10% para pruebas. En el escenario de arranque en frío el procedimiento es el mismo, pero todas las evaluaciones de los ítems incluidos en el conjunto de evaluación son eliminadas.

La medida de rendimiento utilizada para establecer la calidad de las recomendaciones es la raíz del error medio cuadrático (RMSE, por sus iniciales en inglés), definido como se muestra en la ecuación (13).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{\{r_{um}\} \in test} (\hat{r}_{um} - r_{um})^2}{|test|}} \quad (13)$$

Donde *test* es el conjunto de datos de evaluación (usuario, ítem, evaluación) y *test* es su cardinalidad.

Métodos de línea de base

En el escenario de validación cruzada los resultados se comparan contra los resultados obtenidos con el método de factorización de matrices, expuesta en la primera sección. El número de factores latentes utilizado es 30 y el parámetro de regularización se establece en 0.07. La minimización de la función de error se realiza utilizando el método de optimización LBFGSB (Byrd, Lu, Nocedal, & Zhu, 1995).

En el escenario de arranque en frío de ítems, el método de línea de base empleado es la evaluación promedio en el sistema más la desviación promedio del usuario. Esto en razón a que los ítems sin evaluaciones no pueden ser caracterizados en el espacio latente.

RESULTADOS

Los resultados de los experimentos realizados se presentan en la tabla 3. Los errores mostrados corresponden al error promedio en 10 hojas, en cada uno de los escenarios de prueba, y la columna σ muestra la desviación estándar del error. Las primeras dos filas muestran los resultados para los métodos de línea de base propuestos para cada

Tabla 3. Resultados obtenidos

| MÉTODO | Arranque en frío | | Validación cruzada | |
|---|------------------|----------|--------------------|----------|
| | RMSE | σ | RMSE | σ |
| Promedio del sistema más sesgo de usuario | 1,065 | 0,022 | - | - |
| LBFGSB regularizado (Factorización con 30 factores) | - | - | 0,995 | 0,010 |
| Perfiles basados en palabras (Factors+Norm[-1,1]) | 1,052 | 0,015 | 0,939 | 0,016 |
| Perfiles basados en tags (Factors +Norm[-1,1]) | 1,062 | 0,021 | 0,985 | 0,012 |

Fuente: elaboración propia.

uno de los escenarios de prueba propuestos, y las siguientes filas presentan los errores de predicción obtenidos con los métodos de perfilado de usuarios basados en palabras y en tags, respectivamente.

Respecto al escenario de validación cruzada, los resultados muestran que los métodos propuestos superan al método de línea de base. Particularmente, la mejora reportada por el método de perfilado basado en palabras es significativa, al estar la medida de rendimiento (error) más de tres desviaciones estándar por debajo.

El escenario de validación de arranque de productos en frío es claramente más desafiante. Como se observa, los métodos de recomendación propuestos escasamente superan el promedio. Sin embargo nuestros métodos muestran ser coherentes en ambos escenarios de prueba, manteniendo la interpretabilidad y la capacidad explicativa del modelo.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos se pueden sacar dos conclusiones importantes: *i)* el método propuesto permite generar recomendaciones de la misma calidad que el método de factorización de matrices, y *ii)* el método para obtener los perfiles permite aprovechar las diferentes representaciones de los productos, en los diferentes espacios. Ejemplo de esto fue el uso del método de representación de las películas utilizando el modelo de bolsa de palabras con pesaje Okapi BM-25, el cual influye en los buenos resultados obtenidos con el perfil basado en palabras claves. Asimismo, muy probablemente el uso de la representación en términos

de tags con pesaje booleano interfirió negativamente en los resultados.

Ahora pasaremos a observar, y a comparar, los perfiles obtenidos. El propósito de esta comparación es discutir el potencial de uso y la interpretabilidad de los perfiles obtenidos basados en palabras claves y en tags. Con este objetivo en mente, se selecciona un usuario cuyos gustos son muy populares entre los usuarios del sistema, pero también son rechazados por un gran número de usuarios. Para esto se calcula la matriz de correlación de Pearson usuario-usuario, utilizando los perfiles basados en palabras $U_{U \times W}$ encontrados, y se escoge el usuario con mayor número e intensidad de correlaciones tanto positivas como negativas. Dado que los usuarios son anónimos en el conjunto de datos, nos referiremos a este usuario como el *usuario 156*. En la figura 4 se muestra una visualización de los perfiles basados en palabras claves y en tags.

En la figura 4 se muestra en color negro el perfil del usuario 156 y en colores los perfiles de los 10 usuarios más correlacionados con él. La parte izquierda de la figura (figura 4a) muestra el perfil basado en palabras, y a la derecha (figura 4b) se muestra el perfil basado en tags. A su vez, para cada perfil se muestran los dos extremos. En el extremo izquierdo se muestran las 40 palabras, o tags, con mayores coeficientes de afinidad, que más inciden en la evaluación positiva del ítem; y en el extremo derecho se muestran las palabras o tags con menores coeficientes de afinidad y que más inciden en la baja evaluación de los ítems que los contienen.

Ahora, se analizará la legibilidad del perfil. Si observamos el perfil basado en palabras, no es

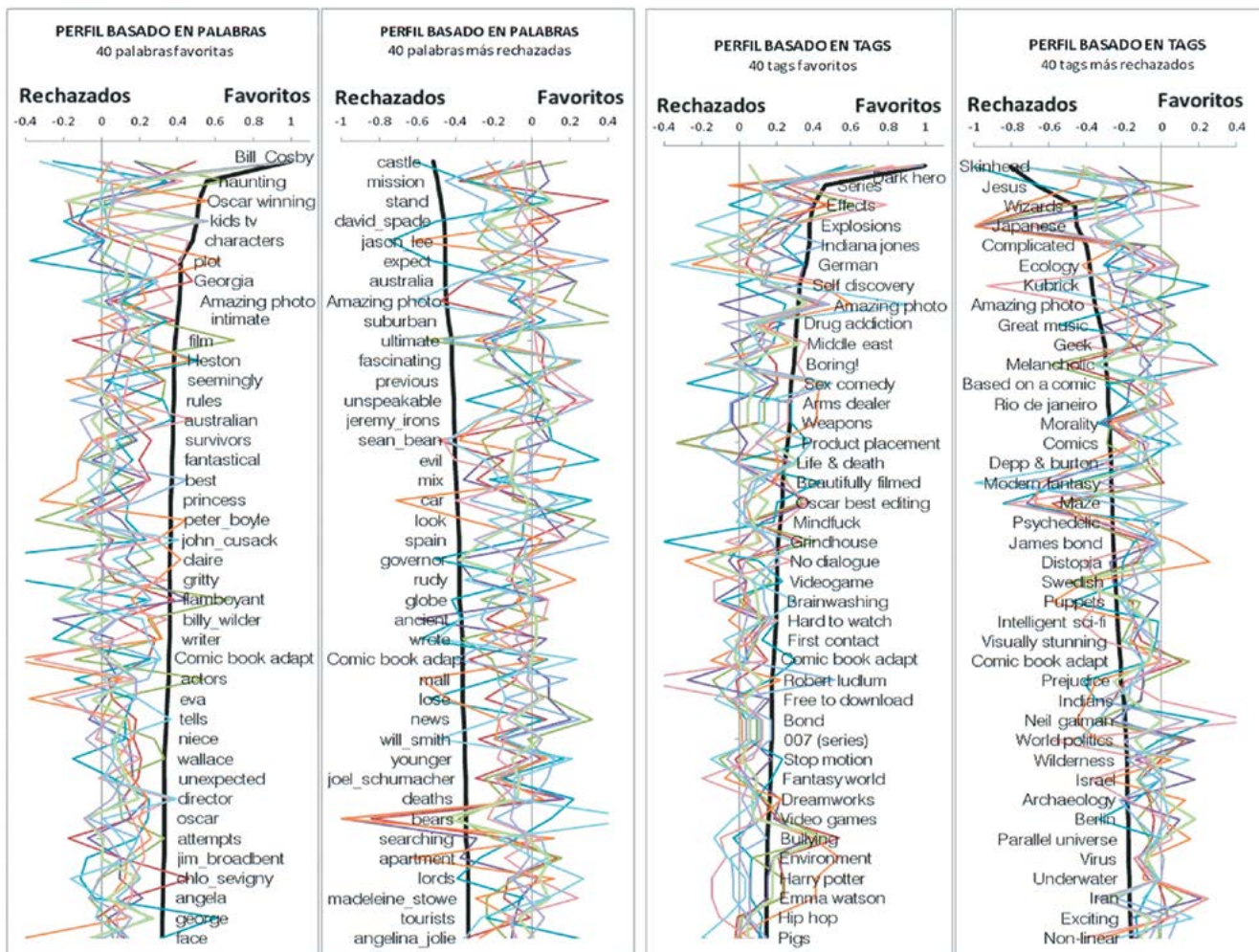


Figura 4. Perfiles basados en palabras claves y en tags del usuario 156 (en negro) y de los 10 usuarios más similares a él (en colores). Para cada perfil se muestra a la izquierda las 40 palabras o tags con mayores coeficientes de afinidad, o los “favoritos”, y a la derecha las 40 palabras o tags con menores coeficientes de afinidad o los “más rechazados”.

Fuente: elaboración propia.

posible observar un patrón claro. A diferencia de este, en el perfil basado en tags se observa que 20 de los 40 tags favoritos del usuario se relacionan con películas de acción e infantiles y para adolescentes. Estos tags son: *Dark hero*, *Effects*, *Explosions*, *Indiana jones*, *German*, *Drug addiction*, *Arms dealer*, *Weapons*, *Life & death*, *Videogame*, *First contact*, *Comic book adapt*, *Bond*, *007 series*, *Stop motion*, *Fantasy world*, *Dreamworks*, *Video games*, *Harry potter*, *Emma Watson*. Esta observación particular nos permite obtener nuestra tercera

y última conclusión: los perfiles de usuarios basados en tags se plantean como un interesante artefacto de interacción con usuarios, dada su interpretabilidad y coherencia.

AGRADECIMIENTOS

Especiales gracias al profesor John Riedl (q.e.p.d.) de la Universidad de Minnesota, y al profesor Shilad Sen del Macalester College, quienes inspiraron este artículo.

Financiamiento

Este trabajo fue financiado por Colciencias y la Universidad Nacional de Colombia, proyecto 1101-521-28465. El profesor Alexander Gelbukh agradece al Gobierno Mexicano (SNI, COFAA-IPN, SIP 20131702, CONACYT 50206-H) y CONACYT-DST.

REFERENCIAS

- Bell R.M., Koren Y., & C, V. (2007). The BellKor solution to the Net Flix Prize. *Technical Report, AT&T Labs Research*. doi:http://www.netflixprize.com/assets/ProgressPrize2007_KorBell.pdf
- Byrd, R. H., Lu, P., Nocedal, J., & Zhu, C. (1995). A limited memory algorithm for bound constrained optimization. *SIAM J. Sci. Comput.*, 16(5), 1190–1208. doi:10.1137/0916069
- Fellbaum, C. (1998). *WordNet An Electronic Lexical Database*. Cambridge, MA ; London: The MIT Press. Retrieved from <http://mitpress.mit.edu/catalog/item/default.asp?type=2&tid=8106>
- Jones, K. S. (1972). A statistical interpretation of term specificity and its application in retrieval. *Journal of Documentation*, 28, 11-21.
- Koren, Y., Bell, R., & Volinsky, C. (2009). Matrix Factorization Techniques for Recommender Systems. *Computer*, 42(8), 30-37. doi:10.1109/MC.2009.263
- Lops, P., Gemmis, M., & Semeraro, G. (2011). Content-based Recommender Systems: State of the Art and Trends. In F. Ricci, L. Rokach, B. Shapira, & P. B. Kantor (Eds.), *Recommender Systems Handbook* (pp. 73-105). Springer US. Retrieved from http://dx.doi.org/10.1007/978-0-387-85820-3_3
- Lops, P., Gemmis, M., Semeraro, G., Musto, C., Narducci, F., & Bux, M. (2009). A Semantic Content-Based Recommender System Integrating Folksonomies for Personalized Access. In G. Castellano, L. Jain, & A. Fanelli (Eds.), *Web Personalization in Intelligent Environments* (Vol. 229, pp. 27–47). Springer Berlin Heidelberg. Retrieved from http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-02794-9_2
- Penrose, R., & Todd, J. A. (n.d.). On best approximate solutions of linear matrix equations. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, null(01), 17–19. doi:10.1017/S0305004100030929
- Robertson, S. (2005). How Okapi Came to TREC. In E. M. Voorhees & D. K. Harman, *TREC: Experiment in Information Retrieval* (pp. 287–300). MIT Press.
- Salton, G., Wong, A. K. C., & Yang, C.-S. (1975). A vector space model for automatic indexing. *Commun. ACM*, 18(11), 613–620.
- Schein, A., Pennock, D., & Ungar. (2002). Methods and metrics for cold-start recommendations. In *SIGIR* (pp 253-260). New York, NY, USA: ACM
- Sen, S., Harper, F. M., LaPitz, A., & Riedl, J. (2007). The quest for quality tags. In *Proceedings of the 2007 International ACM Conference on Supporting Group Work* (pp. 361–370). New York, NY, USA: ACM.
- Smola, A. J., & Schölkopf, B. (1998). A Tutorial on Support Vector Regression. *Royal Holloway College, London, U.K., NeuroCOLT Tech. Rep. TR 1998-030, 1998*.
- Vanegas, J. A., Caicedo, J. C., Camargo, J. E., & Ramos-Pollán, R. (2012). Bioingenium at Image. CLEF 2012: Textual and Visual Indexing for Medical Images. In *CLEF (Online Working Notes/Labs/Workshop)*. Rome, Italy.
- Vig, Jesse, Sen, S., & Riedl, J. (2012). The Tag Genome: Encoding Community Knowledge to Support Novel Interaction. *ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems*, 2(3). (pp 13:1-13:44)
- Zhang, Z.-K., Zhou, T., & Zhang, Y.-C. (2011). Tag-Aware Recommender Systems: A State-of-the-Art Survey. *Journal of Computer Science and Technology*, 26(5), 767–777. doi:10.1007/s11390-011-0176-1
- Zipf, G. K. (1950). Human behavior and the principle of least effort. *Journal of Clinical Psychology*. Adisson Wesley, 6(3). doi:10.1002/1097-4679(195007)6:3<306::AID-JCLP2270060331>3.0.CO;2-7





Minería de datos aplicada a la demanda del transporte aéreo en Ocaña, Norte de Santander

Data mining applied to demand of air transport in Ocaña, North Santander

Alveiro Alonso Rosado Gómez*, Alejandra Verjel Ibáñez**

Fecha de recepción: 2 de octubre de 2014

Fecha de aceptación: 6 de abril de 2015

Como citar: ARosado Gómez, A. A., & Verjel Ibáñez, A. (2015). Minería de datos aplicada a la demanda del transporte aéreo en Ocaña, Norte de Santander. *Revista Tecnura*, 19(45), 101-113. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.3.a08

RESUMEN

Este artículo muestra la aplicación de la minería de datos para predecir la demanda del servicio aéreo en Ocaña, Norte de Santander, respecto a los pares origen-destino Ocaña-Bogotá, Ocaña-Bucaramanga, Ocaña-Medellín, Ocaña-Cúcuta, Ocaña-Barranquilla; se utilizan datos de estudios realizados para estimar la demanda de un nuevo medio de transporte en la ciudad. Esta investigación sigue las fases del proceso de extracción del conocimiento en bases de datos. En la etapa de minería de datos se seleccionó como técnica los árboles de decisión y como algoritmo el J48. Con la aplicación de este algoritmo se encontró que las personas que viajan mensual y semanalmente eligen el avión, igual que si viajan por motivos de salud; si trabajan y se dirigen a Barranquilla, Bogotá y Medellín, eligen la buseta.

Palabras clave: árboles de decisión, minería de datos, modos de transporte, WEKA.

ABSTRACT

This paper shows data mining techniques to predict air tickets demand in Ocaña, North Santander, regarding to origin-destination: Ocaña-Bogota, Ocaña-Bucaramanga, Ocaña-Medellín, Ocaña – Cúcuta and Ocaña-Barranquilla. Some data studies were used to estimate new means of transportation demand in Ocaña. This research follows the process of knowledge extraction in databases. In the data mining process stage, it was selected decision trees technique and as algorithm J48. With this algorithm application, we found that people who travel monthly and weekly choose the plane, alike if they travel by health issues; otherwise, but if they travel to Barranquilla, Bogotá and/or Medellín for work, they choose bus.

Keywords: data mining, decision trees, modes of transport, WEKA.

* Ingeniero de sistemas, magister en Gestión, Aplicación y Desarrollo de Software. Director del Departamento de Sistemas e Informática, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Ocaña, Colombia. Contacto: aarosadog@ufpso.edu.co

** Ingeniera de sistemas. Profesional de apoyo, Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña, Colombia. Contacto: averjeli@ufpso.edu.co

INTRODUCCIÓN

La minería de datos ha sido de gran utilidad para la extracción de conocimiento en muchos ámbitos gracias a su función, ya que es una de las formas más sofisticadas de extraer información importante y relevante a partir de una base de datos (Roland, Uhrmacher, & Saha, 2009), utilizando técnicas para encontrar patrones y crear modelos con dicha información.

Es primordial para el éxito de los negocios conocer el comportamiento de las tendencias y de las personas, por esto la minería de datos se convierte en una herramienta muy útil para identificar las preferencias sobre un determinado bien o servicio, prediciendo y extrayendo información importante, de modo que permite descubrir conocimientos que con otros métodos no es posible (Ferri, Flach, & Hernández-Orallo, 2002).

Este artículo muestra una aplicación de las técnicas de minería de datos, en la cual es posible determinar el comportamiento de la elección modal de transporte interurbano en el municipio de Ocaña, ante escenarios hipotéticos de elección dada la implementación de rutas en transporte aéreo que conducen a los cinco destinos más frecuentes: Bogotá, Medellín, Barranquilla, Bucaramanga y Cúcuta. Las técnicas de minería de datos utilizadas emplean las etapas del proceso de extracción del conocimiento en base de datos —Knowledge Discovery in Databases (KDD)— correspondientes a: selección de datos, preprocesamiento, transformación, minería de datos e interpretación y evaluación (Fayyad, Piatetsky, Smyth, & Uthurusamy, 1996).

Para el municipio de Ocaña, Norte de Santander, es muy importante que exista una nueva alternativa de viaje como lo es, en este caso, el modo aéreo, dado que solo cuenta con transporte vía terrestre (Alcaldía de Ocaña, 2010); por esta razón, muchas personas que deseen tener más comodidad a la hora de viajar o quieran una duración corta de viaje no tienen la opción de escoger entre varios modos al existir solo uno.

Para procesar toda la información se realizó un análisis de las técnicas de predicción disponibles en el entorno para análisis del conocimiento de la Universidad de Waikato, Waikato Environment for Knowledge Analysis (WEKA), se eligió el mejor algoritmo, se generó el modelo y se validó para evaluar su capacidad de clasificar correctamente las instancias.

Técnicas de minería de datos y su aplicación en modelos de transporte

Dentro de las técnicas de minería de datos, se encuentran las predictivas y las descriptivas (Quinlan, 1986). En esta investigación se emplearon para el análisis las técnicas predictivas, las cuales tienen tareas de clasificación y regresión (Kohavi & Quinlan, 2002), por lo tanto, para la selección de la técnica y el algoritmo más adecuado se estudió el conjunto de datos por medio de métodos bayesianos, árboles de decisión, redes neuronales y regresión logística (Caruana & Niculescu, 2006); el análisis discriminante no se tuvo en cuenta, ya que no está disponible en la versión utilizada de WEKA (Hall, Eibe, Holmes, Pfahringer, Reutemann, & Witten, 2009), siendo este el software utilizado en el proceso de investigación.

En la literatura se reportan algunas experiencias del uso de la minería de datos en modelos de transporte y aplicaciones afines, como es el caso de Arentze y Timmermans (2007), quienes usaron técnicas basadas en reglas, tales como árboles de decisión, ideales para representar los efectos discontinuos de las variables independientes sobre el comportamiento de elección discreta en transportes o sistemas espaciales; de esta forma se muestra cómo dicho enfoque reemplaza al modelo logit convencional, multinomial logistic regression (MNL) (Akiva & Lerman, 1985) y es utilizado para incorporar la sensibilidad del viaje a atributos como el costo. Los resultados indican que el modelo puede reproducir rangos realistas de elasticidades precio de la demanda de viajes.

Xie, Lu y Parkany (2003) decidieron enfocar su investigación con la premisa de que la elección del modo de transporte puede ser considerada como un problema de reconocimiento de patrones en los que el comportamiento humano refleja múltiples patrones a partir de variables explicativas que determinan las elecciones entre alternativas o clases. Este trabajo investigó la capacidad y el rendimiento en la elección del modo de viaje a partir de dos técnicas, como son los árboles de decisión y patrones de redes neurales. Los resultados de la predicción muestran que los dos modelos de minería de datos son de rendimiento comparable, pero ligeramente mejores que el modelo MNL (el tradicional modelo de elección discreta de raíces econométricas) en términos de los resultados de los modelos; mientras que el modelo de árboles de decisión demuestra eficacia de más alta estimación e interpretación más explícita, el modelo de redes neuronales da una predicción de rendimiento superior en la mayoría de los casos.

Investigaciones más recientes, como las reportadas por De Oña, J., De Oña, R., & Calvo, F. (2012), han aplicado técnicas de minería de datos para estudiar y mejorar los servicios en términos de calidad del servicio para la operación de tránsito en España. La metodología utilizada fue un modelo de árbol de decisión, el cual no necesita ni las hipótesis del modelo ni relaciones predefinidas entre las variables independientes y las variables dependientes. Siguiendo esta dirección y debido a los poderosos resultados obtenidos con el modelo de árbol de decisión, el interés de los autores por otras técnicas de minería de datos se incrementó.

METODOLOGÍA

Selección, preprocesamiento y transformación de datos

En las primeras etapas del proceso de extracción del conocimiento en base de datos, se seleccionó el conjunto de datos por evaluar, obtenidos de un estudio previo (Guerrero, Criado, & León, 2013),

en el cual se tuvieron en cuenta algunos datos del último viaje interurbano realizado, características socioeconómicas del viajero y del viaje realizado, teniendo como etiqueta de clase el atributo *choice*, el cual incluye los modos de transporte disponibles para realizar dicho estudio, que son el avión (como caso hipotético), el taxi, el bus y la buseta como opciones disponibles en la actualidad.

Para un análisis adecuado en minería de datos es necesario definir los atributos relevantes; es decir, establecer un filtro para seleccionar los atributos que influyen sobre el valor de la clase antes de empezar con el aprendizaje para asegurar la calidad de los datos y mejorar el desempeño predictivo (Castillo, Mendoza, & Poblete, 2011). En este caso, se utilizaron algoritmos de búsqueda y ranqueo (Hall & Holmes, 2003), posteriormente se seleccionaron los datos por la frecuencia con la cual aparecen y así tomar los más relevantes (Van Hulse, M. Khoshgoftaar, & Napolitano, 2007) y descartar los atributos que tienen menos de cinco veces de aparición en los resultados de los algoritmos implementados (Guyon & Elisseeff, 2003).

Luego de seleccionar los atributos que intervienen en la clase, se realizó su discretización transformando los datos nominales a discretos formando intervalos (Agrawal & Aggarwal, 2001), debido a que los algoritmos de predicción disponibles en WEKA solo reconocen este tipo de datos (Goebel & Gruenwald, 1999).

Minería de datos

En esta etapa se realizó un análisis de cada uno de los algoritmos pertenecientes a las técnicas predictivas (Fayyad, Piatetsky, Smyth, & Uthurusamy, 1996), como los métodos bayesianos, los árboles de decisión, las redes neuronales y la regresión logística (Quinlan, 1989). Se aplicó como opción de prueba *percentage split*, con el 80% para la construcción del modelo y el 20% para la evaluación (Baumgartner & Serpen, 2009), teniendo en cuenta que se emplea como etiqueta de clase el *choice*, es

decir, la elección del modo de transporte, como el avión, el bus, la buseta y el taxi. En las tablas 1, 2, 3 y 4 se presentan los algoritmos de cada técnica con su respectivo porcentaje de acierto y de error.

Tabla 1. Árboles de decisión

| Algoritmo | % de acierto | % de error |
|----------------|---------------|----------------|
| BFTree | 70% | 30% |
| Decision Stump | 46,66% | 53,33% |
| Id3 | 70% | 26,66% |
| J48 | 77,77% | 22,222% |
| LAD Tree | 72,22% | 27,77% |
| LMT | 71,88% | 28,11% |
| NBTree | 67,77% | 32,22% |
| Random Forest | 66,66% | 33,33% |
| Random Tree | 64,44% | 35,55% |
| REP Tree | 64,44% | 35,55% |
| Simple Cart | 73,33% | 26,66% |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Métodos bayesianos

| Algoritmo | % de acierto | % de error |
|-------------|--------------|------------|
| Bayes Net | 57,77% | 42,22% |
| Naive Bayes | 56,66% | 43,33% |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Redes neuronales

| Algoritmo | % de acierto | % de error |
|-----------------------|--------------|------------|
| Multilayer Perceptron | 67,7778% | 32,2222% |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Regresión logística

| Algoritmo | % de acierto | % de error |
|-----------|--------------|------------|
| Logistic | 75,5556% | 24,4444% |

Fuente: Elaboración propia

Todos estos porcentajes demuestran la eficacia del algoritmo J48 para realizar el análisis al conjunto de datos, con un acierto de 77,77% y un 22,22% de error, por lo tanto se seleccionó esta técnica para extraer el conocimiento.

El algoritmo J48 extiende las funcionalidades del algoritmo C4.5, como aceptar la realización del proceso de poda por medio de la reducción del error (Yoav & Schapire, 1996); los árboles de decisión muestran organizados eficientemente los atributos, teniendo en cuenta la entropía, la cual está dada por la ecuación (1).

$$P_n = (1 - P_p) \quad (1)$$

Siendo,

P_p = Es la probabilidad de que las respuestas sean positivas.

P_n = Es la probabilidad de que las respuestas sean negativas.

La entropía se define con base en las probabilidades anteriores (ecuación (2)).

$$H(S) = -p_p \log_2 p_p - p_n \log_2 p_n \quad (2)$$

Cuanto menor sea el valor de la entropía, más ordenados se encuentran los datos; para clasificar los datos se utiliza la ganancia de información, la cual es la encargada de reducir la entropía y decidir qué atributo es el más apropiado para usar en cada nodo del árbol (Martínez, Solarte, & Soto, 2011). La fórmula de ganancia de información está dada por la ecuación (3).

$$G(S, A) = H(S) - H(S, A) \quad (3)$$

Siendo,

$H(S)$ = Entropía de S.

$H(S, A)$ = Sumatoria de entropías.

El resultado del algoritmo J48 generó un árbol de 71 hojas y un tamaño de 107 (suma de nodos

Dentro de los valores numéricos se encuentran el *root mean squared error* con un valor de 0,3105, el *relative absolute error* con un porcentaje de 41,65% y el *root relative squared error* con un porcentaje de 74,44%. Todos estos valores se utilizan para la predicción numérica en lugar de la clasificación; en la predicción numérica, estos errores reflejan una magnitud (Nishimura & Hirose, 2007).

Detalle de precisión por clase

Los detalles de precisión por clase son otra parte del resultado de la ejecución del algoritmo J48 en WEKA. Estos resultados se pueden visualizar en la tabla 6, la cual muestra los verdaderos positivos (*TP rate*), los falsos positivos (*FP rate*), la precisión, el *recall*, el *F-Measure* y el área bajo la curva, Receiver Operating Characteristic (ROC).

Como se puede observar en la tabla 6, los verdaderos positivos (*TP rate*) para la clase AVIÓN superan el 74,3%, lo cual quiere decir que el árbol clasifica correctamente las instancias (Witten, Hall, Holmes, Pfahringer, & Reutemann, 2009).

Los falsos positivos (*FP rate*) tienen valores bajos, lo cual demuestra que el modelo pocas veces no clasifica correctamente las instancias (Fawcett, 2004).

Con respecto a la precisión, el porcentaje de acierto del modelo luego de hacer las clasificaciones en cada clase, se puede observar que los valores son elevados, lo cual demuestra que el modelo mide de la mejor manera las instancias correctamente reconocidas respecto al total de instancias predichas.

En los resultados de la cobertura (*recall*) se puede observar que son altos, lo que quiere decir que

son favorables porque reconoce las instancias correctamente en cuanto a los términos reales; está dada por:

El *recall* y la precisión están relacionadas entre sí, ya que cuando aumenta el *recall* (la cobertura) disminuye la precisión o al contrario, si disminuye la cobertura aumenta la precisión. Se puede notar que en la clase AVIÓN el *recall* (la cobertura) disminuye, en la clase BUS, se mantiene en 80%, mientras que aumenta en las clases TAXI y BUSETA.

El *F-Measure* muestra la bondad del modelo, en la que cuanto más cercana sea a 1, mayor será la confiabilidad del modelo. Tal como se observa en la tabla 6, el modelo demuestra ser confiable porque todos los valores de la clase se acercan a 1. El *F-Measure* está dado por la ecuación (4).

$$F - Measure = \frac{2 \times recall \times precision}{recall + precision} \quad (4)$$

El ROC area o área bajo la curva entre los verdaderos positivos (eje Y) y los falsos positivos (eje X), cuanto más cercano sea a 1 el test es visto como excelente (Ferri, Flach, & Hernández-Orallo, 2002). En esta investigación los resultados obtenidos son favorables, ya que la mayoría están cercanos a 1. En la tabla 6 se observan también los valores de la curva de todas las clases; notablemente, se puede demostrar la confiabilidad del modelo en cuanto todos los resultados son bastante cercanos a 1. Igualmente, se muestra en las figuras 3, 4, 5 y 6 las gráficas correspondientes a cada clase.

Tabla 6. Detalles de precisión por clase

| TP Rate | FP Rate | Precision | Recall | F-Measure | ROC area | Class |
|---------|---------|-----------|--------|-----------|----------|--------|
| 0,743 | 0,109 | 0,813 | 0,743 | 0,776 | 0,844 | AVIÓN |
| 0,8 | 0,025 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,979 | BUS |
| 0,806 | 0,119 | 0,781 | 0,806 | 0,794 | 0,866 | TAXI |
| 0,786 | 0,066 | 0,688 | 0,786 | 0,733 | 0,92 | BUSETA |

Fuente: elaboración propia.

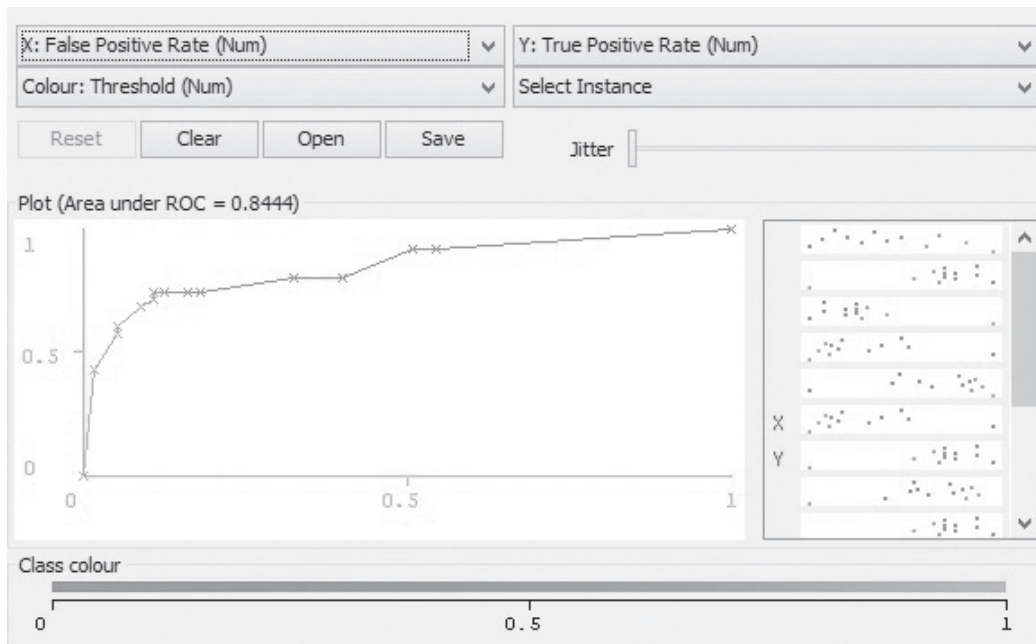


Figura 3. ROC area-Avión

Fuente: elaboración propia.

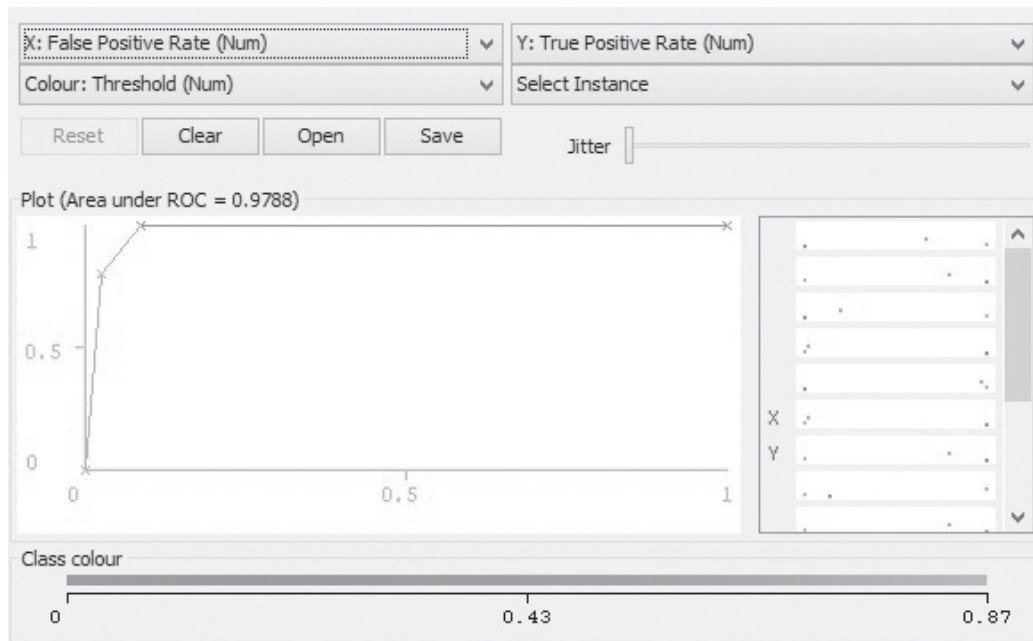


Figura 4. ROC area-Bus.

Fuente: elaboración propia.

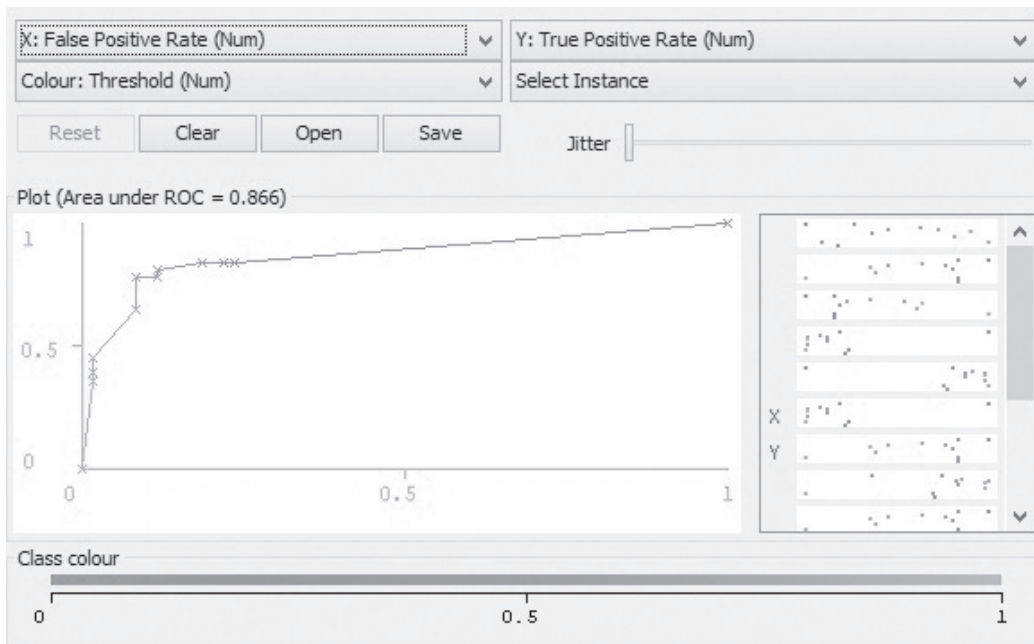


Figura 5. ROC area-Taxi.

Fuente: elaboración propia.

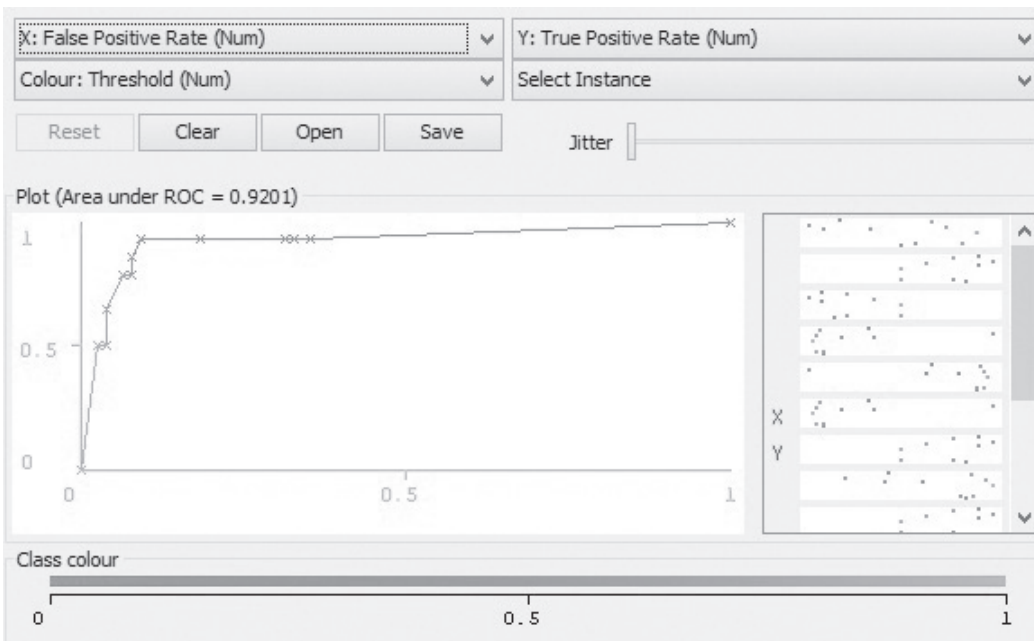


Figura 6. ROC area-Buseta.

Fuente: elaboración propia

Matriz de confusión

La matriz de confusión resultante del análisis se puede ver en la tabla 7, en la cual se estableció las instancias clasificadas correctamente, que son las que están en la diagonal; el resto de valores son los errores.

Tabla 7. Matriz de confusión

| === Confusion Matrix === | | | |
|--------------------------|---|----|----------------------|
| a | b | c | d <← classified as |
| 26 | 2 | 5 | 2 a = AVIÓN |
| 2 | 8 | 0 | 0 b = BUS |
| 3 | 0 | 25 | 3 c = TAXI |
| 1 | 0 | 2 | 11 d = BUSETA |

Fuente: Elaboración propia.

Para la clase AVIÓN se clasificaron correctamente 26 instancias y 9 incorrectamente; para la clase BUS las correctas fueron 8 y las incorrectas 2; con respecto a la clase TAXI se clasificaron correctamente 25 y 6 incorrectas, y por último, en la clase BUSETA 11 instancias fueron clasificadas correctamente y solo 3 incorrectamente.

En la tabla 7 se observan los valores de la diagonal, de las opciones AVIÓN, BUS, TAXI y BUSETA, en la cual aparecen seleccionadas correctamente 26, 8, 25 y 11, respectivamente, lo cual hace que el modelo generado sea confiable y de un acierto alto de clasificación.

Validación del modelo

Para la validación del modelo generado a través del software WEKA, es necesario tomar un archivo de entrenamiento y uno de prueba. Luego de guardar el modelo se pueden realizar las predicciones para un conjunto de pruebas, si ese grupo se compone de valores de clase válidos o no, la salida contendrá tanto la clase real como la predicha. En esta investigación se optó por dejar la clase de prueba con un valor "?", por lo tanto es importante aclarar que para la etiqueta de la clase *actual*

de cada instancia no contendrá información útil, pero la etiqueta *predicho* (*predicted*) sí lo hará (Siddharthan & Katsos, 2010). Al cambiar la etiqueta de clase por un signo de pregunta se puede validar el modelo: el proceso consiste en que al cambiar el valor de la clase por un signo, se evalúa la capacidad de predicción del modelo, es decir, se comprueba el porcentaje de clasificación correcta de cada clase.

La salida de la validación del modelo fue la siguiente, como se observa en la tabla 8, con una primera columna que es la instancia; la segunda no se tiene en cuenta porque todos los atributos fueron marcados con un "?", por ende la columna *actual* puede ser ignorada, se limita a establecer que cada clase pertenece a una clase desconocida; la columna *predicted* muestra la predicción de cada instancia, y la columna *error prediction* refleja la probabilidad de que la instancia en realidad pertenezca a la clase (Marozzo, Talia, & Trunfio, 2013).

Las primeras 11 instancias predicen como clase el AVIÓN y que la probabilidad de que eso sea efectivo es del 100%. Tal como lo muestra la tabla 8, la mayoría de los valores son superiores al 85%, lo cual comprueba que el modelo tiene un nivel de predicción alto.

Tabla 8. Validación del modelo

| === Predictionson Test Data === | | | |
|---------------------------------|-----|---------|-------|
| 1 | 1:? | 1:AVIÓN | 1 |
| 10 | 1:? | 1:AVIÓN | 1 |
| 11 | 1:? | 1:AVIÓN | 1 |
| 12 | 1:? | 2:BUS | 0,854 |
| 13 | 1:? | 1:AVIÓN | 1 |
| 14 | 1:? | 1:AVIÓN | 1 |
| 15 | 1:? | 2:BUS | 0,854 |
| 16 | 1:? | 1:AVIÓN | 1 |
| 17 | 1:? | 1:AVIÓN | 1 |
| 18 | 1:? | 2:BUS | 0,854 |
| 19 | 1:? | 1:AVIÓN | 1 |
| 2 | 1:? | 1:AVIÓN | 1 |
| 20 | 1:? | 2:BUS | 0.854 |
| 21 | 1:? | 2:BUS | 0.854 |
| 22 | 1:? | 1:AVIÓN | 1 |

| === Predictionson Test Data === | | | |
|---------------------------------|--------|-----------|------------------|
| Inst# | Actual | Predicted | Error Prediction |
| 23 | 1:? | 2:BUS | 0.854 |
| 24 | 1:? | 2:BUS | 0.854 |
| 25 | 1:? | 1:AVIÓN | 1 |
| 26 | 1:? | 2:BUS | 0.854 |
| 27 | 1:? | 2:BUS | 0,854 |
| 28 | 1:? | 1:AVIÓN | 1 |
| 29 | 1:? | 1:AVIÓN | 1 |
| 3 | 1:? | 1:AVIÓN | 1 |
| 30 | 1:? | 1:AVIÓN | 1 |
| 31 | 1:? | 1:AVIÓN | 1 |
| 32 | 1:? | 1:AVIÓN | 1 |
| 33 | 1:? | 1:AVIÓN | 1 |
| 34 | 1:? | 1:AVIÓN | 1 |
| 35 | 1:? | 1:AVIÓN | 1 |
| 36 | 1:? | 1:AVIÓN | 1 |
| 37 | 1:? | 2:BUS | 1 |
| 38 | 1:? | 2:BUS | 0,854 |
| 39 | 1:? | 2:BUS | 0,854 |
| 4 | 1:? | 1:AVIÓN | 1 |
| 40 | 1:? | 2:BUS | 1 |
| 41 | 1:? | 2:BUS | 0,854 |
| 42 | 1:? | 2:BUS | 0,854 |
| 43 | 1:? | 2:BUS | 1 |
| 44 | 1:? | 2:BUS | 0,854 |
| 45 | 1:? | 2:BUS | 0,854 |
| 46 | 1:? | 2:BUS | 1 |
| 47 | 1:? | 2:BUS | 0,854 |
| 48 | 1:? | 2:BUS | 0,854 |
| 49 | 1:? | 2:BUS | 1 |
| 5 | 1:? | 1:AVIÓN | 1 |
| 50 | 1:? | 2:BUS | 0,854 |
| 51 | 1:? | 2:BUS | 0,854 |
| 52 | 1:? | 2:BUS | 1 |
| 53 | 1:? | 2:BUS | 0,854 |
| 54 | 1:? | 2:BUS | 0,854 |
| 55 | 1:? | 1:AVIÓN | 1 |
| 56 | 1:? | 2:BUS | 0,854 |
| 57 | 1:? | 2:BUS | 0,854 |
| 58 | 1:? | 1:AVIÓN | 1 |
| 59 | 1:? | 2:BUS | 0,854 |
| 6 | 1:? | 1:AVIÓN | 1 |
| 60 | 1:? | 2:BUS | 0,854 |
| 61 | 1:? | 1:AVIÓN | 1 |
| 7 | 1:? | 1:AVIÓN | 1 |
| 8 | 1:? | 1:AVIÓN | 1 |
| 9 | 1:? | 1:AVIÓN | 1 |
| Inst# | Actual | Predicted | Error Prediction |

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

Este estudio mostró cómo implementar minería de datos para la estimación de un modelo de elección de transporte, siguiendo las etapas del KDD. Estableció que para este tipo de conjunto de datos, el algoritmo J48 perteneciente a la técnica de árboles de decisión fue el más adecuado por tener un porcentaje de acierto alto con respecto a los demás algoritmos de predicción.

El resultado de todo este análisis demostró que aquellas personas que basan su elección de viaje con motivo de salud eligen el avión, al igual que si tienen una frecuencia de viaje mensual y semanal; por otro lado, las personas que viajan a destinos largos, como Barranquilla, Bogotá y Medellín, eligen viajar en buseta; sin embargo, a los viajeros cuyo tiquete es comprado por la empresa donde trabajan, eligen el modo aéreo, hecho que podría deberse a que en esta situación el individuo no percibe directamente el costo del pasaje, lo cual hace que muy probable base su decisión de elección en el costo de este. Asimismo, se demuestra que las personas cuya ocupación es estudiante eligen la alternativa de transporte taxi; esto se puede deber a que los estudiantes, al no tener ingresos propios ni pertenecer a una empresa que costee sus gastos, optan por elegir modos más acordes a sus posibilidades económicas.

En general, la minería de datos sirve para predecir el comportamiento de las personas cuando se debe elegir entre ciertas alternativas. En este estudio las alternativas por elegir eran avión, bus, buseta y taxi, con lo cual se concluye que la demanda del transporte aéreo tiene una gran acogida en la ciudad de Ocaña, Norte de Santander.

Por lo general la técnica correspondiente a los árboles de decisión se destacó frente a las demás por sus altos porcentajes de acierto, ya que en promedio tienen el 68% de instancias correctamente clasificadas, lo cual demuestra que esta técnica aplicada al conjunto de datos puede ser utilizada para realizar aprendizaje supervisado.

Como futura línea de investigación sobre este tema, se puede aplicar aprendizaje no supervisado para validar si con estas técnicas es posible describir el comportamiento oculto del conjunto de datos.

FINANCIAMIENTO

Es el resultado del proyecto titulado “Generación de un modelo para predecir la demanda del servicio aéreo en la ciudad de Ocaña aplicando técnicas de minería de datos”, patrocinado con recursos de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.

REFERENCIAS

- Agrawal, D., & Aggarwal, C. (2001). On the design and quantification of privacy preserving data mining algorithms. *Proceedings of the twentieth ACM SIGMOD-SIGACT-SIGART symposium on Principles of database systems*. (págs. 247-255). ACM.
- Akiva, B., & Lerman, S. (1985). *Discrete choice analysis: theory and application to travel demand*. (Vol. 9). MIT press.
- Alcaldía de Ocaña. (2010). <http://ocana-nortedesantander.gov.co/>. Recuperado el 29 de Septiembre de 2014, de http://ocana-nortedesantander.gov.co/apc-aa-files/38343339653963383637363461323363/INFORME_GENERAL_DEL_MUNICIPIO.pdf
- Arentze, T., & Timmermans, H. (2007). Parametric action decision trees: Incorporating continuous attribute variables into rule-based models of discrete choice. *Transportation Research Part B: Methodological*, 41, 772-783.
- Baumgartner, D., & Serpen, G. (2009). Large Experiment and Evaluation Tool for WEKA Classifiers. *DMIN*, 16, 340-346.
- Bresfelean, V. P. (2007). Analysis and predictions on students' behavior using decision trees in Weka environment. *Information Technology Interfaces, 2007. ITI 2007. 29th International Conference on. IEEE*, (págs. 51-56).
- Caruana, R., & Niculescu, A. (2006). An empirical comparison of supervised learning algorithms. *Proceedings of the 23rd international conference on Machine learning*. (págs. 161-168). ACM.
- Castillo, C., Mendoza, M., & Poblete, B. (2011). Information credibility on twitter. *WWW '11 Proceedings of the 20th international conference on World wide web* (págs. 675-684). New York: ACM.
- De Oña, J., De Oña, R., & Calvo, F. (2012). A classification tree approach to identify key factors of transit service quality. *Expert Systems with Applications* 39.12, 11164-11171.
- Fawcett, T. (2004). ROC graphs: Notes and practical considerations for researchers. *Machine Learning*, 31, 1-38.
- Fayyad, U. M., Piatetsky, G., Smyth, P., & Uthurusamy, R. (1996). From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases. *AI Magazine*, 17, 37-54.
- Ferri, C., Flach, P., & Hernández-Orallo, J. (2002). Learning decision trees using the area under the ROC curve. *ICML*, 2, 139-146.
- Goebel, M., & Gruenwald, L. (1999). A survey of data mining and knowledge discovery software tools. *ACM SIGKDD Explorations Newsletter*, 1(1), 20-33.
- Guerrero, T., Criado, E., & León, I. (2013). Análisis de la demanda de viajes interurbanos combinando datos de diferentes fuentes. *Ingeniería y competitividad-Universidad del Valle (En revisión)*.
- Guyon, I., & Elisseeff, A. (2003). An introduction to variable and feature selection. *The Journal of Machine Learning Research*, 3, 1157-1182.
- Hall, M. A., & Holmes, G. (2003). Benchmarking attribute selection techniques for discrete class data mining. *Knowledge and Data Engineering, IEEE Transactions on*, 15(6), 1437-1447.
- Hall, M., Eibe, F., Holmes, G., Pfahringer, B., Reutemann, P., & Witten, I. (2009). The WEKA data mining software: an update. *ACM SIGKDD explorations newsletter*, 11, 10-18.
- Kohavi, R., & Quinlan, R. (2002). Data mining tasks and methods: Classification: decision-tree discovery. En W. Klösgen, & J. Zytkow, *Handbook of data mining and knowledge discovery* (págs. 267-276).

- Marozzo, F., Talia, D., & Trunfio, P. (2013). Scalable script-based data analysis workflows on clouds. *8th Workshop on Workflows in Support of Large-Scale Science* (págs. 124-133). New York: ACM, New York.
- Martínez, G., Solarte, R., & Soto, J. (2011). Árboles de decisiones en el diagnóstico de enfermedades cardiovasculares. *Scientia et Technica*, 3(49), 104-109.
- Nishimura, K., & Hirose, M. (2007). The study of past working history visualization for supporting trial and error approach in data mining. *Proceedings of the 2007 conference on Human interface: Part I* (págs. 327-334). ACM.
- Quinlan, R. (1986). Induction of decision trees. *Machine learning*, 1, 81-106.
- Quinlan, R. (1989). Unknown attribute values in induction. En M. Kaufmann, *Machine Learning Proceedings 1989* (págs. 164-168).
- Roland, E., Uhrmacher, A., & Saha, K. (2009). Data mining for simulation algorithm selection. *Proceeding Simutools '09 Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques* (pág. Article No. 14). Brussels: ICST.
- Siddharthan, A., & Katsos, N. (2010). Reformulating Discourse Connectives for Non-Expert Readers. *Human Language Technologies: The 2010 Annual Conference of the North American Chapter of the ACL* (págs. 1002-1010). Los Angeles: Association for Computational Linguistics.
- Van Hulse, J., M. Khoshgoftaar, T., & Napolitano, A. (2007). Experimental Perspectives on Learning from Imbalanced Data. *International Conference on Machine Learning* (págs. 935-942). New York: ACM New York.
- Witten, I., Hall, M., Holmes, G., Pfahringer, B., & Reutemann, P. (2009). The WEKA data mining software: an update. *ACM SIGKDD explorations newsletter*, 11, 10-18.
- Xie, C., Lu, J., & Parkany, E. (2003). Work travel mode choice modeling with data mining: decision trees and neural networks. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 4, 50-61.
- Yoav, F., & Schapire, R. (1996). Experiments with a new boosting algorithm. *ICML*, 96, 148-156.





Metodología para la formulación de proyectos basada en la definición del problema

Problem-Definition-Based Methodology for Pre Formulation of Projects

Omar Iván Trejos Buriticá*

Fecha de recepción: 31 de marzo de 2014

Fecha de aceptación: 19 de enero de 2015

Como citar: Trejos Buriticá, O. I. (2015). Metodología para la formulación de proyectos basada en la definición del problema. *Revista Tecnura*, 19(45), 115-126. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.3.a09

RESUMEN

El presente artículo plantea una metodología muy simple, sencilla y, hasta cierto punto, paramétrica para resolver el que se ha convertido en el problema más grande para los estudiantes de ingenierías que se encuentran en la recta final de su proceso de formación: la formulación del anteproyecto de su trabajo de grado y, a partir de allí, el planteamiento de un derrotero de actividades que permitan culminar exitosamente la propuesta. Durante mucho tiempo el autor ha impartido una gran cantidad de cursos, asesorías y acompañamientos de muchos estudiantes y ha encontrado una metodología simple para que la formulación de un anteproyecto deje de ser un terreno fangoso para convertirse en un camino casi paramétrico. Esa metodología es, precisamente, la que se plantea en este artículo.

Palabras clave: definición del problema, metodología, proyectos, trabajo de grado.

ABSTRACT

This article shows a simple, parametric and effective methodology to solve the big problem of the Engineering Program's students when they are in the last semesters of his careers: the formulation of the pre-project and, from there, the design of the activities' schedule to finish his studies successfully. For long, the author has been teacher, adviser and accompanist for a lot of students and he has found a simple methodology to formulate a preproject in an easy way. This is the target of this article.

Keywords: methodology, problem definition, projects, thesis.

* Ingeniero de sistemas, doctor en Ciencias de la Educación, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia. Contacto: omartrejos@utp.edu.co

INTRODUCCIÓN

Una de las dificultades más grandes que tienen tanto estudiantes de pregrado como de posgrado, pero más notorio en los estudiantes de pregrado, es la formulación de su anteproyecto y, a partir de allí, la concreción de las actividades que permitan construir y culminar exitosamente su trabajo de grado (Hernández, 2008).

Según el Ministerio de Educación de Colombia en su informe sobre la retención y deserción universitaria de 2012, el 23% de los estudiantes que ingresan a primer semestre en los programas de Ingeniería, Arquitectura, Urbanismo y afines desertan de su carrera; el 46% de la población restante lo hace durante el quinto semestre y el 55% deserta cuando se encuentran en décimo semestre. Si bien pudiera hacerse un análisis detallado de los factores que influyen en estas decisiones, este artículo se ocupará de las razones por las cuales los estudiantes de décimo semestre, quienes ya están próximos a terminar su proceso de formación, desertan y no se gradúan (Agencia Presidencial de Cooperación Internacional, 2012).

Para precisar las cifras debe entenderse que de cada 100 estudiantes que ingresan a las carreras de Ingeniería y afines, 23 de ellos aproximadamente desertan. De los 77 restantes, el 46% (o sea, casi la mitad) deserta cuando están cursando quinto semestre, por lo cual quedan 38 estudiantes aproximadamente de la cohorte original. De estos 38 estudiantes, el 55% deserta cuando va en décimo semestre, es decir que culminan exitosamente su carrera tan solo 17 estudiantes aproximadamente. Esto nos induce a pensar que, en cifras aproximadas, de cada 100 estudiantes que ingresan a un programa de Ingeniería y afines, tan solo 17 lo culminan exitosamente. Debe anotarse que, en décimo semestre, el porcentaje de deserción de los programas de Ingeniería y afines es el más alto si se compara con los porcentajes equivalentes (esto es, deserción porcentual cuando los estudiantes están en décimo semestre) de otras áreas: Bellas Artes (52%); Administración,

Economía y afines (50%); Agronomía, Veterinaria y afines (50%); Ciencias de la Educación (47%); Ciencias Básicas (46%); Ciencias Sociales (45%) y Ciencias de la Salud (38%) (Agencia Presidencial de Cooperación Internacional, 2012).

Aunque el Ministerio de Educación Nacional ha puesto en funcionamiento diferentes estrategias, tales como el Sistema SPADIES (Sistema para la Prevención de la Deserción en la Educación Superior) para disminuir la deserción en los últimos semestres, la tendencia se mantiene. Según el sitio web oficial del Ministerio de Educación (2014), la deserción entre el décimo semestre cursado y el décimo quinto semestre cursado en programas de Ingeniería, Arquitectura, Urbanismo y afines tiene una tendencia a superar el 50% de los estudiantes. Las razones que generan la deserción en unos semestres tan avanzados como el décimo cursado, y de allí en adelante, podrían ser muchas, sin embargo la experiencia institucional de acompañamiento del autor en una gran cantidad de universidades le permite advertir que incide significativamente el hecho de que los estudiantes no terminan su programa de formación por el reto que constituyen el hallazgo de un tema, la formulación de su anteproyecto, el acompañamiento de un buen docente, la poca formación en comunicación escrita y la falta de una metodología que hile todos estos elementos para que lo haga simple y sencillo de digerir y de ejecutar (Lerma, 2005).

El propósito de este artículo radica en la formulación de una metodología que atienda esta ingente necesidad y que ponga a disposición de los estudiantes y de los docentes una metodología que permita definir un problema, formular un anteproyecto y desarrollar el trabajo de grado por los caminos paramétricos que, en muchos casos, la Ingeniería pareciera exigir. Podría decirse que este artículo se justifica en virtud de la gran cantidad de esfuerzos que el Ministerio de Educación y las instituciones, en los campos académico e investigativo, están haciendo para propiciar esos caminos que propendan por simplificar la formulación del anteproyecto y el desarrollo del trabajo de grado,

sin arriesgar la calidad académica. El aspecto innovador de esta propuesta radica en que se plantean unos criterios que facilitan tanto el hallazgo de un problema a partir de las preferencias de los estudiantes, como la formulación del anteproyecto y el desarrollo del documento final, llámese trabajo de grado, tesis o cualquier otro documento de alto nivel. El artículo se concentra en proponer una metodología para hallar efectivamente un problema o tema que sirva como insumo para formular el anteproyecto y en una metodología que simplifique y facilite dicha formulación partiendo de la definición del problema.

Para plantear el contenido de este artículo se ha acudido a la experiencia, por parte del autor, de más de veinte años de acompañamiento académico a estudiantes de todos los niveles de formación universitaria, a los factores comunes que han ido encontrando a lo largo de ese tiempo, tanto en la concepción de las diferentes ideas como en las políticas institucionales de las universidades del Eje Cafetero y a la búsqueda permanente de mecanismos que simplifiquen la formulación de anteproyectos, teniendo en cuenta los problemas que implican las cifras porcentuales de la deserción y la gran debilidad que se tiene en materia de comunicación escrita en las universidades.

Ante la pregunta formulada a manera de hipótesis para este artículo ¿es posible encontrar una metodología que simplifique el hallazgo de un problema por investigar y la formulación de un anteproyecto que cristalice lo propuesto? La respuesta es completamente afirmativa y ese es el propósito de este artículo. Este texto es uno de los productos de la tesis doctoral "Aprendizaje en Ingeniería: un problema de incomunicación", con la cual el autor obtuvo su título de doctor en Ciencias de la Educación en RUDEColumbia Cade UTP, que fue registrado como proyecto de investigación ante la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad Tecnológica de Pereira. Este artículo plantea la metodología propuesta bajo el estándar IMRYD (Introducción, Metodología, Resultados y Discusión) tanto en la selección de

un tema por investigar como en la estructura de formulación de un anteproyecto, posteriormente presenta algunas estadísticas de aplicación de esta metodología, hace alguna discusión al respecto de los resultados obtenidos y finalmente plantea unas conclusiones que resumen el contenido del artículo.

METODOLOGÍA

Metodología para seleccionar un tema

El primer problema con el cual se enfrenta el estudiante radica en encontrar un tema para abordar de cara a la construcción de su documento de trabajo de grado. ¿Qué hacer para graduarme? es la pregunta que, con frecuencia, se hace y que, también con frecuencia, no siempre encuentra una respuesta.

En este sentido debe aclararse que la mayoría de universidades han adoptado diferentes líneas como trabajo final en los programas de pregrado de las áreas de ingenierías, que incluyen el desarrollo de monografías, la realización de proyecto que implique aplicación de conocimiento, el desarrollo de un proyecto de investigación, la creación de empresas, la práctica universitaria e, incluso, la realización del primer semestre de una especialización o una maestría ofrecida por la misma institución (Salinas, 2005). Todas estas son modalidades validadas internacionalmente que muchas universidades en el mundo han adoptado y que también se han incorporado en nuestro país, algunas con más intensidad que otras. Este artículo se ocupa de la formulación del documento final de las opciones aplicación de conocimiento, desarrollo de un proyecto de investigación y monografía, es decir, todo lo dicho aquí es aplicable a estas tres opciones de grado. La base teórica y lógica que subyace a la propuesta también puede ser extrapolada, ajustada y aplicada a las otras formas de grado que proveen las instituciones (Cortés & Iglesias, 2004).

El primer paso para construir un anteproyecto radica en seleccionar un tema para investigar o

sobre el cual se quiere desarrollar una monografía o una aplicación de conocimiento (más conocida como trabajo de grado o tesis para los niveles de maestría y doctorado). La metodología se remite a que el estudiante realice de una manera concienzuda y franca consigo mismo los siguientes pasos:

- Listar las tres asignaturas o tres áreas que más le gustaron durante su ciclo de formación.
- Seleccionar sus palabras clave (posiblemente estas correspondan al nombre de las mismas asignaturas).
- Traducirlas, preferiblemente, al inglés, aunque no de manera exclusiva, esto es, puede acudir a otro idioma.
- Utilizar tanto las palabras en español como su traducción como filtro de búsqueda en bases de datos especializadas.
- Comenzar a revisar el nombre de artículos que incluyan las tres palabras.
- Leer detenidamente el resumen (llamado también "Abstract") para tener una aproximación más clara a lo que contiene el artículo.
- De aquellos artículos que se considere que coincidan con nuestras expectativas, leer la Introducción (normalmente el numeral 1 del contenido del artículo).
- Seleccionar dos o tres temas que llamen la atención.

Vale la pena tener en cuenta que una vez se ejecute de manera secuencial y precisa esta metodología, se puede garantizar que el estudiante (preferiblemente aquel que no sabía qué hacer como trabajo de grado) habrá encontrado un tema que cumple con las características como para que su desarrollo le permita concluir su proceso de formación profesional en pregrado de ingenierías (McConnell, 2005).

Cuatro reflexiones

El Dr. Guillermo Hoyos, ícono de la investigación en Colombia y fallecido a principios del año

2014, investigador y filósofo que compartió escenario con los pensadores más prominentes de la última década a nivel mundial, siempre hacía tres recomendaciones que vale la pena reproducir para beneficio de todos aquellos que accedan a este artículo. Sus palabras, producto de una muy profunda experiencia en el campo de la investigación y en los procesos de acompañamiento de estudiantes de pregrado, especialización, maestrías y doctorados, permitían tener en cuenta lo que él mismo llamaba "las claves para construir un trabajo de grado de manera eficiente":

- Jamás comprometerse a desarrollar un trabajo de grado o una tesis sobre un tema que no se conozca.
- Jamás comprometerse a desarrollar un trabajo de grado o una tesis sobre un tema que no sea del agrado total para el estudiante.
- Jamás comprometerse a desarrollar un trabajo de grado o una tesis con alguien con quien no quiera trabajar (eso incluye tanto a compañeros como al director del trabajo de grado).

Sencillas pero efectivas las recomendaciones del Dr. Hoyos y, con alguna experiencia acumulada, el autor de este artículo puede asegurar que efectivamente son las "claves" para construir el trabajo de grado o la tesis que se quiera desarrollar.

La segunda reflexión va de la mano de la experiencia acumulada por el autor de este artículo. Lo más importante de una propuesta o de un anteproyecto no es lo que se quiere hacer, sino la coherencia de la metodología como se quiere hacer, es decir, el sentido lógico que tienen los pasos con los cuales se quiere abordar y resolver un problema determinado. El QUÉ pasa a un segundo plano cuando el CÓMO es lógico y completamente realizable. La historia de la ciencia da fe de esto último, pero se omitirá por ser un tema fuera de los linderos del contenido de este artículo.

La tercera reflexión acude a la fuente de consulta excelsa para conocer investigaciones

recientes al respecto de un tema determinado y para tener la posibilidad de contactar investigadores con quienes se pueda interactuar alrededor de un determinado tema: las bases de datos especializadas. Estas bases de datos se han constituido en la base para acceder al soporte documental de cualquier investigación, dado que cuentan con un sistema de arbitraje que garantiza que el contenido de los artículos publicados tiene el nivel académico necesario y la actualidad pertinente como para tenerlos como referentes bibliográficos que ofician como punto de partida del tema seleccionado, además de formar parte del respectivo estado del arte. Algunas de estas bases de datos especializadas, tal vez las más populares, son IEEExplore, ACM Library, ProQuest y Science Direct.

La cuarta reflexión hace referencia a la distribución del tiempo, a la forma como se utilice como recurso en la construcción de un trabajo de grado y a la manera como el estudiante puede llegar a ser altamente productivo en la construcción de su documento de trabajo de grado. Una estrategia es identificar en qué momento del día es más productivo cada estudiante y destinar una hora para tal fin, de manera que en esa hora y solo en ella el tiempo sea invertido en la confección de la tesis o del trabajo de grado.

Si usted destina una hora diaria (de alta productividad) al trabajo de grado, tendrá en la semana 7 horas de alta productividad, en el mes tendrá aproximadamente 28 horas de alta productividad y en seis meses tendrá alrededor de 160 horas de alta productividad. Esto representa mucho más de lo que usted haría dedicando todo un día continuo en su tesis o trabajo de grado.

Estudios recientes han demostrado que una hora de alta productividad equivale a seis horas de productividad media o a diez horas de baja productividad. La conversión habla por sí sola. Lo único que debe hacer el estudiante es darse a la tarea de identificarla y dedicarla a su trabajo de grado.

Metodología para formular un anteproyecto

Lo primero que debe tenerse en cuenta es que todo trabajo de grado o toda tesis de maestría o doctorado surgen de una idea, luego la primera acción por realizar consiste en escribir la idea con la extensión y la amplitud que considere conveniente, con el nivel de detalle que se elija y con los términos, expresiones, adjetivos y sustantivos que a bien tenga escribir.

Mejor dicho, escribir la idea tal como el estudiante lo considere, sin pensar en que está escribiendo la idea de un trabajo de grado o de una tesis. Escribirla como “venga en gana”, sin condiciones. Es de anotar que la idea debe acudir a la descripción informal de un problema que se quiere abordar y cuya solución es la que esperamos constituya el corpus del trabajo de grado o la tesis.

Una vez escrita la idea, sin condiciones, sin reglas y sin cortapisas, se procede a volverla a escribir, pero esta vez con los siguientes parámetros: escribirla de nuevo en solo dos páginas, con letra arial de 12 puntos, interlineado 1,5, márgenes estándar (los márgenes por defecto) e intentando no superar seis párrafos en la exposición.

Si se nota que es imposible reducir la idea a este formato, entonces ese será el primer indicio de que la idea no está suficientemente clara y entonces deberá investigarse un poco más al respecto. Si por el contrario es posible reescribir la idea con las condiciones expuestas, entonces eso significa que un destello de claridad emerge indicando que la idea tiene un nivel de claridad suficiente como para avanzar al siguiente paso.

El próximo paso consiste en volver a escribir la idea, pero con el siguiente esquema:

- Antecedentes. Identifique cuáles son los antecedentes del problema que usted quiere abordar, es decir, de dónde proviene el problema. En esta parte la información consultada debe ser verificable y basarse en fuentes confiables. Toda la información estadística que le dé soporte a los antecedentes será bienvenida.

- Efectos. Explique con la mayor claridad posible los efectos de dichos antecedentes, es decir, qué dificultades se han generado porque no se ha hallado una solución a dichos antecedentes. Aquí se plantea el problema en términos generales o el macroproblema que se quiere abordar, así como su contexto, es decir, el entorno sobre el cual el problema tiene efecto.
- Problema. En esta parte se plantea el problema que se quiere resolver y que no necesariamente debe coincidir con el que se quiere abordar. Esto es, el problema que se quiere abordar es el planteamiento general que implica una serie de situaciones imbuídas en el problema como tal; el problema a resolver puede ser una o dos de esas situaciones. Si el problema que se quiere abordar hiciera referencia a las dificultades de tráfico de una gran ciudad, un problema por resolver podría ser la sincronización de los semáforos que, a todas luces, es solo un pequeño subproblema del macroproblema planteado.
- Solución. En términos generales, y sin acudir a detalles minúsculos, se plantea la solución que se quiere implementar y que constituye el corpus del trabajo de grado o de la tesis, así como su aporte.

El siguiente paso consiste en escribir cuatro párrafos distribuidos en dos páginas tamaño carta: en la primera página se escriben los antecedentes y los efectos de dichos antecedentes, en la segunda se escribe el problema y la solución en términos generales. Se debe anotar que el espacio que ofrecen dos páginas, además de las condiciones de letra mencionadas, no son suficiente para hacer una exposición de manera amplia y detallada, sin embargo es necesario tener en cuenta que si un estudiante es capaz de escribir un problema en estos términos, en esas condiciones y en ese espacio, será la confirmación de que, definitivamente, tiene muy claro lo que quiere hacer.

Lo contrario también aplica, es decir, si un estudiante no es capaz de condensar su problema en estas condiciones, deberá revisar un poco mejor

lo que quiere hacer porque significa que no lo tiene muy claro. Debe acotarse que un párrafo no debe exceder las 12 líneas. A este esquema se le llamará Definición del Problema.

Una vez escrita la Definición del Problema en los términos que se explican, se procede a completar los cuatro pilares de un anteproyecto (la definición del problema es uno de ellos). Los otros tres pilares son: el Objetivo General, el Nombre del proyecto y la Justificación. El Objetivo General sale del tercer párrafo de la Definición del Problema, es decir, del párrafo en donde se formula el problema que se quiere resolver (no el problema que se quiere abordar, pues este sería el macroproblema). El Nombre del trabajo de grado o de la tesis sale del Objetivo General y podría decirse que la diferencia es puramente semántica: mientras que el Objetivo General comienza con un verbo, el Nombre de la tesis comienza con el sustantivo equivalente a ese verbo.

Si el Objetivo General del anteproyecto está descrito como "Formular un modelo matemático para describir el movimiento aleatorio de una pluma llevada por el viento", el Nombre será "Formulación de un modelo matemático para describir el movimiento aleatorio de una pluma llevada por el viento". Nótese que la relación entre el Objetivo General y el Nombre es absolutamente íntima y así debe ser. En caso de que se encuentren discrepancias o diferencias entre el Objetivo General y el Nombre del anteproyecto, será muy recomendable que se revise la definición del problema porque esas diferencias significarán que la Definición del Problema no está suficientemente clara.

Es de anotar que del Objetivo General se obtiene el filtro de búsqueda que se ha de usar en las bases de datos. Para ello basta con hacerle un análisis de contenido a dicho objetivo general. Si dice "Formular un modelo matemático para describir el movimiento aleatorio de una pluma llevada por el viento", entonces pueden destacarse las siguientes palabras: (*modelo matemático*)+(*movimiento aleatorio*)+(*viento*). Si las traducimos, entonces el

equivalente que obtendríamos sería: *(mathematical model)+(random movement)+(wind)* y con esto se obtiene el filtro de búsqueda tanto en español como en inglés, con el ánimo de que al buscar en las bases de datos especializadas se obtengan los artículos más cercanos al tema propuesto.

La Justificación, que es el cuarto pilar fundamental para la formulación, revisión y evaluación de un anteproyecto, consiste en exponer las razones por las cuales un estudiante de un programa de Ingeniería debe dedicar su tiempo y sus conocimientos a estudiar la solución a un problema determinado. Entre estas razones se destacan las siguientes:

- Razones tecnológicas. Con el desarrollo del proyecto, ¿qué nuevo uso se está proponiendo dar a determinadas tecnologías que aún no se haya dado?
- Razones humanísticas. Con el desarrollo del proyecto, ¿qué condiciones se podrían mejorar en la existencia, convivencia y permanencia del ser humano como ente social?
- Razones económicas. Con el desarrollo del proyecto, ¿qué razones de inversión pueden optimizarse, mejorarse, evaluarse, simplificarse o multiplicarse positivamente que todavía no se hayan tenido en cuenta?
- Razones ambientales. Con el desarrollo del proyecto, ¿qué condiciones ecológicas y del medio ambiente se pueden mejorar para el bienestar de la humanidad que aún no se hayan aprovechado?
- Razones académicas. Con el desarrollo del proyecto, ¿qué nuevos conocimientos se pueden difundir, “vulgarizar”, acceder o divulgar a los cuales hasta ahora no se haya accedido?
- Razones sociales. ¿Cómo se beneficia la sociedad, en su conjunto, con el desarrollo e investigación sobre el tema?

Se debe anotar que otras razones pueden emerger dependiendo de la temática o del problema que se quiere abordar y del problema puntual que

se quiera resolver, pero, en su gran mayoría, las propuestas de trabajo de grado de Ingeniería acuden a algunas de estas líneas como razones para su justificación.

También debe tenerse en cuenta que no es necesario que todas las razones aparezcan al momento de justificar un tema de investigación, de trabajo de grado o de tesis. Es muy importante saber que, cualquiera que sea la razón que se exponga como justificación (sea una o varias), deberá ir sustentada con estadísticas, referencias y fuentes confiables que refuercen lo que se escriba en el documento.

Teniendo definidos los cuatro pilares del proyecto en su fase de formulación previa (anteproyecto), se procede a realizar una derivación conceptual de cada uno de ellos, de la siguiente forma:

- Del Nombre se derivan los siguientes ítems:
 - Marco Teórico, que corresponde al conjunto de conocimientos que le dan piso científico al tema y que subyacen al problema puntual que se quiere solucionar.
 - Marco Conceptual, que corresponde a los conceptos clave que constituyen la base para el Marco Teórico; son esos conceptos los que permiten que dicho Marco Teórico exista.
 - Marco Legal, que está formado por todas aquellas leyes, normas o disposiciones de orden legal (nacional e internacional) que rigen, regulan, determinan, verifican y retroalimentan la posible solución que se quiere implementar, el problema puntual que se quiere resolver y el problema general que se quiere abordar.
 - Estado del Arte, que consiste en una breve relación de los estudios, investigaciones, tesis y documentos que se hayan publicado recientemente en relación con el tema que se quiere tratar, con la solución que se quiere implementar, con el problema puntual que

- se quiere resolver y con el problema general que se quiere abordar. En la confección del Estado del Arte son determinantes las bases de datos electrónicas.
- Del Objetivo General se derivan los siguientes ítems:
 - Objetivos Específicos. Corresponde a los pasos medianamente generales que deben realizarse para cumplir con el objetivo general; no son actividades puntuales, pues deben escribirse con cierto nivel de generalidad sin que desplacen al objetivo general en su concepción.
 - Recursos Necesarios. Consiste en la descripción de los recursos financieros, técnicos y humanos que se necesitan para cumplir con cada uno de los objetivos planteados.
 - Cronograma. Consiste en la descripción temporal, es decir, cuánto tiempo tomará realizar cada uno de los objetivos específicos si se cuenta con estos.
 - Referencias Bibliográficas. Corresponde a la referenciación (con normas) de los documentos, artículos, investigaciones, tesis y libros que le dan soporte a la base teórica investigativa que subyace tanto a la solución como al problema puntual por resolver, así como al problema general por abordar. Normalmente en Colombia se acude a las normas de referenciación APA o Icontec.
 - Esquema Temático. Es la propuesta de Tabla de Contenido de la tesis o el trabajo de grado que se deriva de los objetivos, contando con los recursos apropiados en el tiempo indicado y tomando como base las Referencias Bibliográficas citadas.
 - De la Justificación se derivan los siguientes ítems:

Tabla 1. Estimación en páginas de cada ítem

| Ítem | Número máximo de páginas. |
|----------------------------|---------------------------|
| Definición del Problema | 2,0 |
| Nombre | 0,5 |
| Objetivo General | 0,5 |
| Justificación | 2,0 |
| Marco Teórico | 4,0 |
| Marco Conceptual | 2,0 |
| Marco Legal | 4,0 |
| Estado del Arte | 4,0 |
| Objetivos Específicos | 0,5 |
| Recursos* | 1,0 |
| Cronograma | 1,0 |
| Referencias Bibliográficas | 1,0 |
| Esquema Temático | 1,0 |
| Diseño Metodológico | 0,5 |
| Hipótesis | 0,5 |
| VARIABLES | 0,5 |
| Instrumentos** | |
| Total páginas | 25,0 |

(*) Cuando los recursos se presentan en formato prediseñado de presupuesto, el estimativo de páginas puede cambiar.

(**) No existe un estimativo de páginas en los instrumentos, ya que estos pueden llegar a ser varios dependiendo de la investigación o tema propuesto.

Fuente: elaboración propia.

- Diseño Metodológico. Consiste en la forma metodológica como se va a resolver el problema puntual, es decir, en la manera como se va a aplicar un método que se base en procesos científicos para darle toda la confiabilidad a la solución. Es el conjunto de pasos que se van a realizar para implementar la solución. En esta parte es importante tener en cuenta el enfoque cuantitativo, el enfoque cualitativo y el enfoque cualitativo-cuantitativo.
- Hipótesis. Corresponde al planteamiento del objetivo general en forma de pregunta. La hipótesis es la apuesta que se hace en investigación cuando un estudiante se propone resolver un problema puntual del cual considera que tiene la solución. Siempre será una incógnita que se espera resolver. No resolverla no invalida el tema como tal, pues cuando una hipótesis no se comprueba puede ser que no se ha definido bien el problema o que el camino metodológico que se escogió no fue el apropiado para resolverlo. En el segundo caso, se habrá encontrado un camino por donde el problema no se puede solucionar y eso es tan valioso como si la hipótesis se hubiera comprobado exitosamente.
- Variables. Factores que inciden de manera directa o indirectamente para que la solución pueda ser implementada y el problema puntual pueda ser resuelto
- Instrumentos. Son las encuestas, entrevistas, formatos, preguntas o formularios que se necesitan para recolectar información importante y pertinente en relación con la solución que se plantea, con el problema puntual por resolver o con el problema general por abordar. La tabla 1 proporciona una estimación máxima en páginas por ítem.

Cuando se plantea un valor como 0,5 se refiere al espacio aproximado que ocupa media página tamaño carta (estos son solo estimativos, pues

es posible que algunos ítems como la descripción detallada de recursos financieros —también llamada Presupuesto—, los Instrumentos y el Marco Teórico puedan llegar a ser bastante amplios en comparación con dichos estimativos). Las normas de presentación de anteproyectos establecen que un buen estimativo en extensión es de 25 páginas (o una cantidad alrededor de ese valor, entre 20 y 30 páginas). Este estimativo se hace teniendo en cuenta letra arial entre 10 y 12 puntos, interlineado a 1.5 y márgenes estándar. Cualquiera de estos valores estimados que sea difícil de cumplir puede ser sinónimo de que no se tiene completamente claro lo que significa el ítem como tal y, al tiempo, es muy posible que sea sinónimo de que la Definición del Problema (o sea, la concreción del problema puntual por resolver) puede estar difusa, y por tanto se hace difícil precisar algunos de los otros ítems. Sin asegurar que sea esa la única razón, debe tenerse en cuenta al momento de formular su anteproyecto. Razones como el desconocimiento del tema, la falta de acceso a fuentes de información o a canales que posibiliten esas fuentes y la falta de acceso a tecnología también pueden ser factores que se develen al momento de formular un anteproyecto y que verifican que estos valores estimados no se cumplen fácilmente. Así como se ha establecido una relación de dependencia direccional entre la Definición del Problema y las otras tres bases de un anteproyecto (Objetivo General, Nombre y Justificación), y también se ha establecido una relación de subordinación de los otros ítems frente a estos pilares de la formulación, debe entenderse que la falta de concreción de algún ítem podría develar falta de claridad en el ítem del cual procede o del cual, teóricamente, debe derivarse.

Esquema general

Con el planteamiento anterior, el esquema equivalente se muestra en la figura 1.

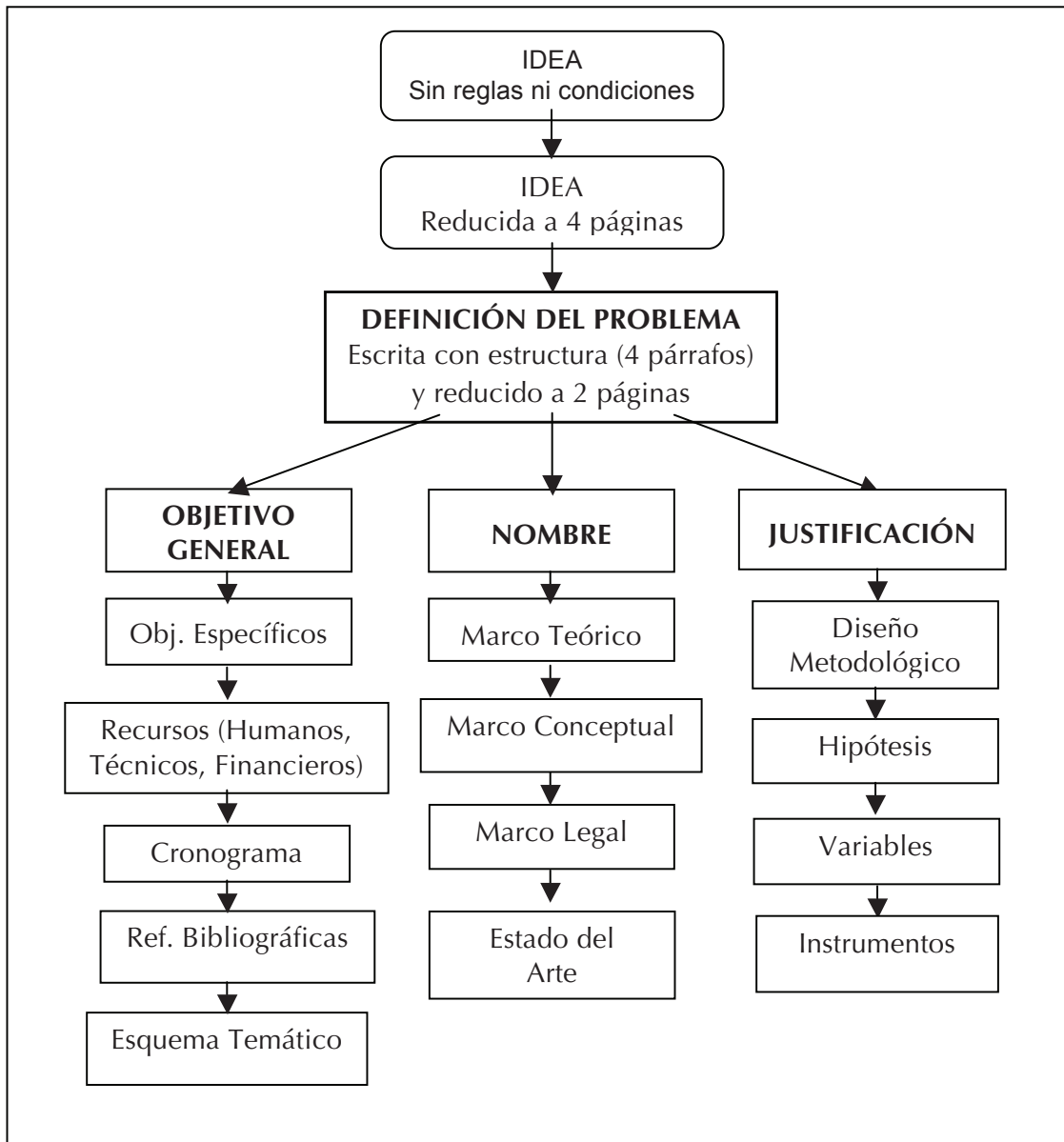


Figura 1. Esquema metodológico.

Fuente: elaboración propia.

RESULTADOS

Esta metodología para la formulación de anteproyectos de pregrado y posgrado ha sido utilizada en la Universidad Tecnológica de Pereira en el pregrado de Ingeniería de Sistemas y Computación, en la Especialización en Redes de Datos y en la

Maestría en Ingeniería de Sistemas, considerando las diferencias propias de cada nivel de formación. Ha sido utilizada con los estudiantes y los resultados han sido bastante favorables, dado que en tiempos recientes la formulación del anteproyecto le tomaba a más de la mitad de los estudiantes un tiempo superior a un semestre. La dificultad no se

presentaba en lo que los estudiantes debían escribir, sino en la ausencia de una metodología clara que les permitiera tener un camino concreto que facilitara dicha escritura. Efectivamente, tal como se muestra en la tabla 2, los resultados han cambiado sustancialmente.

DISCUSIÓN

Tal como lo muestra la tabla 2, la relación porcentual entre los datos con y sin metodología es sustancialmente diferente. Mientras que en la maestría un total de 32 estudiantes, a lo largo de cuatro semestres, tenían la posibilidad de presentar su anteproyecto dentro de los límites de tiempo establecidos, solamente 10 de ellos lo lograron dentro del mismo semestre. La relación entre los estudiantes sin metodología que presentaron su anteproyecto frente al total de estudiantes que tenían la posibilidad de hacerlo no supera el 30%.

Por su parte, de los 34 estudiantes que durante los cuatro semestres pudieron presentar su anteproyecto de maestría y fueron beneficiados con la metodología, 29 presentaron su anteproyecto dentro del mismo semestre, lo cual representa una efectividad del 85%. Aunque debe admitirse que otros factores pueden influir en la formulación y

presentación de los anteproyectos, no se puede negar (según lo dicho por los mismos estudiantes) que la utilización de una metodología tan concreta como la que se presenta en este artículo facilita mucho la formulación y trámite del anteproyecto en mención. Es de anotar que en esta tabla no se diferencian los estudiantes que definitivamente decidieron no presentar su anteproyecto; solo se acude a la estadística de quienes tenían posibilidad de presentarlo y lo hicieron dentro del marco metodológico aquí expuesto y por fuera de él.

En el caso de la Especialización en Redes de Datos, el resultado es muy similar. De 25 estudiantes que tenían posibilidad de presentar el anteproyecto, sin contar con la metodología presentada en este artículo, solo 10 lo presentaron (efectividad del 40%). En cambio, de 25 estudiantes que fueron preparados con la metodología, 24 lo presentaron en un plazo máximo de un semestre (efectividad del 96%). En el programa de pregrado en Ingeniería de Sistemas, la diferencia fue todavía más notoria. De 128 estudiantes que podían presentar su anteproyecto, solo 46 lo hicieron en los grupos que no tuvieron preparación con la metodología (efectividad del 36%). Aquellos que fueron preparados con la metodología presentaron su anteproyecto en un solo semestre 95 de 97 estudiantes, lo

Tabla 2. Resultados comparativos

| Sem | Pendientes por anteproyecto* | | | | | | Presentaron anteproyecto en un semestre | | | | | |
|---------|------------------------------|-----|-----|-----------------|-----|-----|---|-----|-----|-----------------|-----|-----|
| | Sin metodología | | | Con metodología | | | Sin metodología | | | Con metodología | | |
| | MISC | ERD | ISC | MISC | ERD | ISC | MISC | ERD | ISC | MISC | ERD | ISC |
| I 2012 | 9 | 5 | 42 | 12 | 7 | 25 | 4 | 3 | 11 | 11 | 6 | 24 |
| II 2012 | 8 | 6 | 30 | 8 | 7 | 29 | 2 | 2 | 14 | 7 | 6 | 29 |
| I 2013 | 8 | 5 | 25 | 7 | 7 | 22 | 2 | 2 | 11 | 5 | 5 | 22 |
| II 2013 | 7 | 9 | 31 | 7 | 4 | 21 | 2 | 3 | 10 | 6 | 4 | 20 |

Fuente: elaboración propia.

MISC = Maestría en Ingeniería de Sistemas y Computación.

ERD = Especialización en Redes de Datos.

ISC = Ingeniería de Sistemas y Computación.

* Estudiantes que se encontraban en últimos semestres (9º y 10º) y aún no habían presentado el anteproyecto.

cual deja una estadística de efectividad del 97%. Debe anotarse que estas cifras han ido mejorando a medida que los estudiantes se han ido capacitando en la metodología, ya que se ha notado el beneficio de formular un anteproyecto a partir de tener absolutamente clara la Definición del Problema.

CONCLUSIONES

Es posible generar alta motivación en la fase final de un proceso de formación a partir de la capacitación de los estudiantes en una metodología que simplifique y aclare la formulación de un anteproyecto.

- Es posible que un anteproyecto se formule apropiadamente en tiempos menores a los supuestamente estimados, esto es, en tiempos menores a un semestre. Así mismo, que para que un anteproyecto pueda ser formulado y presentado en tiempo récord, todo lo que se necesita es contar con una metodología suficientemente clara y concreta que, a partir de parámetros conceptuales claros, le posibilite al estudiante tanto la redacción como la interrelación entre sus componentes.
- Una necesidad ingente en las universidades colombianas es preparar a los estudiantes en redactar, formular, proponer y, en general, escribir de manera que puedan comunicarse por escrito tan bien como lo pueden hacer verbalmente.
- Conocer y adoptar una metodología para formular anteproyectos es el primer paso firme para que el desarrollo del trabajo de grado o de la tesis tenga una base clara y concreta: la definición

del problema, y que cualquier formulación de un trabajo de grado o de una tesis puede desarrollarse a partir de un principio muy sencillo: tener clara la definición del problema.

FINANCIAMIENTO

Universidad Tecnológica de Pereira

REFERENCIAS

- Agencia Presidencial de Cooperación Internacional. (2012). *Manual de formulación de proyectos*. Bogotá, Colombia: Presidencia de la República.
- Briones, G. (1996). *Metodología de la investigación cuantitativa en ciencias sociales*. Bogotá, Colombia: Instituto Colombiano para el Fomento de la Educación Superior.
- Cortés, M. & Iglesias, M. (2004). *Generalidades sobre metodología de la investigación*. Ciudad del Carmen, Campeche. México: Universidad Autónoma del Carmen.
- Hernández, R. (2008). *Metodología de la investigación*. Ciudad de México: McGraw Hill Interamericana.
- Lerma, H. (2009). *Metodología de la investigación*. Bogotá, Colombia: Ecoe Ediciones.
- McConnell, S. (2005). *Desarrollo de proyectos informáticos*. NY, USA: McGraw Hill Companies.
- Ministerio de Educación Nacional. (2014). www.mineducacion.gov.co.
- Sabino, C. (1992). *El proceso de investigación*. Bogotá, Colombia: Editorial Panapo.
- Salinas, P. (2005). *Metodología de la investigación científica*. Mérida, Venezuela: Universidad de los Andes.





Desarrollo de algoritmo para detección y comando de robots humanoides en tareas de recolección

Development of an Algorithm for Humanoid Robot Detection & Command in Gathering Tasks

Germán Andrés Vargas Torres*, Ricardo Andrés Castillo Estepa**

Fecha de recepción: 21 de agosto de 2013

Fecha de aceptación: 5 de diciembre de 2014

Como citar: Vargas Torres, G. A., & Castillo Estepa, R. A. (2015). Desarrollo de algoritmo para detección y comando de robots humanoides en tareas de recolección. *Revista Tecnura*, 19(45), 127-139. doi:10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.3.a10

RESUMEN

Este artículo presenta un algoritmo para comandar un grupo de robots humanoides Bioid, organizándolos alrededor de un objeto de interés, detectado previamente por un sistema de visión externa. Los robots conforman un Sistema Multi-Agente (SMA) orientado hacia tareas de recolección cooperativa. Se detalla el desarrollo del SMA, así como cada componente del algoritmo de organización y la simulación en ambiente virtual. El algoritmo se subdivide en dos hilos dedicados: uno se encarga de visión de máquina (filtrado, detección de contornos y clasificación logrados a través de librerías de EmguCV) y cálculos en el espacio operacional, y el otro opera la comunicación inalámbrica ZigBee con los robots. Adicionalmente, los robots poseen su propio código embebido que les permite traducir una secuencia de instrucciones recibidas a patrones de marcha que los dirigen hacia el objeto de interés. El tiempo total de ejecución es tomado como la medida global de desempeño de interés.

Palabras clave: control de robots, robots humanoides, Sistemas Multi-Agente, sistemas de visión para robots, simulación por computador.

ABSTRACT

This article presents an algorithm which commands a group of Bioid humanoid robots in order to organize them around an object of interest, previously detected by an external vision system. The robots form a Multi-Agent System (MAS) oriented towards cooperative gathering tasks. Development of the MAS, as well as each of the organization algorithm's components and simulation inside a virtual environment, are all detailed. The algorithm is subdivided in two dedicated threads: one of which handles machine vision (filtering, contour detection and classification achieved through EmguCV libraries) and operational space calculations; while the other operates ZigBee wireless communication with the robots. Furthermore, the robots possess their own embedded code which enables them to translate a sequence of

* Ingeniero en Mecatrónica. Asistente de investigación, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia. Contacto: u1800960@unimilitar.edu.co

** Ingeniero en Mecatrónica, magister en Ingeniería Mecánica. Docente TC/Investigador Principal, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia. Contacto: ricardo.castillo@unimilitar.edu.co

received instructions into gait patterns which allow them to move towards the object of interest. Total execution time for the gathering task is chosen as the global performance measure to evaluate.

Keywords: computer simulation, humanoid robots, Multi-Agent Systems, robot control, robot vision systems.

INTRODUCCIÓN

El dominio de los Sistemas Multi-Agente (SMA) comprende todo sistema computarizado en el cual interactúan múltiples agentes racionales (Wooldrige, 2009). Un objetivo frecuente al hacer uso de Sistemas Multi-Agente en ingeniería es aprovechar la interacción entre los agentes para realizar tareas avanzadas mediante cooperación (Shoham & Leyton-Brown, 2007). Independiente del tipo de tarea por realizar, Cheng, Raja y Lesser (2013) indican que dicha cooperación se centra en optimizar una medida de desempeño global.

Los agentes de un SMA se caracterizan por poseer información y capacidades insuficientes para resolver el problema global. Puesto que los agentes “habitan” en un entorno complejo y dinámico, De Giacomo, Lespérance, Levesque y Sardina (2009) recalcan que los agentes establecen y ejecutan planes en tiempo real a fin de cumplir el conjunto de objetivos requeridos en la aplicación. En su caso, el desarrollo y uso del idioma de programación *IndiGolog* permite a los agentes planear mediante búsquedas destinadas a encontrar una serie de acciones que conformen una ejecución válida para el entorno estocástico (no determinístico).

Uno de los eventos que más ha gestado nuevos desarrollos en Sistemas Multi-Agente son las competiciones RoboCup Soccer, tanto en el ámbito de simulación, donde se busca simular estrategias de juego basadas en inteligencia artificial (Ping-Huan & Li, 2011), como en los juegos con los robots humanoides físicos, donde se usan técnicas tales como Razonamiento Basado en Casos (Kuo & Lin, 2008) para generar estrategias y planes que se adapten al estado estocástico del juego. Mediante dicha técnica, los casos (ejecuciones) anteriores

son evaluados con base en la solución deseada a fin de extraer y retener las acciones/decisiones de mayor utilidad.

La ingeniería de sistemas ha adoptado en gran medida los SMA, dado que la aplicación de sus herramientas garantiza que el software final emulará un comportamiento organizacional. Por ejemplo, Fu-sheng, Hong-bo, Guang-ping, Yang y Xu-yan (2009) crearon un modelo de coordinación basado en agentes, el cual fue aplicado en la industria metalúrgica. Dicho modelo aplicó planeación de grupos parciales (PGP; Partial-Group Planning), lo cual le permite al sistema cambiar de centralización a descentralización y viceversa a voluntad. En otro ámbito, existe un gran interés por la obtención de comportamientos cooperativos en equipos conformados por distintos tipos de robots; Zhiguo, Junming, Xu, Zhiliang y Jun (2011) usan un modelo basado en un protocolo IGRS (Intelligent Grouping and Resource Sharing) para integrar un robot móvil (Charlie-II) y un robot tipo perro (Cailun-II) mediante el uso de un lenguaje estándar para efectos de distribución de recursos, servicios colaborativos y conformación de grupos transitorios.

Las capacidades de los robots humanoides en términos de hardware y software los convierten en los agentes más avanzados que pueden conformar un SMA. Uno de los principales obstáculos para su implementación radica en la generación de patrones de marcha, dada su complejidad desde la óptica de los sistemas dinámicos. Su resolución se ha abordado tradicionalmente emulando los patrones de marcha de los seres humanos (Malmberg, 2011), dadas las similitudes en términos de fases de marcha y fuerzas en actuación. Mukovskiy, Slotine y Giese (2010) destacan que dichos patrones deben modificarse cuando múltiples humanoides

se desplazan e interactúan en el ambiente de trabajo, a fin de garantizar la estabilidad de las formaciones que establezcan. Los investigadores abordaron las modificaciones bajo la óptica de la Teoría de Contracción, en la cual la estabilidad de un agente individual permite derivar condiciones que garanticen la estabilidad de los demás agentes con los cuales interactúe en un determinado escenario.

En el caso de los SMA aplicados a tareas de recolección, las limitaciones de los robots humanoides en términos de destreza conllevan la necesidad de adecuar los objetos por recolectar para facilitar su manipulación, tal como se aprecia en McGill y Lee (2011). Un conjunto de n humanoides manipulando un objeto adquieren un comportamiento dinámico diferente; dicha complejidad adicional puede ser resuelta a nivel global en los SMA centralizados y a nivel de cada agente en los SMA descentralizados. El segundo caso implica la necesidad de un carácter adaptativo, tal como Gu, Thobbi y Sheng (2011) demuestran mediante la aplicación de aprendizaje por refuerzo: el agente hace uso de Q-Learning para aprender una trayectoria correcta para sus brazos según distintos tipos de inclinaciones del objeto por levantar, con base en la recolección por parte de un instructor humano.

La ejecución de tareas de recolección con robots se beneficia significativamente de la colaboración entre agentes en dos instancias: las negociaciones son vitales para distribuir y asignar adecuadamente los agentes a objetos de interés y la coordinación es vital para evitar colisiones entre agentes y garantizar manipulación correcta de los objetos cuando su peso o sus dimensiones requieren más de un agente para su recolección.

En este caso, la medida global de desempeño de interés es el tiempo que toma a los agentes completar la recolección de todos los objetos que se distribuyen en el ambiente. Adicionalmente, es importante evaluar el funcionamiento en paralelo de los procesos de comunicación, visión y ejecución de caminatas y garantizar la inexistencia de interferencias entre estos.

El presente artículo se organiza de la siguiente manera: la Sección 2 detalla los diversos elementos que componen el Sistema Multi-Agente que se desarrolló para tareas de recolección. Acto seguido, la Sección 3 desglosa el algoritmo implementado con base en las tareas ejecutadas por cada uno de sus hilos (subprocesos), así como el código ejecutado por los robots humanoides Bioloid. Los resultados obtenidos para cada subproceso y su validación se presentan en la Sección 4, y, finalmente, la Sección 5 enuncia las conclusiones inferidas del algoritmo.

DESARROLLO DEL SISTEMA MULTI-AGENTE

El presente Sistema Multi-Agente se desarrolló bajo el marco del proyecto de investigación Desarrollo de Estrategia con Aprendizaje On-Line para Comando de Grupo de Robots Humanoides Utilizando la Plataforma Robótica DARwIn-OP, perteneciente al Grupo de Investigación DAVINCI de la Universidad Militar Nueva Granada. Sus componentes de hardware se ilustran en la figura 1.

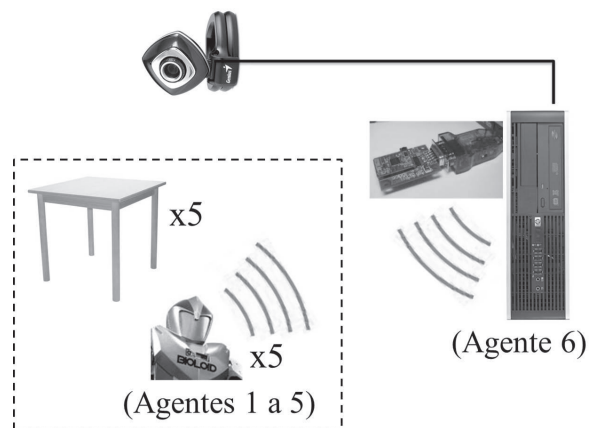


Figura 1. Componentes de Hardware en el SMA.

Fuente: elaboración propia.

El equipo de recolección está conformado por cinco robots humanoides Bioloid, los cuales interactúan con cinco mesas de diferentes

dimensiones, detalladas en la tabla 1. Los robots y las mesas se distribuyen en el entorno o espacio de trabajo; un área rectangular de 1,80 m por 1,35 m.

Tabla 1. Dimensiones de los objetos por recolectar

| Tipo de Mesa N.º | Cantidad | Forma | Dimensiones (m) |
|------------------|----------|----------------------|--------------------|
| 1 | 2 | Cuadrado | 0,3 x 0,3 |
| 2 | 1 | Rectángulo | 0,3 x 0,1 |
| 3 | 1 | Rectángulo | 0,5 x 0,3 |
| 4 | 1 | Triángulo Equilátero | 0,35 por cada lado |

Fuente: elaboración propia.

Debido a que los robots Bioloid no poseen visión de máquina, se incorpora un sistema de visión externa mediante una webcam ubicada en el techo del laboratorio para proveer una vista de planta superior del ambiente de trabajo. El computador que procesa el *stream* de video obtenido de la cámara se convierte en un sexto agente, encargado de transferir los datos procesados a los robots vía comunicación inalámbrica ZigBee. Tal como

se resaltó en la figura 1, el sexto agente es el único que no se encuentra en el interior del espacio de trabajo y opera en una ubicación remota.

Dada la complejidad de los robots humanoides, se desarrolla una representación abstracta de la arquitectura del agente en términos de componentes lógicos y sus interrelaciones, tal como se ilustra en la figura 2. Cada bloque agrupa una serie de subsistemas presentes en el robot físico y permiten simplificar la integración de dichos subsistemas, tanto en el humanoide físico como en la simulación.

Como ejemplo, el bloque de movimiento incluye el conjunto de servomotores que accionan las articulaciones de las piernas en el robot humanoide y su control de bajo nivel. Cuando se recibe la orden de ejecutar un determinado patrón de caminata desde el bloque de decisión, el bloque de movimiento se encarga de transformar la orden en las secuencias de posiciones y velocidades angulares que cada servomotor debe ejecutar para generar el movimiento correcto del robot humanoide. Este SMA se caracteriza por poseer una arquitectura de comando heterárquica en el plano de actuación, en la cual cada uno de los cinco robots tiene el

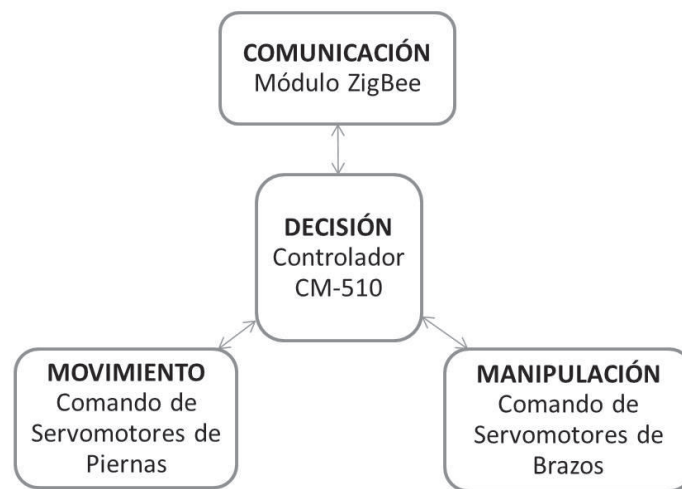


Figura 2. Representación de agentes mediante componentes lógicos.

Fuente: elaboración propia.

mismo grado de autoridad al interactuar con un objeto en proceso de recolección. En el plano de decisión, el SMA clasifica como centralizado (Xuan & Lesser, 2002) dada la importancia del rol del sexto agente para el cumplimiento del objetivo global.

ALGORITMO DE ORGANIZACIÓN

Dada la complejidad del Sistema Multi-Agente y la tarea por realizar, es de vital importancia evitar cuellos de botella en los diversos procesos que el algoritmo lleva a cabo que puedan conllevar pérdida/desactualización de información. Para este fin, el algoritmo se subdivide en una serie de componentes que se ejecutan en forma paralela gracias a la implementación de programación por hilos. Los robots humanoides se encuentran en continuo movimiento durante la ejecución del SMA, actualizando sus acciones en función de la información que reciben. Por ende, su código embebido actúa de forma paralela a los hilos del sexto agente. La figura 3 presenta la organización de cada proceso simultáneo.

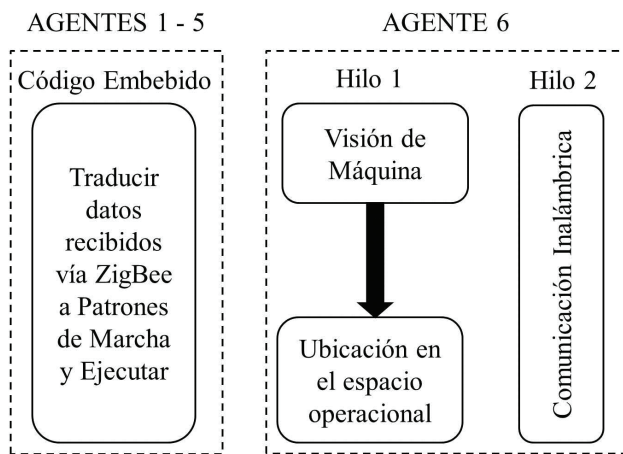


Figura 3. Procesos ejecutados de forma paralela.

Fuente: elaboración propia.

A continuación se detallan la implementación de cada uno de estos procesos, así como la recreación del SMA mediante un Ambiente Virtual. Dado que un mecanismo deliberativo es vital para evitar conflictos

entre acciones paralelas, se realiza una distribución de tareas emergentes, bajo la cual el sistema toma en cuenta la cercanía de cada agente a los objetos de interés a fin de asignar las tareas correspondientes.

Visión de máquina

El componente de visión está a cargo de extraer los elementos de interés (los objetos por recolectar y los robots humanoides) del *stream* de video entregado por la cámara. Se escoge implementar las librerías de EmguCV para simplificar el procesamiento de video, debido a su facilidad de uso y documentación disponible. Teniendo en cuenta que los robots humanoides Bioloid poseen un diseño homogéneo, se hace necesario dotarlos con marcadores triangulares de diversos colores que permitan al sistema distinguir la posición y orientación de cada uno en el siguiente componente del primer hilo. Asimismo, las mesas por recolectar poseen formas geométricas conocidas, por lo cual este segmento del código se enfoca hacia la extracción de figuras cuadradas y triangulares, lograda mediante la detección de contornos. El diagrama de flujo de este componente se presenta en la figura 4.

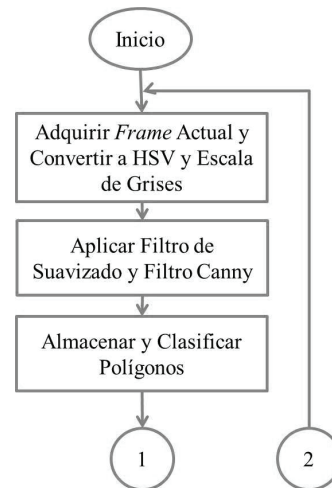


Figura 4. Diagrama de flujo para componente de visión.

Fuente: elaboración propia.

En primer lugar, la cámara captura 30 *frames* por segundo (fps) a una resolución de 640 por 480 píxeles. Al contrastar dicho valor con el tamaño del entorno de trabajo (1,80 m por 1,35 m), cada píxel tiene un tamaño equivalente a un cuadrado de 2,81 mm de lado, lo cual es una resolución elevada para la tarea por desarrollar. Acto seguido, el algoritmo crea dos copias del cuadro actual, las cuales se convierten a escala de grises y HSV respectivamente. La primera es la base para detectar contornos, mientras que la segunda permite clasificar a los cinco robots humanoides en la fase final del procesamiento. La imagen en escala de grises se somete a dos etapas de filtrado: un suavizado por descomposición de pirámide gaussiana, seguido por un filtro Canny.

Una vez obtenida la imagen posterior al filtrado Canny, los contornos cerrados detectados se asocian en polígonos. Se procede a almacenar los polígonos que cumplan las condiciones requeridas: tres caras para el caso de los triángulos o cuatro caras con ángulos cercanos a $\pi/2$ radianes para el caso de los cuadriláteros. El sistema distingue la mesa triangular de los marcadores de los robots mediante evaluación del área del polígono. Finalmente, para cada uno de los triángulos almacenados, el sistema recurre a la imagen HSV, de la cual adquiere el valor de matiz (*Hue*) en las coordenadas del triángulo a fin de determinar su color, y por ende, el identificador de robot correspondiente (1 a 5).

Ubicación en el espacio operacional

El componente de ubicación se centra en obtener la posición y orientación de los robots humanoides y las posiciones de las mesas, así como el cálculo del ángulo entre la orientación actual de cada robot y la orientación deseada (el robot observando en la dirección del objeto por recolectar más cercano). El diagrama de flujo correspondiente se muestra en la figura 5. El sistema toma las coordenadas del centroide para cada figura detectada en el componente de visión de máquina; dichas coordenadas

en píxeles pueden ser transformadas a coordenadas en metros con base en las relaciones expuestas en la ecuación (1). Es importante resaltar que el origen [0, 0] en la imagen corresponde a la esquina superior izquierda, contrario al origen del plano cartesiano que se sitúa en la esquina inferior izquierda; esto se refleja en el cálculo de la coordenada Y.

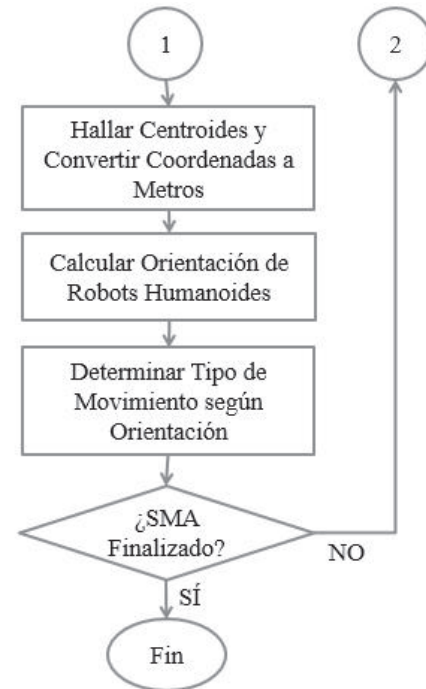


Figura 5. Diagrama de flujo para componente de ubicación.

Fuente: elaboración propia.

$$\begin{aligned} X_m &= X_{\text{píxeles}} * 0,00281 & [m] \\ Y_m &= 1,35 - (Y_{\text{píxeles}} * 0,00281) & [m] \end{aligned} \quad (1)$$

Los marcadores para los robots humanoides son triángulos isósceles, ubicados con el vértice de menor ángulo apuntando hacia el frente del robot. Para calcular la orientación de los robots, el sistema detecta el lado del triángulo de menor longitud y halla su ángulo α mediante la función $\text{atan2}()$ (adicionalmente, el ángulo se convierte a $\pi/2$ radianes automáticamente si se detecta que la línea es vertical). A continuación, el sistema evalúa la ubicación del vértice de menor ángulo

respecto al lado de menor longitud; dicho proceso permite determinar el cuadrante correcto y calcular la orientación verdadera β . Para el caso de $\alpha = \pi/2 \text{ rad}$, el vértice a la derecha de la línea significa $\beta = 0 \text{ rad}$ y el vértice a la izquierda de la línea significa $\beta = \pi \text{ rad}$. Para un valor de $\alpha \neq \pi/2 \text{ rad}$, los cálculos se realizan con base a la ecuación (2); el signo de α junto con la ubicación del vértice permite identificar el cuadrante. La figura 6 ilustra un ejemplo de este proceso para diferenciar los cuadrantes I y III.

$$\begin{aligned}
 \text{Cuadrante I:} & \quad \beta = |\alpha| - \pi/2 \\
 \text{Cuadrante II:} & \quad \beta = |\alpha| + \pi/2 \\
 \text{Cuadrante III:} & \quad \beta = 3\pi/2 - |\alpha| \\
 \text{Cuadrante IV:} & \quad \beta = 3\pi/2 + |\alpha|
 \end{aligned} \tag{2}$$

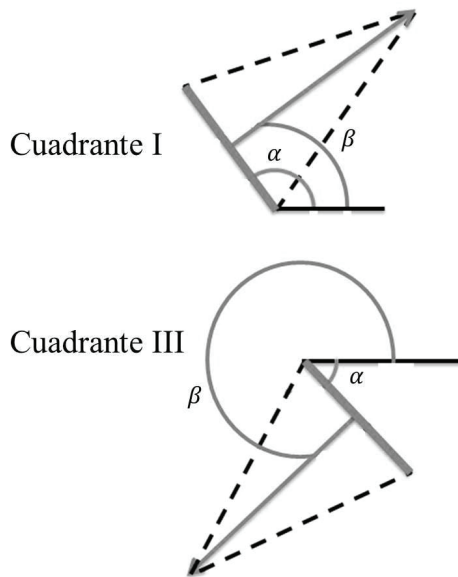


Figura 6. Detección de la orientación β .

Fuente: elaboración propia.

Mediante cálculo de la distancia euclídea, se halla y asocia la mesa que se encuentre a mayor proximidad para cada uno de los robots humanoides. Por último, el sistema traza una línea entre los centroides del robot y la mesa; su ángulo es comparado con la orientación del robot para determinar la dirección en la cual el robot debe girar a fin

de alinear su curso de movimiento. Un resultado positivo indica que el robot debe girar en sentido horario, un resultado negativo indica que debe girar en sentido antihorario y un resultado dentro del margen de tolerancia $[-\pi/12, \pi/12]$ radianes indica que debe avanzar en línea recta mientras su distancia al objetivo sea superior a 0,2 m.

Comunicación inalámbrica

Este componente se encarga de entablar comunicación bilateral con todos los robots humanoides, otorgándoles los comandos de movimiento necesarios para aproximarlos a los objetos por recolectar. Se hace uso de las librerías para comunicación ZigBee creadas por el fabricante Robotis©, así como el adaptador de ZigBee a USB previamente ilustrado en la figura 1. A fin de organizar la comunicación entre los cinco humanoides y el sexto agente, se crea la topología tipo estrella de la figura 7; se asigna un identificador único a cada robot y el sistema realiza un bucle infinito, cumpliendo un ciclo de intercambio de información (envío-recepción) con un agente distinto en cada iteración.

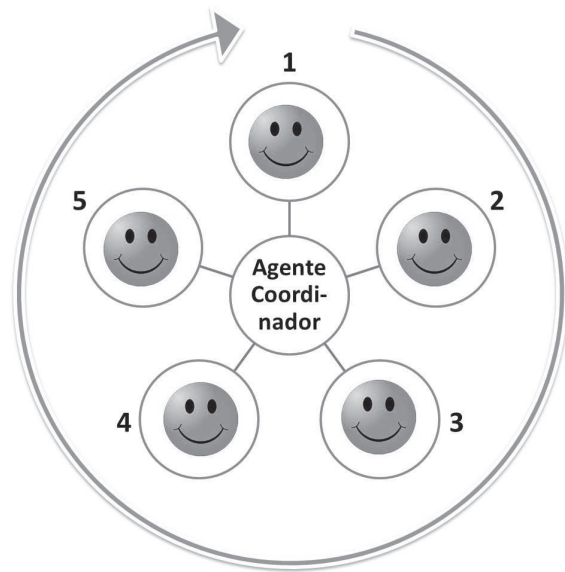


Figura 7. Topología para transporte de información.

Fuente: elaboración propia.

Se establece un mecanismo de “apretón de manos” (*handshake*) para garantizar que cada robot reciba la información correcta, en el cual este debe responder con el mismo dato que recibió. Si el sexto agente no recibe el dato equivalente, continuará enviando el dato original hasta confirmar su recepción, y así pasar al siguiente robot. Dicho proceso se presenta en la figura 8.

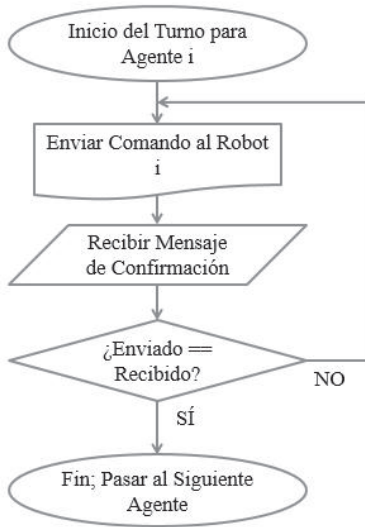


Figura 8. Mecanismo de “apretón de manos” (*handshake*).

Fuente: elaboración propia.

Puesto que los microcontroladores de los robots Bioloid poseen poder de procesamiento limitado, no es posible aplicar el paradigma de la programación orientada a objetos con los agentes, y por ende no se pueden implementar protocolos de comunicación FIPA. A fin de estandarizar los mensajes en el SMA, la información es enviada mediante una trama compuesta por un entero de cuatro dígitos, tal como se indica en la figura 9. El primer dígito identifica el robot destinatario (1 a 5), el segundo dígito corresponde a la categoría del mensaje ('0' indica que la categoría es “comando de movimiento”) y los dos últimos dígitos poseen el contenido del mensaje ('14' indica “realizar giro en sentido antihorario”).

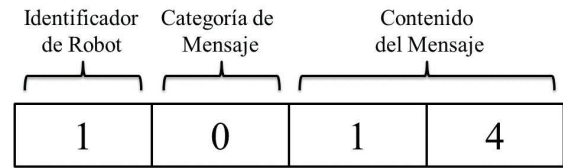


Figura 9. Trama de información.

Fuente: elaboración propia.

Ejecución de patrones de marcha

A diferencia de los componentes anteriores, este proceso corresponde a un algoritmo en C ejecutado por los microcontroladores de los robots humanoides. Su código es idéntico para los cinco robots; la única modificación es el valor de la variable de identificador, la cual permite distinguir cuáles son los mensajes destinados a cada robot. La estructura del código ejecutado por los robots se detalla en la figura 10.

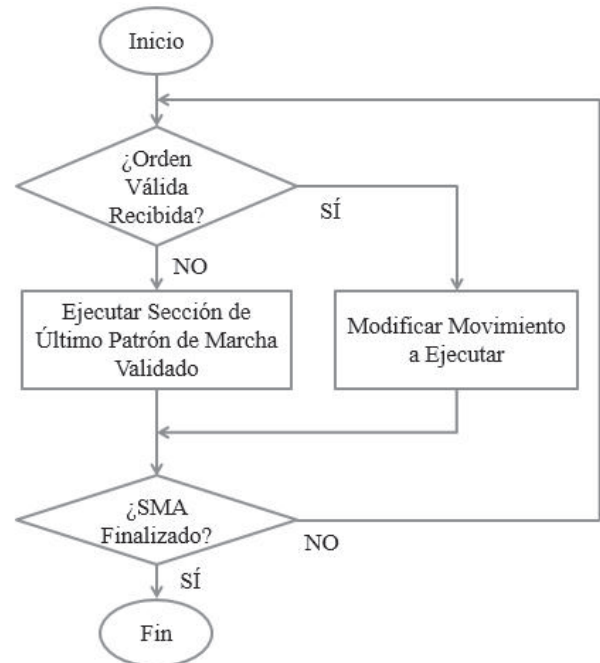


Figura 10. Componente de ejecución de patrones de marcha.

Fuente: elaboración propia.

En cada ciclo de ejecución, el proceso revisa si ha llegado un nuevo dato. En caso afirmativo, se verifica que el identificador concuerde con el robot, tras lo cual se extrae el contenido del mensaje y se verifica si es distinto al último comando de movimiento ejecutado por el robot. En caso negativo, el robot permanece estático o continúa ejecutando el último comando de movimiento tipo marcha recibido. Es importante distinguir movimientos finitos (sentarse, levantarse, levantar el objeto) de los patrones de marcha, los cuales se ejecutan de forma continua.

El kit de desarrollo que ofrece el fabricante incluye software para desarrollar movimientos y patrones de marcha, el cual incluye dieciséis patrones prediseñados que permiten al robot moverse en una variedad de direcciones. Para ejecutar dichas secuencias desde código en C, se implementan las librerías y documentación desarrolladas por el Humanoid Lab del "Instituto de Robòtica i Informàtica Industrial, CSIC-UPC". Debido a que todos los procesos del robot quedan en espera hasta terminar la ejecución de un movimiento, se hace necesario subdividir los patrones de marcha para permitir al robot leer periódicamente el buffer de recepción ZigBee y verificar si ha llegado un nuevo comando.

A fin de permitir a los robots desplazarse mientras cargan un objeto, se crean copias de los patrones de marcha predefinidos en las cuales se modifica la posición de los brazos del robot. Tal como se indica en Saab, Souères y Fourquet (2009) y Motoi, Ikebe y Ohnishi (2007), el centro de masa del robot varía al combinar manipulación y locomoción, por lo cual dicha variación se debe compensar cambiando la inclinación del robot a nivel de su articulación dorsal.

Elaboración de ambiente virtual

Dada la complejidad de los Sistemas Multi-Agente compuestos por robots, su simulación suele llevarse a cabo únicamente por medio de Interfaces

Gráficas de Usuario (GUI) simples, con representación vía consola de texto o escenarios en dos dimensiones. Se hizo uso del software Webots© para facilitar la comprobación de la totalidad del algoritmo de comando del SMA, puesto que se elimina la necesidad de programar el entorno gráfico y los modelos 3D de los agentes.

Se escoge evaluar el algoritmo con dos robots humanoides y una única mesa cuadrada por recolectar; dicho número de agentes es óptimo dadas las dimensiones de la mesa. Se hace uso del modelo del robot humanoide DARwIn-OP para reemplazar los robots Bioloid, puesto que son fabricados por la misma empresa y la ejecución de sus patrones de marcha es análoga. Dado que Webots© está basado en la programación orientada a objetos, tanto los agentes como la mesa se representan creando objetos de sus clases correspondientes ("robot" y "sólido", respectivamente).

Siguiendo la representación abstracta previamente establecida en la figura 2, el componente central de decisión se representa mediante el archivo principal del controlador programado y los componentes restantes se asocian al incluir librerías predefinidas y llamar sus funciones correspondientes. La mesa es importada a partir de un modelo CAD, lo cual permite asociar adecuadamente sus fronteras (*bounding object*) y simular reacciones físicas de contacto mediante el motor de física del software.

METODOLOGÍA

A fin de evaluar el desempeño del Sistema Multi-Agente, se requiere definir una situación estándar de exploración del ambiente y recolección de objetos: se ubica una única mesa y dos agentes recolectores en el interior del ambiente. Las variables iniciales de los agentes desplegados son la orientación y la distancia respecto a la mesa. Esta situación requiere el uso por parte de los agentes de todos los subprocesos que componen el algoritmo de organización.

Se realizan múltiples ejecuciones modificando las posiciones y orientaciones de los agentes de forma aleatoria, y se analizan las subsecuentes mediciones de los parámetros de desempeño (tiempo de ejecución, tasa de errores, entre otros). La situación estándar de exploración y recolección, así como los parámetros de desempeño se detallan con mayor profundidad en la siguiente sección.

RESULTADOS

Los resultados de desempeño del Sistema Multi-Agente en la situación estándar son analizados en tres etapas. Una etapa preliminar corresponde a la valoración individual del proceso de visión de máquina, el cual es el componente de mayor complejidad en el algoritmo de organización. La segunda corresponde a la simulación del algoritmo completo en el interior del ambiente virtual. Finalmente, se verifica la ejecución de todos los componentes de manera simultánea en la tarea de recolección.

Resultados de visión de máquina

Para evaluar el proceso de visión, se distribuyen todos los marcadores de los robots y las mesas por recolectar en posiciones y orientaciones aleatorias a lo largo del espacio de trabajo. El componente de visión es denominado robusto si posee la capacidad de detectar los marcadores y las mesas sin ser afectado por el ruido debido al patrón de baldosas del suelo y la iluminación artificial del laboratorio. La figura 11 muestra la imagen resultante tras el procesamiento, en la cual se han extraído y clasificado exitosamente todos los elementos de interés del espacio de trabajo. Es importante destacar la eficiencia del código implementado, puesto que la tasa de *frames* por segundo (fps) nunca disminuye de 30, valor óptimo para aplicaciones en robótica.

Simulación en ambiente virtual

Se definen los siguientes parámetros iniciales para configurar la situación estándar definida en la

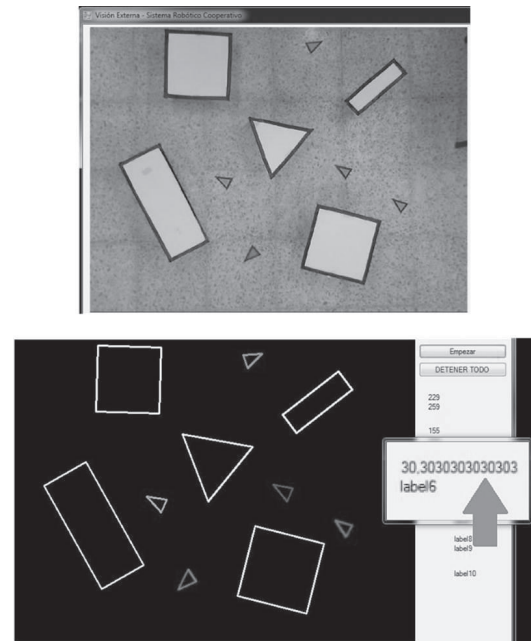


Figura 11. Extracción de elementos de interés.

Fuente: elaboración propia.

metodología: usando un generador de números aleatorios, ambos robots son ubicados a distancias de la mesa oscilando entre 0,75 y 1,25 metros y ángulos entre 0 y π radianes. Dicho rango de distancias se escoge con el objetivo de maximizar el desplazamiento de los robots sin exceder el límite inferior del espacio de trabajo (1.35 metros de ancho).

Como medida de desempeño global, se escoge el tiempo total de ejecución, medido desde el inicio de la simulación hasta el posicionamiento adecuado de ambos robots alrededor de la mesa para recolección. La posición y orientación final del robot se determina como fallida si, al levantar sus brazos, ambas manos no establecen contacto con la mesa.

Un ejemplo de ejecución de la simulación se presenta en la figura 12, y todos los resultados de ejecuciones se muestran en la tabla 2, donde d_1 , d_2 y θ_1 , θ_2 indican la distancia a la mesa y el ángulo de orientación de cada robot, y "tiempo" indica el tiempo total de ejecución en segundos. A pesar

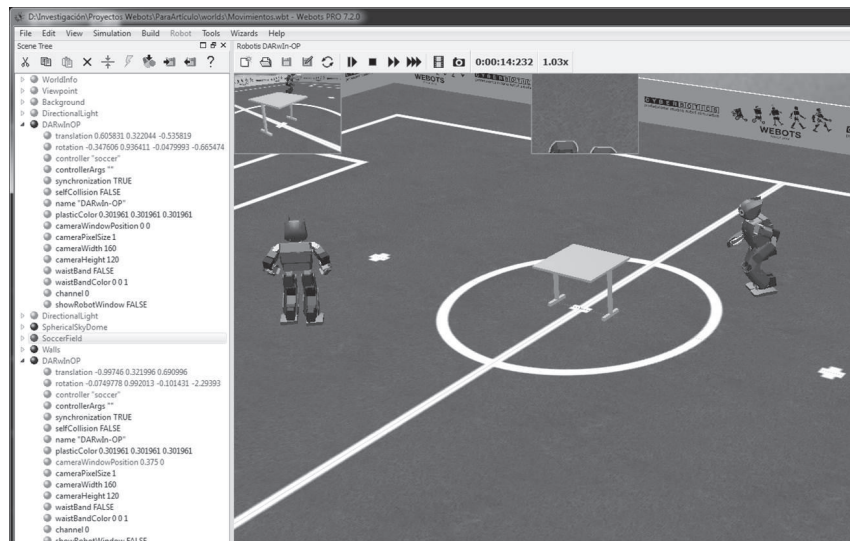


Figura 12. Ejecución de la simulación en Webots©.

Fuente: elaboración propia.

de un mínimo de aproximadamente 20 segundos, la tarea fue frecuentemente completada entre 32 y 36 segundos.

Tabla 2. Resultados de simulación.

| Prueba | d_1 (m) | θ_1 (rad) | d_2 (m) | θ_2 (rad) | Tiempo (s) |
|--------|-----------|------------------|-----------|------------------|------------|
| 1 | 1,23 | 0 | 0,94 | 3,1416 | 35,464 |
| 2 | 1,21 | 1,3298 | 1,0837 | 2,74 | 32,664 |
| 3 | 1,0679 | 2,8668 | 1,1677 | 1,216 | 33,544 |
| 4 | 0,7702 | 0,4286 | 1,2457 | 2,1501 | 19,976 |
| 5 | 0,9727 | 3,1321 | 0,9394 | 1,5521 | 33,48 |

Fuente: elaboración propia.

Validación en tarea de recolección

La ejecución simultánea de todos los componentes se realizó con la misma medida de desempeño global (tiempo total de ejecución) y la misma cantidad de elementos utilizados en la simulación (2 robots humanoides Bioloid y una mesa de geometría cuadrada). Se realizaron seis pruebas, en las cuales los robots y la mesa fueron ubicados en posiciones aleatorias, garantizando que la distancia de los

robots a la mesa estuviera en un rango entre 0,75 y 1,25 metros y la orientación inicial de los robots no coincidiera con la dirección hacia la mesa.

Los datos obtenidos a partir de las pruebas se presentan en la tabla 3, donde la columna “Correcciones” corresponde al total de correcciones de orientación realizadas por los robots durante la prueba, y la columna “Error de Detección” corresponde al número de veces que el algoritmo no detectó adecuadamente el cumplimiento de la orientación deseada por parte del robot y por ende se produce *overshoot*.

Tabla 3. Resultados de pruebas en el SMA.

| Prueba | Duración (s) | Correcciones | Error de Detección |
|--------|--------------|--------------|--------------------|
| 1 | 18,48 | 2 | 1 |
| 2 | 23,08 | 4 | 2 |
| 3 | 19,52 | 6 | 1 |
| 4 | 29,24 | 5 | 3 |
| 5 | 25,42 | 6 | 2 |
| 6 | 17,15 | 0 | 1 |

Fuente: elaboración propia.

El menor tiempo en el cual se completó la secuencia de movimientos fue de aproximadamente 17 segundos. Se observó que los robots humanoides presentan un grado significativo de oscilación lateral mientras se desplazan; puesto que los marcadores se ubican sobre la cabeza de los robots, dicha oscilación afecta la medición de su orientación y puede causar cambios de sentido de giro innecesarios una vez el robot se encuentra con una orientación cercana a la deseada.

CONCLUSIONES

La implementación de componentes paralelos mediante programación por hilos, junto con el uso de las librerías de EmguCV, permitió simplificar considerablemente el desarrollo del sexto agente y garantizar el rendimiento del sistema al evitar interferencia mutua entre el proceso de comunicación inalámbrica ZigBee y el proceso de visión de máquina a 30 *frames* por segundo (fps).

El diseño de las tramas de datos y los mecanismos para verificar el mensaje y el nuevo comando de movimiento optimizan la ejecución de los patrones de marcha en los robots humanoides Bio-loid, al evitar la ejecución de órdenes destinadas a agentes diferentes o la repetición de reenvío/ejecución de órdenes previamente realizadas.

Las mediciones del SMA llevadas a cabo por el algoritmo (corrección de orientación y distancia al objetivo) son susceptibles a variaciones inducidas por la oscilación de los robots al desplazarse y las condiciones del entorno de trabajo (patrón de baldosas, luz artificial). Dichas variaciones pueden extender el tiempo que toma a los robots cumplir la tarea de recolección.

FINANCIAMIENTO

Este artículo se deriva del proyecto de investigación ING 1198: Desarrollo de Estrategia con Aprendizaje On-Line para Comando de Grupo de Robots Humanoides Utilizando la Plataforma Robótica DARwIn-OP, del Grupo de Investigación DAVINCI,

perteneciente al Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Militar Nueva Granada. El proyecto posee el aval y financiamiento de la Universidad Militar Nueva Granada.

REFERENCIAS

- Cheng, S., Raja, A. & Lesser, V. (2013). Multiagent meta-level control for radar coordination. *Web Intelligence and Agent Systems: An International Journal*, 11(2) (Jul.), 81-105.
- De Giacomo, G., Lespérance, Y., Levesque, H., & Sardina, S. (2009). IndiGolog: A high-level programming language for embedded reasoning agents. En R. Bordini, M. Dastani & A. El Fallah Seghrouchni, *Multi-agent programming: languages, tools and applications* (pp. 31-72). New York, United States of America: Springer.
- Fu-sheng, Z., Hong-bo, W., Guang-ping, Z., Yang, Y. & Xu-yan, T. (2009). Multi-softMan coordination model and its application in metallurgical construction project management. *New Trends in Information and Service Science, 2009. NISS '09. International Conference on*, Jun. 30–Jul. 2 (pp. 963-968).
- Gu, Y., Thobbi, A. & Sheng, W. (2011). Human-robot collaborative manipulation through imitation and reinforcement learning. *Information and Automation (ICIA), 2011 IEEE International Conference on*, 6-8 Jun (pp. 151-156).
- Kuo, J. & Lin, H. (2008). Cooperative RoboCup agents using genetic case-based reasoning. *Systems, Man and Cybernetics, 2008. SMC 2008. IEEE International Conference on*, 12-15 Oct. (pp. 613-618).
- Malmberg, R. (2011). A comparison between robot gait and human gait with the help of literature research and Gait Analysis of the Nao Robot H25. Recuperada de <http://www.personeel.unimaas.nl/roos/robotlab/files/Roos%20Malmberg.pdf>
- McGill, S. & Lee, D. (2011) Cooperative humanoid stretcher manipulation and locomotion. *Humanoid Robots (Humanoids), 2011 11th IEEE-RAS International Conference on*, 26-28 Oct. (pp. 429-433).
- Motoi, N., Ikebe, M. & Ohnishi, K. (2007). Real-Time Gait Planning for Pushing Motion of Humanoid

- Robot. *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, 3(2) (May.), 154,163.
- Mukovskiy, A., Slotine, J. & Giese, M. (2010). Design of the dynamic stability properties of the collective behavior of articulated bipeds. *Humanoid Robots (Humanoids), 2010 10th IEEE-RAS International Conference on*, 6-8 Dec. (pp. 66-73).
- Ping-Huan, K., & Li, T. (2011). Development of simulator for kid-sized humanoid soccer in RoboCup. *System Science and Engineering (ICSSE), 2011 International Conference on*, 8-10 Jun. (pp. 155-160).
- Saab, L., Souères, P. & Fourquet, J. (2009). Coupling manipulation and locomotion tasks for a humanoid robot. *Advances in Computational Tools for Engineering Applications, 2009. ACTEA '09. International Conference on*, 15-17 Jul. (pp. 84-89).
- Shoham, Y., & Leyton-Brown, K. (2007). *Multiagent systems: algorithmic, game-theoretic, and logical foundations*. New York, United States of America: Cambridge University Press.
- Wooldridge, M. (2009). *An introduction to multiagent systems* (2.^a Ed.). Glasgow, United Kingdom: Wiley.
- Xuan, P. & Lesser, V. (2002). Multi-Agent Policies: From Centralized Ones to Decentralized Ones. *Proceedings of the 1st International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems* (Vol. Part 3), 15-19 Jul. (pp. 1098-1105).
- Zhiguo, S., Junming, W., Xu, L., Zhiliang, W. & Jun, T. (2011). IGRS protocol based mobile service robot positioning and multi-robot collaboration for smart home. *Control Conference (CCC), 2011 30th Chinese*, 22-24 Jul. (pp. 4741-4746).





Parámetros de configuración en módulos XBEE-PRO® S2B ZB para medición de variables ambientales

Configuration Parameters in Module XBEE-PRO® ZB S2B for Measuring Environmental Variables

Carlos Alberto Vera Romero*, Jhon Erickson Barbosa Jaimes**,
Diana Carolina Pabón González***

Fecha de recepción: 2 de septiembre de 2014

Fecha de aceptación: 6 de abril de 2015

Como citar: Vera Romero, C. A., Barbosa Jaimes, J. E., & Pabón González, D. C. (2015). Parámetros de configuración en módulos XBEE-PRO® S2B ZB para medición de variables ambientales. *Revista Tecnura*, 19(45), 141-157. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.3.a11

RESUMEN

Este artículo presenta información sobre la configuración de la comunicación inalámbrica mediante los protocolos del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos IEEE 802.4.15 y ZigBee®. Haciendo uso de los módulos de radiofrecuencia XBee-PRO® S2B ZB de Digi International Inc., se muestra la fase de diseño del enlace inalámbrico utilizando la topología estrella; se realiza la caracterización de los parámetros para configurar los dispositivos de radiofrecuencia que permiten la comunicación para la medición de los parámetros de algunas variables ambientales mediante el acoplamiento de diversos sensores utilizando el XBee Shield para la placa del microcontrolador Arduino Mega 2560. Se forman cuatro nodos, cada uno de los cuales permite medir cuatro variables: temperatura ambiental, humedad relativa, precipitación

y radiación solar global. A su vez, el coordinador y una tarjeta Arduino Ethernet permiten visualizar los datos en tiempo real mediante un aplicativo en la red de área local.

Palabras clave: IEEE 802.15.4, interfaz de programación de aplicaciones, XBee-Pro® S2B, ZigBee®.

ABSTRACT

This article presents information on the configuration of the wireless communication through the Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE 802.4.15 and ZigBee® protocols, using RF modules XBee-PRO® ZB S2B Digi International Inc. The design phase of the wireless link using the star topology is shown; it is also characterized the parameters for the configuration of radio frequency devices that enable the communication for the measurement of parameters of some environmental

* Ingeniero electrónico, especialista en Pedagogía Universitaria, especialista en Gestión de Proyectos Informáticos, magíster en Controles Industriales. Docente Asistente, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería, Pamplona, Colombia. Contacto: carlos.vera@unad.edu.co

** Ingeniero mecánico, magíster en Ingeniería Mecánica. Docente Asistente, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería, Cúcuta, Colombia. Contacto: jhon.barbosa@unad.edu.co

*** Ingeniera mecatrónica, especialista en Pedagogía para el Desarrollo del Aprendizaje Autónomo. Docente Ocasional, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Vicerrectoría de Medios y Mediaciones Pedagógicas, Pamplona, Colombia. Contacto: diana.pabon@unad.edu.co

variables, by coupling various sensors using the XBee shield for Arduino Mega 2560 microcontroller board making up four nodes, allowing each one to measure four variables: environment temperature, relative humidity, precipitation and global solar radiation. In turn, the coordinator and

Arduino Ethernet card allows to observing the data in real time through an application on the local area network.

Keywords: application programming interface, IEEE 802.15.4, XBee-Pro® S2B, ZigBee®.

INTRODUCCIÓN

Una red de sensores inalámbrica es una colección de nodos organizados en una red cooperativa (Hill, y otros, 2000). Las redes de sensores son la clave para la recopilación de la información que necesitan los entornos inteligentes, ya sea en edificios, servicios públicos, domótica, en sistemas industriales, transporte u otros lugares (Lewis, 2004).

La creación de redes de sensores inalámbricos es una tecnología emergente que tiene una amplia gama de aplicaciones potenciales, incluyendo la vigilancia del medio ambiente, espacios inteligentes, los sistemas médicos y la exploración robótica (Ye, Heidemann, & Estrin, 2002).

Las redes inalámbricas de sensores comúnmente se les denominan WSN (Wireless Sensor Network) (Stankovic, 2008). Las WSN es un sistema compuesto por Tx/Rx (transceptores) RF, sensores, microcontroladores y fuentes de poder, que generalmente es autoorganizable, autoconfigurable, autodiagnosticable y autoreparable (Jiménez, Ravelo, & Gómez, 2010). Las WSN han estado atrayendo un creciente interés por apoyar a una nueva generación de sistemas de computación ubicua con un gran potencial para muchas aplicaciones, tales como vigilancia, control medioambiental, control de atención médica o de domótica (Koubâa, Alves, & Tovar, 2006).

Una red inalámbrica de sensores permite obtener información de un fenómeno físico, procesando la información para luego ser enviada a un nodo central de coordinación en forma remota, pero con ciertas restricciones. Ahora bien, para

el diseño de una red de este tipo existen diversas tecnologías de comunicación inalámbrica, pero este artículo se centra en la utilizada por los módulos de radiofrecuencia XBee-Pro® S2B. El protocolo IEEE 802.15.4 (Howitt & Gutierrez, 2006) especifica la subcapa MAC y la capa física para LR-WPAN (en lo sucesivo designada como PAN, o sea, red de área personal). El protocolo 802.15.4 IEEE está muy asociado con el protocolo ZigBee® (ZigBee Alliance, 2005), que especifica las capas superiores del protocolo IEEE 802.15.4 para proporcionar una pila de protocolo completa, de bajo costo, bajo consumo de energía y de baja tasa de transmisión en comunicaciones inalámbricas (Koubâa, Alves, & Tovar, 2007). ZigBee® / IEEE 802.15.4 es una tecnología inalámbrica basada en estándares diseñados para satisfacer las necesidades de las redes de bajo costo, de sensores inalámbricos de baja potencia y de control en casi cualquier mercado, además se puede utilizar en casi cualquier lugar, es fácil de implementar y requiere poca energía para funcionar (Kinney, 2003). Los módulos XBee son dispositivos utilizados para enviar y recibir datos de forma inalámbrica valiéndose del protocolo IEEE 802.15.4, los cuales pueden funcionar dentro de una topología de red de diferentes maneras, incluyendo el Coordinador, Router y End Device (Faludi, 2010).

La topología de una red de sensores inalámbricos puede ser clasificada en cuatro categorías: topología punto, topología de estrella, topología de clúster árbol y topología de malla (figura 1) (Faludi, 2010).

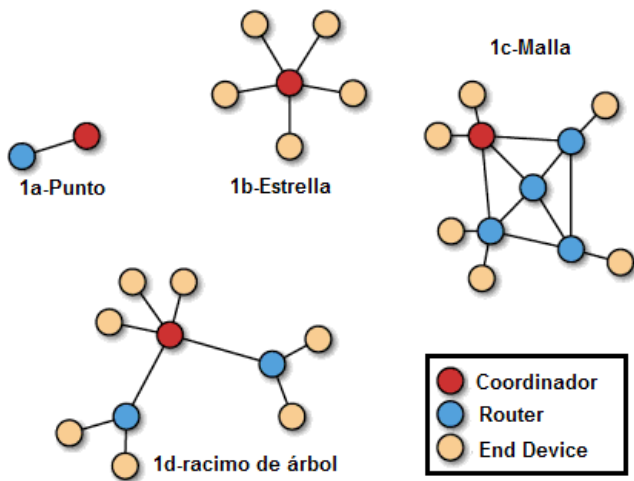


Figura 1. Topologías ZigBee®: par, estrella, malla y de árboles de racimo.

Fuente: Faludi (2010).

Este artículo proporciona un estudio de la aplicación de las redes de sensores inalámbricos aplicados en la medición de algunas variables meteorológicas. Se diseña un sistema de hardware y software con capacidad de acceso y gestión de datos de forma remota, con una topología estrella, la cual está formada por un módulo que desempeña el papel de coordinador de la red, y cuatro módulos adicionales que cumplen la función de dispositivos finales. La tabla 1 muestra la asignación dada a cada dispositivo XBee-PRO® de la serie 2.

Tabla 1. Asignación rol dispositivo XBee-PRO® S2B

| Dispositivo | Función |
|-------------|--------------|
| Módulo 0 | Coordinador |
| Módulo 1 | End Device 1 |
| Módulo 2 | End Device 2 |
| Módulo 3 | End Device 3 |
| Módulo 4 | End Device 4 |

Fuente: elaboración propia.

METODOLOGÍA

Caracterización de los parámetros en la configuración de los módulos XBee-Pro® S2B. Módulo XBee-Pro® S2B ZB soporta tanto modo transparente como API (Application Programming Interface) interfaces seriales (Digi®, 2009).

Funcionamiento transparente: los módulos actúan como una línea serie de reemplazo. Todos los datos recibidos a través del UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) pin DIN se ponen en cola para la transmisión por radiofrecuencia (RF). Cuando los datos de RF se reciben, los datos se envían a través del pin DOUT.

Operación de la API: es una alternativa a la operación transparente. La API basada en tramas extiende el nivel al de una aplicación host, de modo que puede interactuar con las capacidades de red del módulo.

Cuando está en modo API, todos los datos que entran y salen del módulo están contenidos en las tramas que definen las operaciones o eventos dentro del módulo (Yawit, 2011).

Para comprender la configuración de los módulos XBee-PRO® S2B, se realizó una descripción de los principales parámetros que tienen que ser establecidos en los dispositivos RF para que la red pueda funcionar de forma correcta. A continuación se describe los parámetros configurables en los módulos XBee-Pro® S2B ZB.

Parámetro CH: Permite asignar el canal que será utilizado para transmitir o recibir datos entre los módulos (tabla 2).

Tabla 2. Parámetro CH

| Rango | 0x0B-0x1A |
|--------------------|-----------|
| Valor seleccionado | 0x0c |

Fuente: elaboración propia.

Parámetro ID: Permite identificar a una Red de Área Personal en particular (tabla 3). Para enviar

un mensaje a todas las Redes de Área Personal el valor de ID debe ser 0xFFFF (se supone la convención de Lenguaje C para representar números hexadecimales).

Tabla 3. Parámetro ID

| Parámetro ID | |
|--------------------|----------|
| Rango | 0-0xFFFF |
| Valor seleccionado | 123 |

Fuente: elaboración propia.

Parámetro DH: Corresponde a los últimos 32 bits (más significativos) de los 64 bits correspondientes a la dirección de destino (tabla 4). Este valor, en conjunto con el parámetro DL, forma la dirección de destino usada para la transmisión. Para transmitir utilizando direcciones de 16 bits, el valor de DH debe ser cero, y el valor de DL debe ser inferior a 0xFFFF.

Parámetro DL: Corresponde a los primeros 32 bits (menos significativos) de los 64 bits que forman la dirección de destino. El valor de DL, en conjunto con el valor de DH, define la dirección de destino. Para emplear direcciones de 16 bits, el valor de DH debe ser 0 y el valor de DL debe ser menor a 0xFFFF. En la tabla 5 se muestra la elección.

Parámetro MY: Define una dirección de origen de 16 bits. Para deshabilitar la dirección de 16 bits y habilitar la dirección de 64 bits, se debe poner MY=0xFFFF. La dirección de origen de 64 bits siempre está habilitada. La tabla 6 muestra el valor elegido.

Parámetro SH: admite leer los 32 bits más significativos de los 64 bits que forman la dirección de origen. La dirección de origen es un número único, asignado por el IEEE para cada módulo de RF.

Parámetro SL: permite leer los 32 bits menos significativos de los 64 bits que forman la

Tabla 4. Parámetro DH

| Rango | 0-0xFFFFFFFF | | | | |
|--------------------|--------------|---------|---------|---------|---------|
| Valor seleccionado | COOR | MOD 1 | MOD 2 | MOD 3 | MOD 4 |
| | 0 | DH Coor | DH Coor | DH Coor | DH Coor |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Parámetro DL

| Rango | 0-0xFFFFFFFF | | | | |
|--------------------|--------------|---------|---------|---------|---------|
| Valor seleccionado | COOR | MOD 1 | MOD 2 | MOD 3 | MOD 4 |
| | 0 | DL Coor | DL Coor | DL Coor | DL Coor |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Parámetro MY

| Rango | 0-0xFFFF | | | | |
|--------------------|----------|-------|-------|-------|-------|
| Valor seleccionado | COOR | MOD 1 | MOD 2 | MOD 3 | MOD 4 |
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |

Fuente: elaboración propia.

dirección de origen. La dirección de origen es establecida por el IEEE, como un número único para cada módulo.

Parámetro RN: El valor de este parámetro es el mínimo valor usado en el exponente del algoritmo de back-off, para determinar los periodos de tiempo que se debe esperar antes de transmitir de acuerdo con el método CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance), con el objetivo de evitar colisiones. Según la tabla 7, el valor asignado en la configuración es el valor por defecto RN=0, lo cual permite evitar una colisión; es deshabilitada durante la primera iteración del algoritmo.

Tabla 7. Parámetro RN

| Rango | 0-3 |
|--------------------|-----|
| Valor seleccionado | 0 |

Fuente: elaboración propia.

Parámetro CE: El valor de este parámetro define el papel que desempeña el módulo dentro de la red y se ha definido según la tabla 8.

Tabla 8. Parámetro CE

| CE | Configuración | | | | |
|--------------------|---------------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | Coordinador | | | | |
| 0 | Router | | | | |
| Valor seleccionado | COOR | MOD 1 | MOD 2 | MOD 3 | MOD 4 |
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |

Fuente: elaboración propia.

Parámetro SC: Este parámetro define la lista de los canales que son examinados para determinar si están activos y el nivel de energía detectada. Este parámetro afecta cuando inicia el modo de comandos, durante la asociación de dispositivos

finales y durante el establecimiento de un coordinador. Un bit representa el canal (desde el 11 hasta el 26). Con el valor por defecto se examinan los canales 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23. El valor asignado ha sido SC=0x1FFE.

bit 0-0x0B bit 4-0x0F bit 8 – 0x13 bit12 – 0x17
 bit 1-0x0C bit 5-0x10 bit 9 – 0x14 bit13 – 0x18
 bit 2-0x0D bit 6-0x11 bit 10– 0x15 bit14 – 0x19
 bit 3-0x0E bit 7-0x12 bit 11– 0x16 bit15 – 0x1A

Parámetro SD: establece el tiempo para inspeccionar el canal. Para un dispositivo final, establece el tiempo durante el cual se examina el canal en un proceso de asociación. En el caso de un coordinador, si la opción de reasignación de identificador de PAN está activada, establece el periodo de tiempo durante el cual se examina el canal para localizar redes existentes. Asimismo, si la opción para reasignar el canal está activada, determina la cantidad de tiempo durante el cual se examinará el nivel de energía del canal, para determinar sobre cuál canal se operará. SD varía entre 0 a 15. El tiempo es dado por: tiempo = (número de canales)*(2^{SD})*(15,36 ms). La tabla 9 muestra el valor seleccionado.

Tabla 9. Parámetro SD

| Rango | 0-0x0F |
|--------------------|--------|
| Valor seleccionado | 4 |

Fuente: elaboración propia.

Parámetro A1: Este valor permite establecer cómo un dispositivo final se puede asociar, como se indica en las siguientes opciones de la tabla 10.

Parámetro A2: Define cómo el coordinador se puede asociar. En la tabla 11 se observan las opciones.

Tabla 10. Parámetro A1

| Número de bit | Opción de Asociación |
|---|---|
| 0 – reasignación de identificador de PAN (ID PAN) | 0 – El dispositivo final solo podrá asociarse con un coordinador que tenga el mismo identificador de red PAN. 1 – El dispositivo final debe asociarse con un coordinador que opere con cualquier identificador de PAN. |
| 1 – Reasignación de canal | 0 – Solo podrá asociarse con un coordinador que opere dentro de su mismo canal 1 – Debe asociarse a un coordinador que opere en cualquier canal. |
| 2–Auto asociación | 0 – El dispositivo final no intentará asociarse. 1–El dispositivo final debe intentar asociarse hasta lograrlo. |
| 3 – Sondeo del coordinador | 0 – El dispositivo no sondeará al coordinador para requerir mensajes pendientes. 1 – El dispositivo enviará un requerimiento. |
| 4-7 | Reservados |
| Valor seleccionado | 0 |

Fuente: Digi® (2009)

Tabla 11. Parámetro A2

| Número de bit | Opción de asociación |
|--|--|
| 0 – reasignación de identificador de PAN(ID PAN) | 0 – El coordinador no examinará los canales para encontrar identificadores de PAN. Este operará con su identificador de PAN. 1 – El coordinador examinará los canales para determinar identificadores de PAN disponibles. Si un identificador de PAN encontrado crea conflicto, el identificador será cambiado. |
| 1 – Reasignación de canal | 0 – El coordinador no examinará el nivel de energía para encontrar un canal que se encuentre libre. El coordinador operará en el canal establecido por el parámetro CH. 1 – El coordinador examinará la energía de los canales para encontrar un canal que se encuentre libre y operará en este. |
| 2–Permitir Asociación | 0 – El coordinador no permitirá que cualquier dispositivo se asocie con él. 1 – El coordinador permitirá que un dispositivo se asocie con él. |
| 4-7 | Reservados |
| Valor seleccionado | 0 |

Fuente: Digi® (2009).

Parámetro AS: Inspecciona un canal. Se envía un requerimiento a todas las redes en cada canal para solicitar información. *AS* determina el tiempo durante el cual se escuchará la respuesta al requerimiento. El mensaje recibido en respuesta al requerimiento contiene información como la dirección del coordinador, el identificador de *PAN* del coordinador, el tipo de dirección que usa el

coordinador (16 o 64 bits), el canal en el cual opera, entre otros.

Parámetro ED: Comprueba el nivel de energía máximo que se detectó en cada canal.

Parámetro PL: Define el nivel de potencia con el cual el módulo de RF transmitirá. A continuación, en la tabla 12 se indica las opciones disponibles y el valor seleccionado.

Tabla 12. Parámetro PL

| Valor | Nivel de potencia |
|--------------------|-------------------|
| 0 | -10dBm |
| 1 | -6dBm |
| 2 | -4dBm |
| 3 | -2dBm |
| 4 | 0dBm |
| Valor seleccionado | 4 |

Fuente: Digi® (2009).

Parámetro BD: En la tabla 13 se indican los posibles valores que pueden ser seleccionados y el parámetro correspondiente, además de la velocidad seleccionada.

Tabla 13. Parámetro BD

| Valor | Configuración (bps) |
|--------------------|---------------------|
| 0 | 1200 |
| 1 | 2400 |
| 2 | 4800 |
| 3 | 9600 |
| 4 | 19200 |
| 5 | 38400 |
| 6 | 57600 |
| 7 | 115200 |
| Valor seleccionado | 3 |

Fuente: Digi® (2009).

Parámetro AP: Establece el modo de operación del módulo. AP=0 operación transparente y AP=1 modo de operación API (Application Programming Interface). El modo de operación empleado es API. El valor seleccionado es AP=2, se ha seleccionado este valor ya que con las pruebas realizadas en la comunicación con el Arduino no fue posible establecerse en modo API = 1, una comunicación con los diferentes módulos XBee-Pro® S2B (tabla 14).

Tabla 14. Parámetro AP

| Valor | Modo de operación |
|--------------------|--|
| 0 | Modo Transparente |
| 1 | Modo API habilitado |
| 2 | Modo API habilitado (con escape de caracteres) |
| Valor seleccionado | 2 |

Fuente: Digi® (2009).

Parámetro CA: Establece el umbral que permite decidir al módulo si existen las condiciones para transmitir o no un paquete (tabla 15).

Tabla 15. Parámetro CA

| Rango | 0x050(-dBm) |
|--------------------|--------------|
| Valor seleccionado | 0x2C(-44dBm) |

Fuente: elaboración propia.

Parámetro SM: Permite seleccionar el modo dormido, que es utilizado para reducir el consumo de potencia del módulo. El valor cero deshabilita el modo dormido, el módulo siempre está activo. El modo seleccionado es el 1, el cual permite entrar o salir del modo dormido mediante el cambio de nivel en el pin 9, llamado Sleep_RQ. La tabla 16 describe cada uno de los modos que pueden ser seleccionados y la tabla 17 muestra la elección de SM.

Tabla 16. Modos de configuración SM

| Valor | Configuración |
|--------------------|---------------|
| 0 | Deshabilitado |
| 1 | Hibernación |
| 2 | Pin doce |
| 3 | Reservado |
| 4 | Ciclo dormido |
| 5 | Ciclo dormido |
| Valor seleccionado | COOR 0 |

Fuente: elaboración propia.

La tabla 18 documenta la configuración de los dispositivos XBee-Pro® S2B ZB la red.

Formato de trama para trabajar en modo de operación API del XBee-Pro® S2B. El modo de operación API1 especifica cómo comandos, respuestas a comandos y mensajes del estado del módulo son enviados o recibidos a través del puerto serial del módulo. En el modo de operación API1, los datos son estructurados en tramas mediante un orden definido. La estructura general que requiere este modo de operación se indica en la figura 2 (Digi®, 2009).

A continuación se detalla la función de los campos que son comunes en todos los tipos de mensajes. *Delimitador de Inicio*, está formado por una secuencia de 8 bits que indica el inicio de la trama, la secuencia es 0x7E. Cualquier dato recibido antes del delimitador de inicio es descartado. *Longitud*, indica el número de bytes contenidos dentro del campo de datos de la trama. Este campo está conformado por un primer byte, el más significativo, y el segundo, el menos significativo.

Tabla 17. Elección del parámetro SM

| Configuración Modo Dormido | Transición al Modo Dormido | Transición sale del Modo Dormido | Características | Consumo de potencia |
|----------------------------------|-----------------------------------|---|--|---------------------|
| Hibernación SM=1 | Sleep_RQ (pin 9) en nivel alto | Sleep_RQ (pin 9) en nivel bajo | Un dispositivo controla el nivel del pin Sleep_RQ. Despierta en 13,2 ms | <10uA a 3,0Vcc |
| Pin Doce SM=2 | Sleep_RQ (pin 9) en nivel alto | Sleep_RQ en nivel bajo | Un dispositivo controla el nivel del pin Sleep_RQ. Despierta en 2 ms | <50uA |
| Periodo de tiempo Dormido SM=4-5 | Automáticamente entra a este modo | Despierta cuando termina el periodo de tiempo que debe dormir | El módulo despierta cada cierto intervalo de tiempo para detectar, si alguien quiere comunicarse con él. | <50uA |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 18. Resumen de la configuración de los parámetros seleccionados en los módulos XBee-PRO® S2B

| Descripción | Parámetro | Módulo 0 | Módulo 1 | Módulo 2 | Módulo 3 | Módulo 4 |
|---|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Canal | CH | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| Identificador PAN | ID | 1234 | 1234 | 1234 | 1234 | 1234 |
| Dirección de Destino | DH | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Dirección de Destino | DL | 1 ó 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Dirección de Origen (16 bits) | MY | 0 | 1 | 2 | 3 | 3 |
| Tiempo antes de transmitir | RN | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Función (Coordinador/Dispositivo Final) | CE | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Lista de canales para examinar | SC | 0x1FFE | 0x1FFE | 0x1FFE | 0x1FFE | 0x1FFE |
| Tiempo para examinar el canal | SD | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Asociación Dispositivo Final | A1 | - | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Asociación Coordinador | A2 | 0 | - | - | - | - |
| Nivel de Potencia | PL | 4(0dBm) | 4(0dBm) | 4(0dBm) | 4(0dBm) | 4(0dBm) |
| Umbral de decisión para transmitir | CA | 0X2C (-44dBm) | 0X2C (-44dBm) | 0X2C (-44dBm) | 0X2C (-44dBm) | 0X2C (-44dBm) |
| Velocidad de Transmisión | BD | 3(9600bps) | 3(9600bps) | 3(9600bps) | 3(9600bps) | 3(9600bps) |
| Modo de operación | AP | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Modo de sueño | SM | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Fuente: elaboración propia.

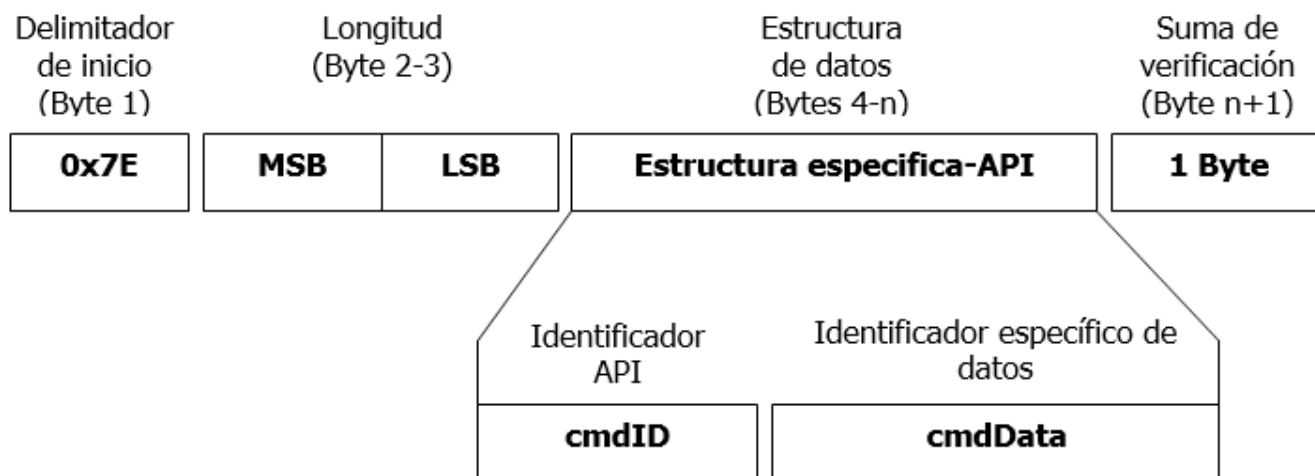


Figura 2. Estructura general de una trama en el modo de operación API.

Fuente: Digi® (2009).

Suma de Verificación (Check Sum), este campo está formado por un byte y permite verificar la integridad de los datos a la unidad receptora. Para calcular el valor que debe ser asignado a este campo, se debe sumar todos los bytes correspondientes al campo de datos de la trama (no se incluyen el delimitador de inicio ni la longitud). Si el resultado de la suma es superior a 0xFF, solamente se deben tomar los 8 bits menos significativos y al resultado obtenido restar de 0xFF; el resultado de esta operación es el valor que debe ir en el campo de suma de verificación. Para comprobar si el valor del campo de suma de verificación es correcto, se suman todos los bytes de la trama menos el delimitador de inicio y la longitud; si el resultado de esta suma es 0xFF, el valor es correcto; en caso contrario no lo es. *En el campo de datos de la trama*, guarda un determinado tipo de mensaje especificado por el identificador API. En la tabla 19 se indica el valor del identificador (hexadecimal) y el tipo de mensaje que corresponde.

Tabla 19. Identificador API y su tipo de mensaje

| Identificador API | Tipo de mensaje |
|-------------------|--|
| 0x8A | Estado del módulo |
| 0x08 | Comando |
| 0x09 | Aplicar un comando |
| 0x88 | Respuesta a un comando |
| 0x00 | Requerimiento de transmisión (dirección 64-bits) |
| 0x01 | Requerimiento de transmisión (dirección 16-bits) |
| 0x89 | Estado de la transmisión |
| 0x80 | Paquete recibido (dirección 64-bits) |
| 0x81 | Paquete recibido (dirección 16-bits) |

Fuente: Digi® (2009).

El enlace inalámbrico requiere el uso de tres tipos de mensajes en particular: i) un mensaje para solicitar la transmisión de datos usando una dirección de destino de 16-bits, ii) un mensaje que indica la recepción de un paquete (usando direcciones de 16-bits) y, iii) un mensaje que indica el estado de un paquete transmitido.

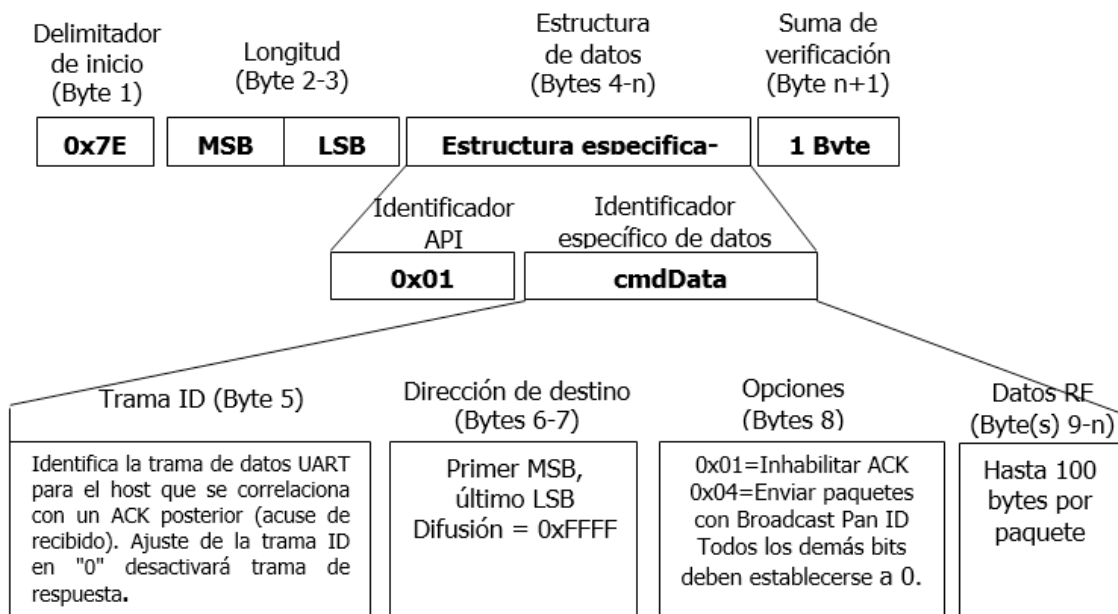


Figura 3. Estructura de una trama para transmitir datos

Fuente: Digi® (2009).

Los identificadores para estos mensajes son: 0x01, 0x81 y 0x89, respectivamente (Digi®, 2009). A continuación se explica más detalladamente la estructura de estos tipos de mensajes.

Estructura de una trama para transmitir datos: como se puede apreciar en la figura 3, la trama está conformada por varios campos. El campo de datos de la trama, a su vez, tiene varios campos, entre ellos se tiene que: el identificador API1 (tipo de mensaje), el identificador de trama, opciones y el campo de datos.

A continuación se describe la función que desempeña cada campo:

Identificador API: este campo está conformado por un byte, el cual indica el tipo de mensaje. El identificador para una trama de solicitud de transmisión usando direcciones cortas de 16-bits correspondiente es el 0x01.

Identificador de Trama: como su nombre lo indica, este campo permite reconocer a la trama, además permite relacionarla con su correspondiente acuse de recibo. Si el valor de este campo

es 0, se deshabilita la trama que indica el estado de la trama enviada.

Dirección de destino: este campo está formado por dos bytes, los cuales indican a quién está dirigida la trama. Primero se debe colocar el byte más significativo de la dirección y a continuación el menos significativo. Para enviar la trama a todas las unidades se debe utilizar la dirección 0xFFFF.

Opciones: este campo está formado por un byte, y permite deshabilitar el acuse de recibo o enviar la trama a todas las PAN.

Datos: este campo contiene la información que se desea enviar, puede tener hasta 100 bytes.

Estructura de la trama de recepción de un paquete: cuando un paquete es recibido por un módulo, este lo envía a través de su puerto serial mediante la estructura indicada en la figura 4 (Digi®, 2009).

Para este tipo de mensaje, el identificador API correspondiente es el 0x81 (recepción de un paquete usando dirección de 16-bits).

Dirección de origen: este campo permite indicar a la unidad receptora quién le envió el paquete. Este campo está formado por dos bytes, el primero representa el byte más significativo de la dirección de 16-bits y el segundo el menos significativo.

El campo RSSI (Received Signal Strength Indicator): este campo indica el nivel de potencia con que se recibieron los datos. Por ejemplo, si el valor de este campo es 0x25 (37 decimal), quiere decir que la potencia de la señal recibida es igual a -37dBm.

Opciones: este campo le permite saber a la unidad receptora cómo fue direccionada la trama. Este campo está formado por un byte: el bit 1 indica si la trama fue enviada con una dirección de difusión (DH=0xFFFF) y el bit 2 indica si la trama fue enviada a todas las PAN1 (ID PAN=0xFFFF).

Datos: este campo puede contener hasta 100 bytes, corresponde a los datos recibidos.

Estructura de una trama de estado de paquete: este mensaje se genera en respuesta a una solicitud de transmisión. En la figura 5 (Digi®, 2009)

se muestra esta clase de mensaje, que indica si el paquete enviado fue transmitido exitosamente o si la transmisión falló. El identificador API de trama proporcionado a este tipo de mensaje es 0x89.

Identificador de trama: este campo está formado por un byte y permite indicar la trama que está siendo reportada. Si el campo de identificador de trama del paquete enviado es 0x00, no se genera este mensaje.

Estado: este campo está formado por un byte e indica el estado de la trama enviada. Si el valor de este campo es 0x00, quiere decir que la transmisión se realizó exitosamente; un valor igual a 0x01 indica que el tiempo de espera para recibir el acuse de recibo expiró (no se recibió el ACK); un valor igual a 0x02 indica que el paquete no se envió porque no se dieron las condiciones adecuadas (el parámetro CA establece que la energía detectada en el canal debe ser superior a -44dBm para enviar un paquete), y por último, si el valor es igual a 0x03 quiere decir que el tiempo de espera para recibir una transmisión indirecta expiró.

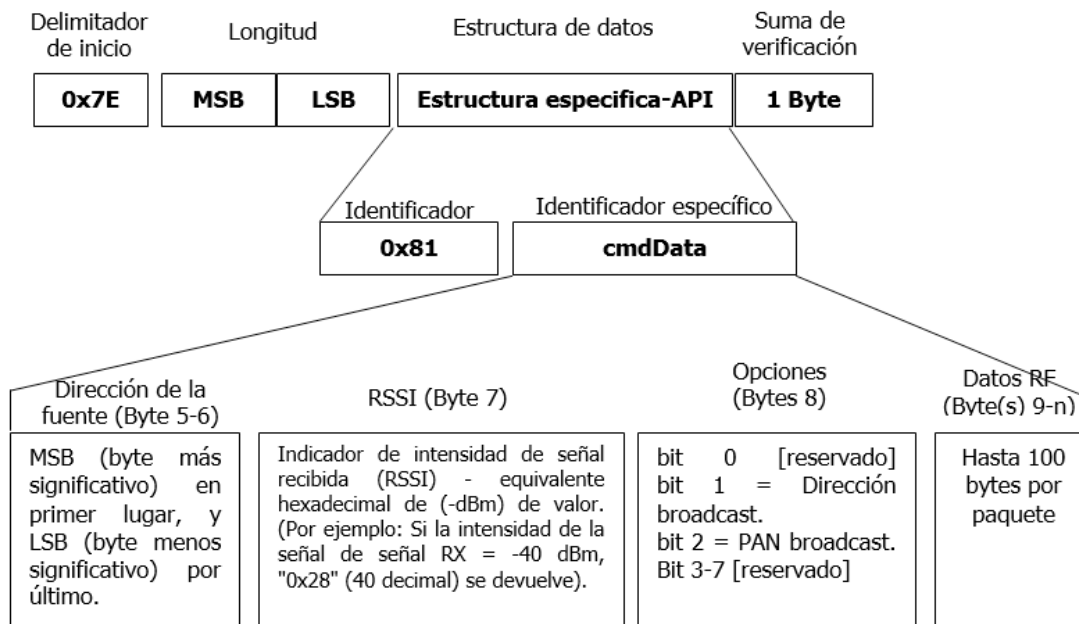


Figura 4. Estructura de una trama de recepción de un paquete.

Fuente: Digi® (2009).

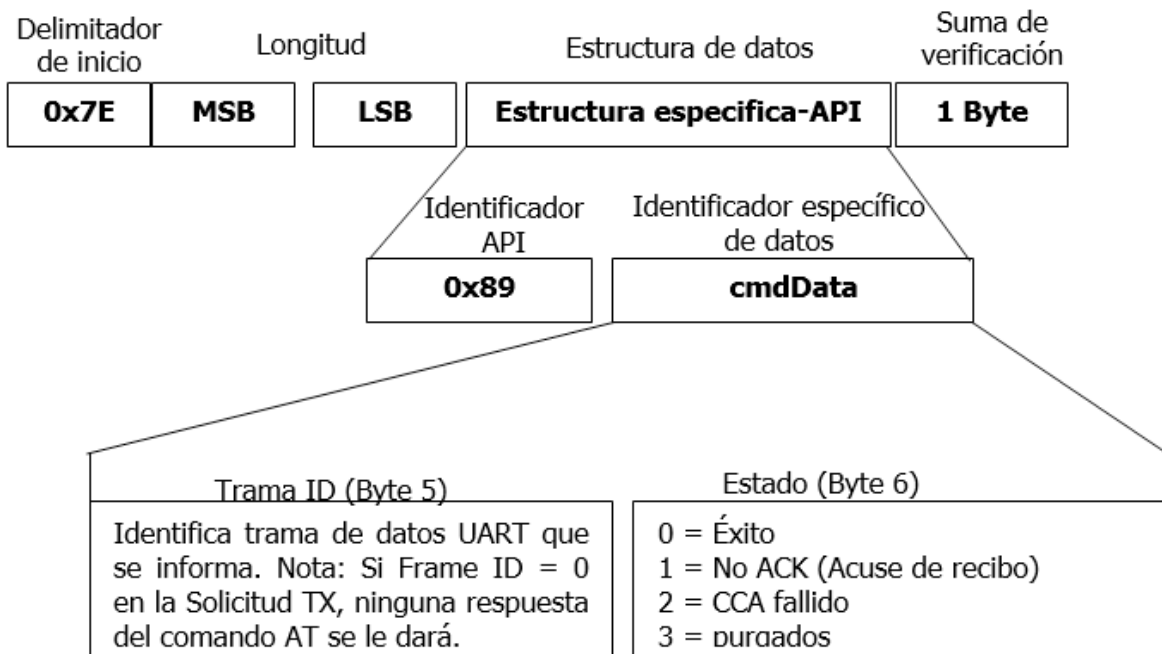


Figura 5. Estructura de una trama que indica el estado del paquete enviado.

Fuente: Digi® (2009).

RESULTADOS

X-CTU es un software de distribución libre suministrado por Digi International para interactuar fácilmente con productos de RF de Digi, el cual cuenta con cuatro pestañas principales, que son PC Settings tab, Range Test, Terminal y Modem Configuration. El software tiene una función con la que se puede acceder al firmware del módulo para estar en comando AT o API, así como ajustar el modo de comando deseado y secuencia. La pestaña de la prueba de rango se utilizó para comprobar el RSSI (Recibido Indicador de Cobertura) de cada XBee-Pro® S2B ZB en la red. La lengüeta del terminal es donde se puede enviar y recibir datos en formato hexadecimal o ASCII, y la pestaña de configuración del módem se usa para la lectura y escritura de firmware del módem de la radio del microcontrolador de acuerdo con los ajustes necesarios (Mansor, Adom, & Rahim, 2011). En la figura 6, se muestra

un pantallazo del programa X-CTU, en donde se configuraron los parámetros de los módulos XBee-Pro® S2B ZB, ya sea el del coordinador o el de cada módulo Router XBee-Pro® S2B.

Se utilizó el software X-CTU para configurar los módulos XBee-Pro® S2B ZBS2 Pro, haciendo uso del explorer USB (Universal Serial Bus), XBee-Pro® S2B ZB explorer USB, el cual permitió conectar y utilizar el módulo XBee-Pro® S2B ZB directamente mediante un puerto USB. La conexión se realizó con el acceso a los pines TX/RX del XBee-Pro® S2B. Además se empleó como una base inalámbrica desde el computador y así se pudo conectar sin el uso de cables a la placa utilizando el módulo XBee-Pro® S2B, como se muestra en la imagen de la figura 7.

Al instalar XBee-Pro® S2B ZB Explorer USB, se configuró y operó el módulo XBee-Pro® S2B ZB desde el computador, para lo cual se colocó dicho módulo en el XBee-Pro® S2B ZB Explorer USB y se conectó mediante el puerto USB al computador.

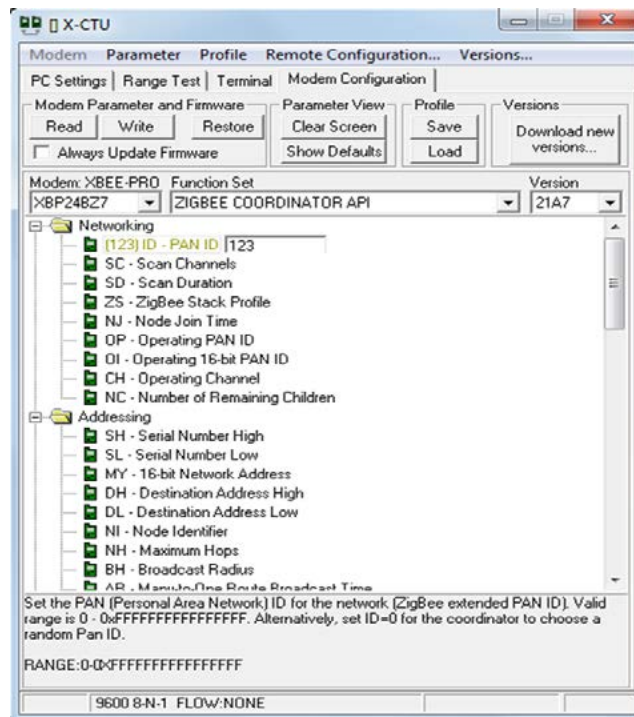


Figura 6. Entorno del programa X-CTU.

Fuente: elaboración propia.



Figura 7. Configuración del XBee-PRO® S2B ZB como router con el programa X-CTU.

Fuente: elaboración propia.

Sin embargo es importante señalar que para algunas versiones de Windows los *drivers* son instalados de manera automática, mientras que para otros se debe realizar el proceso de instalación de forma manual desde el administrador de dispositivos.

Iniciando el software X-CTU, en la figura 8 se observa que cuenta con cuatro pestañas principales, las cuales proporcionan soporte y control sobre los módulos de comunicación. La pestaña “PC Setting” permitió cambiar las características del puerto del computador con el que se va a configurar el XBee-Pro® S2B, modificar características como: velocidad de transmisión, control de flujo, bits de información, entre otras opciones. En la subpestaña “User Com Port” se pueden añadir los puertos del computador; después de seleccionado el puerto y conectado el XBee Explorer con su respectivo módulo, se da clic sobre la opción “Test/Query”, la cual despliega una ventana como la que se muestra en la figura 9. Dicha ventana confirmó la existencia de una comunicación entre el módulo XBee-Pro® S2B ZB y el computador, indicando el tipo del módem y la versión de firmware que tiene instalado en ese momento (el firmware cambia al cambiar las características de los módulos).

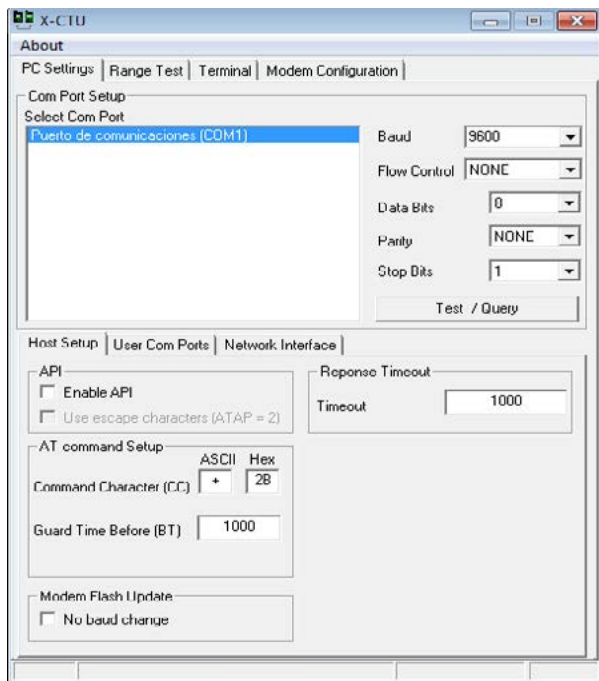


Figura 8. X-CTU Ventana principal.

Fuente: elaboración propia.

Las configuraciones de los parámetros en el programa X-CTU han sido las indicadas en la tabla 18. Sobre un estudio previo se realiza la caracterización y acople de los sensores de temperatura, humedad, precipitación y radiación solar, de manera que cada nodo queda como se indica en la figura 10.

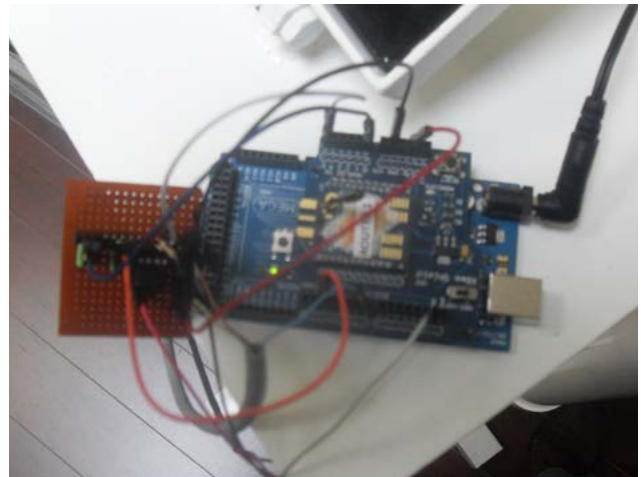


Figura 10. Montaje Router.

Fuente: elaboración propia.

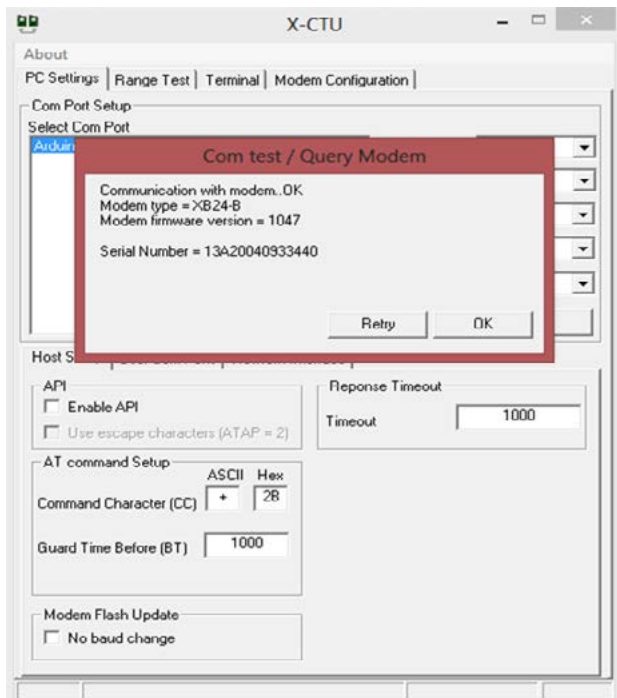


Figura 9. Test/Query.

Fuente: elaboración propia.

Cada estación está diseñada como se presenta en la figura 11. El nodo coordinador está conectado a la red local y muestra los datos en tiempo real de los datos adquiridos por los sensores. Realizando diversas pruebas, se calibran los sensores, y a través de una interfaz realizada por medio de Ethernet Arduino, se ingresa a un navegador desde la red local. Al digitar la dirección 192.168.36.78, correspondiente al proyecto SIGI-0044 Red inalámbrica de sensores basados en protocolo IEEE.802.15.4 para la medición de algunas variables ambientales, se pueden observar los dispositivos que se encuentran conectados en el momento de realizar esta prueba.

La figura 12 muestra la interfaz creada para la visualización de los datos obtenidos en tiempo real, imagen tomada en el momento de realizar pruebas de funcionamiento de la red.

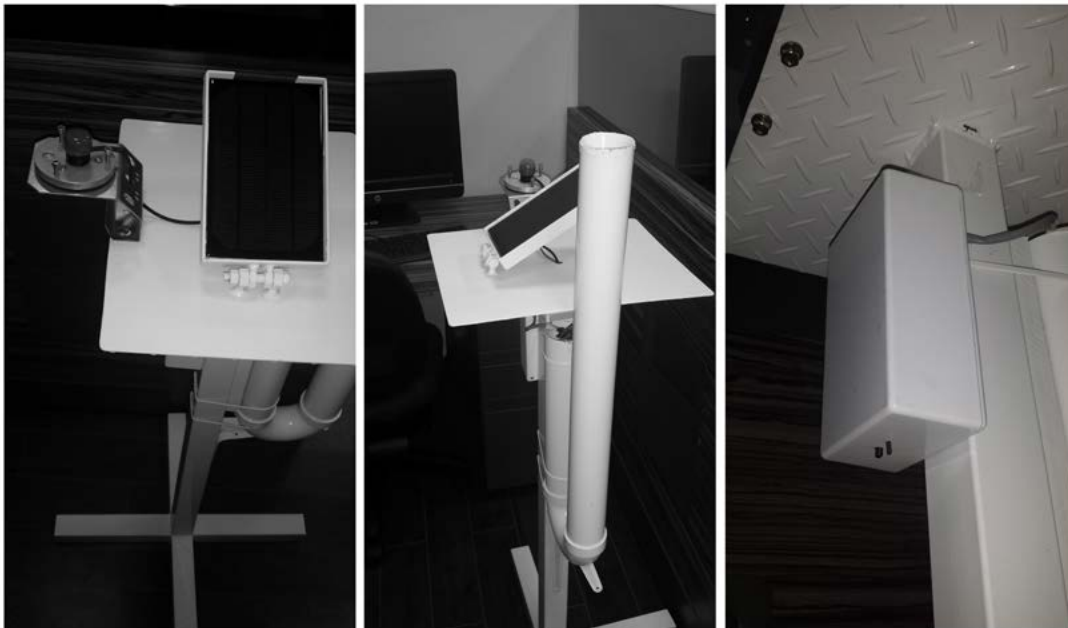


Figura 11. Estación diseñada correspondiente al Nodo N.º 1.

Fuente: elaboración propia.

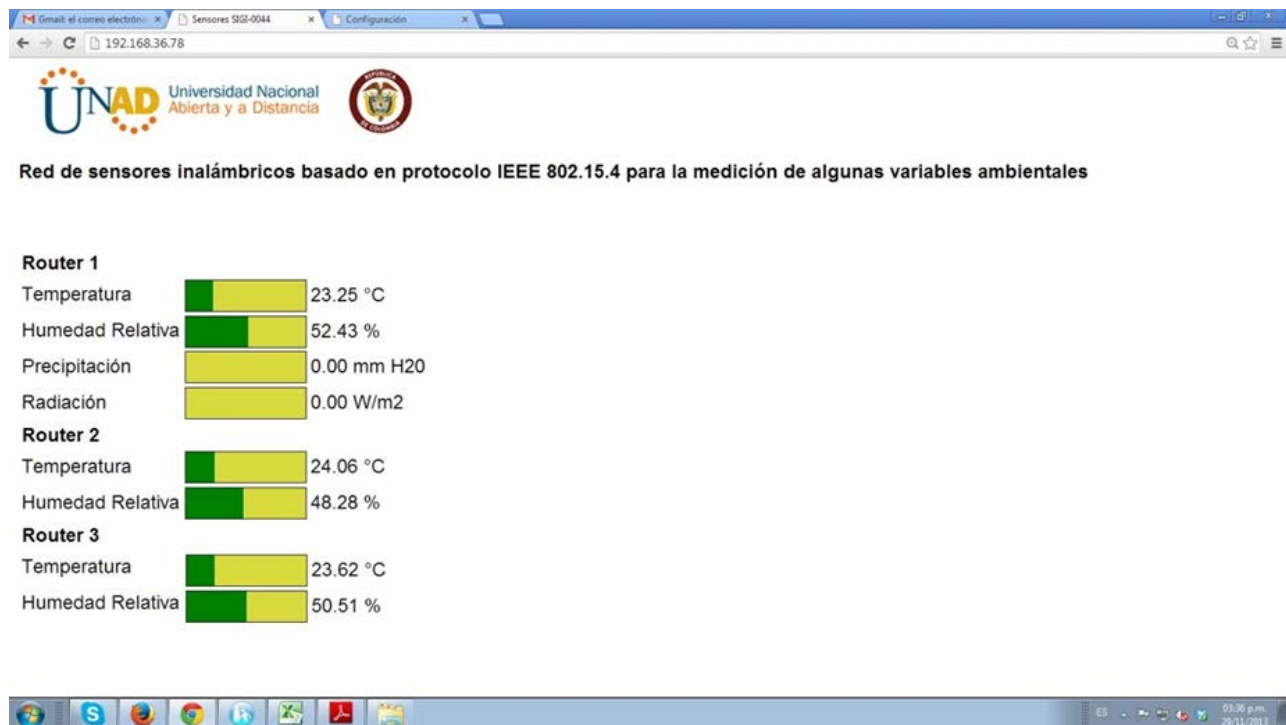


Figura 12. Acceso remoto a los datos de los nodos a través del coordinador del Router.

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

Con la estandarización de productos, la alianza ZigBee® ha permitido hacer más simple, seguro, confiable y flexible el uso de redes de sensores en diversas aplicaciones.

La alianza ZigBee® se ha valido de otros estándares, como el IEEE802.15.4, para sus capas inferiores y algoritmos clásicos para ruteo y seguridad. La aplicación de la tecnología ZigBee® mediante el desarrollo del módulo XBee-Pro® S2B ZB es fácil de configurar una vez se han comprendido los parámetros que conlleva el protocolo. Es así que en este documento se ha resaltado la configuración de los parámetros y los modos de empleo de las estructuras de trama que indica el estado de transmisión, recepción y envío de paquetes a 16 bits.

El prototipo de estación remota y de red desarrollado posee características específicas para la aplicación seleccionada. Esto implicó un proceso de conocimiento de manejo de los módulos y ajuste de las diferentes señales provenientes de los distintos sensores, para lo cual se realizó previamente su correspondiente caracterización. Se caracterizaron y configuraron los módulos de radiofrecuencia XBee-Pro® S2B ZB, mostrando la fase de diseño del enlace inalámbrico utilizando la topología estrella. Que sirvió para la comunicación de diversos sensores utilizando el *XBee shield* para la placa del microcontrolador *Arduino Mega 2560* formando cuatro nodos, permitiendo medir temperatura, humedad relativa, precipitación y radiación solar global en cada uno de los nodos, a su vez el coordinador y una tarjeta *Arduino Ethernet* permitió visualizar los datos en tiempo real mediante un aplicativo en la red de área local.

FINANCIAMIENTO

La investigación para realizar el presente proyecto ha sido financiada por el Sistema de Gestión de la Investigación (SIGI) de la Universidad

Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), Colombia, mediante convocatoria interna N.º 002 con el código SIGI-0044 al Grupo de Investigación para el Desarrollo Económico, Tecnológico y Social GRINDES-COL0045135.

REFERENCIAS

- Digi®. (2009). *XBee®/XBee-PRO® RF Modules datasheet*. Recuperado de <https://www.sparkfun.com/datasheets/Wireless/Zigbee/XBee-Datasheet.pdf>.
- Faludi, R. (2010). *Building wireless sensor networks: with ZigBee, XBee, arduino, and processing*. Published O'Reilly Media, Inc., 1005 Gravenstein Highway North, Sebastopol, CA 95472
- Hill, J., Szewczyk, R., Woo, A., Hollar, S., Culler, D., & Pister, K. (2000). System Architecture Direction for Networked Sensors. *SIGOPS Operating Systems Review*, 34, 93-104.
- Howitt, I., & Gutierrez, J. (2006). IEEE 802.15.4 Low Rate-Wireless Personal Area Network Coexistence Issues. *Wireless Communications and Networking*, 3, 1481-1486.
- Jiménez, A., Ravelo, D., & Gómez, J. (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*, 14(27), 41-51.
- Kinney, P. (2003). ZigBee technology: Wireless control that simply works. *Communications design conference*, 2, 1-7.
- Koubâa, A., Alves, M., & Tovar, E. (2006). IEEE 802.15.4: a wireless communication technology for large-scale ubiquitous computing applications. *In Proc. of Conference on Mobile and Ubiquitous Systems*, 99-108. July 17-21, 2006-San José, California.
- Koubâa, A., Alves, M., & Tovar, E. (2007). Time Sensitive IEEE 802.15.4 Protocol. *In Sensor Networks and Configuration*, (19-49). Sensor Networks and Configuration. Fundamentals, Standards, Platforms, and Applications. Editors: Nitaigour P. Mahalik

ISBN: 978-3-540-37364-3 Springer Berlin Heidelberg 2007.

Lewis, F. (2004). Wireless sensor networks. *Smart environments: technologies, protocols, and applications*, 11-46.

Mansor, H., Adom, A., & Rahim, N. (2012). Wireless Communication for Mobile Robots Using Commercial System . *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 2(1), 53-55. Vol. 2 (2012) No. 1 ISSN: 2088-5334

Stankovic, J. (2008). Wireless Sensor Networks. *IEEE Computer*, 41(10), 92-95.

Yawit, C. &. (2011). A wireless sensor network for weather and disaster alarm systems. *In Proc. International Conference on Information and Electronics Engineering*, 6. 28th to 29th May 2011 Bangkok, Thailand

Ye, W., Heidemann, J., & Estrin, D. (2002). An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks. (IEEE, Ed.) *Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, 3, 1567-1576.





Gestión del espectro radioeléctrico en Colombia

Radio spectrum management in Colombia

Ernesto Cadena Muñoz*, Hermes Javier Eslava Blanco**, José Alejandro Franco Calderón***

Fecha de recepción: 29 de noviembre de 2013

Fecha de aceptación: 5 de diciembre de 2014

Como citar: Cadena Muñoz, E., Eslava Blanco, H. J., & Franco Calderón, J. A. (2015). Gestión del espectro radioeléctrico en Colombia. *Revista Tecnura*, 19(45), 159-173. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.3.a12

RESUMEN

Este artículo presenta una revisión del estado del arte de la gestión del espectro radioeléctrico. Se definen conceptos básicos que permiten reconocer su alcance e importancia para el sector y se hace un análisis de los diferentes modelos de gestión del espectro, destacando las características, fortalezas y debilidades de cada uno para su aplicación. Se analiza el contexto del país, en el cual se observa que el modelo de gestión tradicional utilizado no es eficiente y genera pérdidas económicas para el país en uno de los recursos más importantes en materia de Telecomunicaciones, lo que nos lleva a replantear el modelo actual de gestión del espectro radioeléctrico en Colombia.

Finalmente, se presentan las tendencias en la gestión del espectro y se resalta la necesidad de analizar el modelo basado en el mercado de servicios de telecomunicaciones y los requerimientos para su aplicación en el país, así como las dificultades que puede encontrar.

Palabras clave: comunicaciones inalámbricas, gestión del espectro radioeléctrico, radio cognitiva.

ABSTRACT

This paper shows a review of the state of art of radio spectrum management, some basic concepts are defined allowing to recognizing its scope and importance for the sector and an analysis of different spectrum management models is done highlighting features, strengths and weaknesses of each one for its application. It analyzes the context of the country, where it is observed that the traditional management model used is not efficient, generating economic losses for the country in one of the most important resources on Telecommunications, which leads us to reconsider the current model of radio spectrum management in Colombia. Finally, we present the trends in spectrum management and we highlight the need for analysis of the model based on the telecommunications market, the requirements for its implementation in the country and the difficulties that may arise.

Keywords: cognitive radio, radio spectrum management, wireless communications.

* Ingeniero en Telecomunicaciones, especialista en Gestión de Proyectos de Ingeniería, Candidato a magíster en Telecomunicaciones e instructor de Telecomunicaciones del SENA, Bogotá, Colombia. Contacto: ecadenam@misena.edu.co

** Licenciado en Electrónica, especialista en Telemática, especialista en Instrumentación Electrónica y magíster en Ingeniería de Telecomunicaciones. Candidato a doctor en Ingeniería de Sistemas y Computación. Docente Asociado de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Contacto: hjeslavab@udistrital.edu.co

*** Ingeniero Electrónico, especialista en Administración de Tecnologías de la Información para la Comunicación Virtual. Instructor de Telecomunicaciones del SENA, Bogotá, Colombia. Contacto: alejo.franco@misena.edu.co

INTRODUCCIÓN

Cuando utilizamos nuestro teléfono celular, cuando vemos televisión o escuchamos la radio, la información ha sido acondicionada y transmitida por un proveedor de servicios a través de un medio de transmisión específico utilizando un sistema de telecomunicaciones que puede ser radiocomunicaciones, comunicación satelital, celular, entre otros. Independientemente del sistema de transmisión empleado, se emite una señal electromagnética que es enviada a una frecuencia específica dependiendo del servicio requerido desde el emisor hasta el receptor, aprovechando el principio de propagación de las ondas.

El espectro radioeléctrico es una parte del espectro electromagnético que ocupa las bandas de frecuencia correspondientes a los servicios de telecomunicaciones, que según la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) van desde una frecuencia de 3 KHz hasta 3.000 GHz, divididas en nueve bandas de frecuencia, de acuerdo con el tipo de servicio (Mansilla, 1996). El espectro es un recurso escaso, puesto que debe dividirse entre los operadores y brindar acceso no solo a servicios tradicionales como televisión, radio, celular e internet, sino también a servicios como la seguridad y defensa para el país, lo cual muestra la importancia de su asignación y uso.

Para comprender la necesidad de la gestión eficiente del espectro radioeléctrico, tomemos como ejemplo lo que sucedería con un servicio como la radio. En nuestro aparato receptor lo que hacemos es ajustar a una frecuencia específica, por ejemplo 90.4 MHz, si no hay control de la frecuencia de transmisión de cada emisora, al intentar sintonizarla, podríamos tener varias fuentes de señal, lo cual originaría pérdida de la información e interferencia en la señal, de manera que sería sumamente complicado recuperar el mensaje original; peor sería el caso si lo llevamos a la comunicación celular, internet o cualquier otro servicio.

El espectro radioeléctrico es considerado un bien de dominio público (Feijoo Gonzalez, Gómez

Barroso, & Mochón, 2011), razón por la cual cada país debe velar por su uso eficiente y revisar la legislación constantemente, ya que las telecomunicaciones han presentado un avance tecnológico significativo durante los últimos años, lo cual conlleva cambios económicos (De León O. , 2009), políticos y sociales que deben ser evaluados (Wellenius & Neto, 2005).

El desarrollo del sector (De León & González Soto, 2008) y la importancia de las radiocomunicaciones hacen que encontremos hoy en día un entorno competitivo, que elimina monopolios que existían anteriormente y que ofrece mayor flexibilidad en la prestación de los servicios de telecomunicaciones, de forma que hay una gran variedad de servicios con diferente calidad (Olafsson, Glover, & Nekovee, 2007). La gestión tradicional del espectro radioeléctrico es poco flexible, porque en general asigna bandas de frecuencia para servicios a cada operador, lo que en ocasiones se traduce en un uso ineficiente, es decir, en una subutilización del recurso (Hang, Randall, Honig, & Vohra, 2009). Y el escenario se complica si pensamos en redes de nueva generación (NGN), donde se busca la convergencia de redes y servicios, para lo cual debe ser más eficiente y flexible la asignación del recurso (Aldana J & Vallejo, 2010).

Una alternativa tecnológica aparece con la radio cognitiva (Gajewski & Marek, 2009), que permite una mejor utilización del espectro, usa los espacios subempleados de determinadas frecuencias y va intercambiando la frecuencia utilizada de acuerdo con la disponibilidad de la red a la que se encuentra conectado (Ahmed, Mubashir Hassan, Sohaib, Hussain, & Qasim Khan, 2011), con lo cual permite técnicas como el acceso dinámico al espectro radioeléctrico (DSA) y la gestión dinámica del espectro (DSM). Estas alternativas están actualmente en estudio, pues implican no solo cambios tecnológicos, sino regulatorios.

La segunda sección del artículo presenta el concepto de gestión del espectro radioeléctrico, sus objetivos y su clasificación de acuerdo con un punto de vista regulatorio. Además, se observa la

clasificación de los modelos de gestión actuales, que nos permite evaluar los diferentes modelos, sus ventajas, desventajas y posible aplicación. La tercera sección muestra las tendencias de la gestión del espectro a nivel internacional, y la cuarta presenta la gestión en el contexto colombiano. Finalmente, se realizan algunas conclusiones con base en el análisis de las secciones previas.

GESTIÓN DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO

La gestión del espectro radioeléctrico se define como la combinación de elementos técnicos, científicos y administrativos para planificar y ejecutar la asignación, control y seguimiento del uso del espectro radioeléctrico para los diversos servicios de telecomunicaciones que se ofrecen en el mercado, buscando evitar interferencias (UIT-R Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2010).

Este concepto plantea de entrada dos desafíos si lo traemos al contexto actual: el recurso del espectro es escaso y existe dificultad en el despliegue debido a las demoras en los procesos de asignación para los servicios inalámbricos que están en aumento (Doshi, Duong, Bagrodia, & Thai, 2006).

En el sector se ha reconocido la importancia que tiene el espectro radioeléctrico para un país, de ahí surge la necesidad de que el Gobierno reglamente y haga una intervención para garantizar eficiencia y transparencia en su asignación y administración (Ministerio de Comunicaciones, 2008) (Quintuña Rodríguez, 2010), lo que en definitiva se traduce en leyes y políticas para lograr estos fines.

Diferentes naciones (Ministerio de Comunicaciones, 2008) conscientes de este hecho han trabajado desde el año 1906 en conjunto para generar diversas maneras de administrar el espectro radioeléctrico, y en 1932 con la creación de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) se logró un gran avance en la búsqueda de unificación de conceptos y normalización internacional en el área (Ministerio de Comunicaciones, 2008). A nivel internacional podemos encontrar varios grupos

de estudio en las telecomunicaciones, cuyos integrantes se muestran en la figura 1 (Cave, Doyle, & Webb, 2007). El trabajo de estos grupos de estudio es realizar investigación y normalización en temas regulatorios y técnicos; el grupo de la UIT se encarga de la gestión del espectro radioeléctrico y en Europa está el grupo de gestión de frecuencia, ingeniería del espectro y regulación de radio.

Además de estos organismos de normalización, debemos tener en cuenta que nuestra economía está regida por los lineamientos de la Organización Mundial del Comercio, la cual hace una diferencia entre lo que son servicios de telecomunicaciones, tecnologías de la información y las comunicaciones (Cave, Doyle, & Webb, 2007). Dentro de este contexto se busca un mercado con las menores restricciones posibles, que se establezca de manera objetiva, transparente y sin discriminación (Valenzuela, 2010). La inclusión de criterios de mercado en la asignación del espectro genera flexibilidad y aumenta la eficiencia de su utilización, lo cual se refleja en mayor capacidad de innovación, producción y competitividad en la economía.

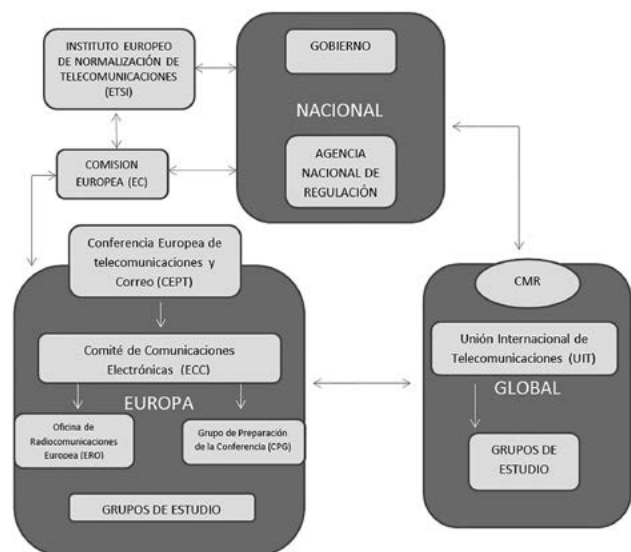


Figura 1. Instituciones encargadas de la normalización internacional en Telecomunicaciones.

Fuente: Cave, Doyle y Webb (2007).

Analizando las últimas dos décadas se encuentra que el desarrollo electrónico ha impulsado el sector de las telecomunicaciones y ha permitido servicios con más calidad y mayor ancho de banda que los ofrecidos anteriormente (Calvet Madrigal & Parra Valbuena, 2009). Esto, sumado al incremento de la demanda de internet y al uso de tecnologías móviles, conlleva una necesidad de revisar el esquema actual de gestión del espectro (Wellenius, Neto, & Bank, 2008).

Objetivos de la gestión del espectro

En esta sección se presentan los objetivos generales de la gestión del espectro radioeléctrico según la UIT (Foster, Cave, & Jones, 2009), que son aplicables a nuestro país y están incluidos dentro de las políticas y planes de acción del Gobierno (ANE Agencia Nacional del Espectro, 2012). Estos objetivos son:

Eficiencia económica

El Estado debe garantizar el uso eficiente del espectro de radio asignado a fines públicos y privados, velando por el cumplimiento de las metas y objetivos del país, incluidos los que se refieren al crecimiento económico y bienestar social, buscando el equilibrio entre las exigencias de un mercado competitivo y la necesidad de una reglamentación rigurosa de un recurso público limitado.

Eficiencia técnica

Velar por la optimización del recurso evitando interferencias y separaciones (bandas de guarda) innecesarias. Asegurar que el espectro radioeléctrico se adapte a los servicios y tecnologías emergentes ofreciendo flexibilidad para atender las nuevas necesidades del mercado. Revisar constantemente los cuadros de atribución de frecuencias de acuerdo con la CONFERENCIA MUNDIAL DE RADIOCOMUNICACIONES y otros requerimientos que puedan surgir de esta.

Políticos

Cumplir con la normatividad nacional e internacional siguiendo las recomendaciones de la UIT

u otros organismos normalizadores y garantizar el cumplimiento de la política gubernamental de acceso a la competencia, la no discriminación, la equidad, la transparencia y justicia de la atribución y asignación entre los diversos interesados. Asegurar la disponibilidad del espectro de radio para beneficios sociales como la seguridad, la salud y los sistemas de emergencias.

Clasificación del espectro radioeléctrico

En esta sección se presenta la clasificación del espectro radioeléctrico desde dos perspectivas: desde el punto de vista regulatorio y desde la taxonomía de los modelos de gestión del espectro radioeléctrico, incluyendo los modelos tradicionales de gestión, los basados en el mercado y los que utilizan técnicas emergentes como la radio cognitiva, teniendo en cuenta además los beneficios y dificultades de su aplicación.

División regulatoria del espectro

Desde este punto de vista el espectro está dividido en dos clases de bandas, con licencia (servicios básicos de telecomunicaciones, servicios de valor agregado, radiodifusión, entre otros) o exentas de licencia (radios de corto alcance, control remoto, sistemas de seguridad, investigación, entre otros). En el primer caso se busca la eficiencia a través de técnicas de gestión del recurso de radio, limitado por las características regulatorias y tecnológicas disponibles. En el segundo, no se puede garantizar su eficiencia porque al no tener licencia ninguna entidad se responsabiliza por su uso; se controla que no exceda los límites permitidos y que no genere interferencias a otros sistemas (Attar & Aghvami, 2007).

En la figura 2 podemos observar esta división basada en definiciones regulatorias (Cave., 2008), que son descritas brevemente y serán definidas en la siguiente sección. Se identifica el modo de cesión de derechos de uso geográfico, en el cual el agente renuncia al derecho de uso del espectro en la asignación geográfica de la licencia (total) o se hace un acuerdo con el cesionario para compartir parcial o

totalmente las bandas de frecuencia establecidas en diferentes zonas geográficas (parcial) (Feijoo Gonzalez, Gómez Barroso, & Mochón, 2011). También se encuentra el modelo temporal, en el cual se cede completamente el derecho de forma ilimitada o también se puede realizar temporalmente según el acuerdo que se haya realizado. Estas formas de cesión forman parte del mercado secundario del espectro, del modelo de uso exclusivo de gestión del espectro, mientras que los modos común privado y común público son parte del modelo común.



Figura 2. División del espectro-perspectiva regulatoria.

Fuente: Cave (2008)

División de acuerdo con los modelos de gestión del espectro radioeléctrico

La forma tradicional de gestión del espectro es que la agencia encargada realiza una asignación de una banda de frecuencia fija a determinado operador para un servicio, pero el inconveniente de esta técnica es la subutilización del recurso (Olafsson, Glover, & Nekovee, 2007), porque si no hay nada para transmitir, ningún otro operador puede usar esa banda de frecuencia y por lo tanto se pierde ese espacio.

En la figura 3 se observa la taxonomía de los Modelos de Gestión del espectro radioeléctrico realizada a partir de (Buddhikot, 2007) y (Quintero, 2008), donde se resumen los modelos de gestión. Podemos observar que se divide en 4 grandes grupos principales que se agrupan de acuerdo a sus características comunes y a su flexibilidad, se incluyen los modelos tradicionales y los desarrollados actualmente.

- Instrucción y control

Este enfoque se basa en decisiones administrativas delimitadas por el ente regulador. Es el menos flexible de todos los métodos, su característica principal es la capacidad de evitar las interferencias asignando bandas de frecuencia a un determinado servicio de telecomunicaciones (García García, 2010). Este método delimita quién va a

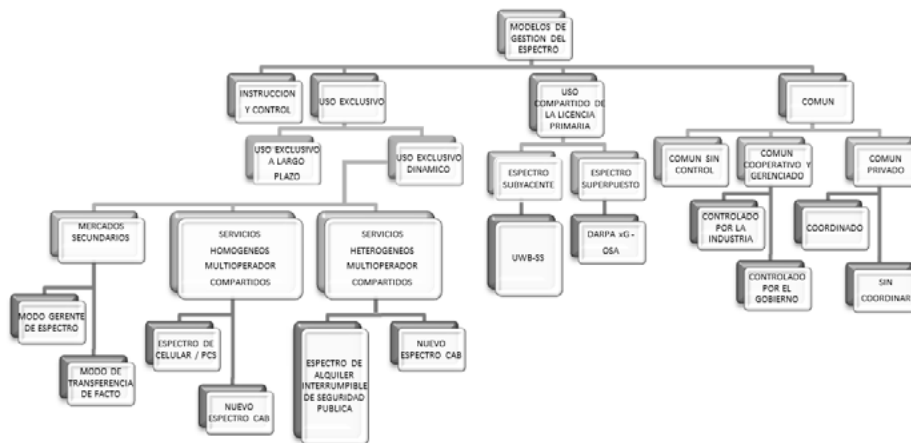


Figura 3. Taxonomía de los modelos de gestión del espectro radioeléctrico.

Fuente: Buddhikot (2007) y Quintero (2008).

utilizar el espectro, durante cuánto tiempo y en qué condiciones, y es el más conocido y utilizado aún en la actualidad por algunos países. Es importante resaltar que este modelo fue una forma efectiva de gestión hasta hace varios años, pero hoy en día no es viable porque es más difícil cada día asignar bandas específicas a la enorme demanda del mercado de radiocomunicaciones por espectro radioeléctrico, como por ejemplo en 4G-LTE (Mastorakis, Pallis, Zacharopoulos, & Bourdena, 2011). Este modelo no utiliza características del mercado (Buddhikot, 2007) y hoy en día se debe usar para seleccionar determinadas bandas para fines específicos, como el uso militar, radioastronomía, operaciones aeronáuticas, pero no para la gestión del espectro radioeléctrico en su totalidad.

- Uso exclusivo

Este modelo se basa en criterios de mercado: existe una licencia igual que en el de "Instrucción y control", pero no define el servicio por prestar ni la tecnología (García García, 2010), sino que se entrega al dueño de la licencia derechos exclusivos para su uso de acuerdo con ciertas reglas, que por lo general crean máscaras espectrales que limitan la potencia de transmisión para reducir interferencias (Buddhikot, 2007). Existen dos tipos: el primero es el uso exclusivo a largo plazo que utiliza la frecuencia, el espacio y el tipo de servicio para garantizar al dueño de la licencia esos factores durante periodos largos; el segundo se denomina de uso exclusivo dinámico, modelo que maneja escalas pequeñas de tiempo, espacio y frecuencia.

El modelo de uso exclusivo a largo plazo tiene dos clases, una fija donde el regulador establece los parámetros de servicio y tecnología que se van a utilizar durante el uso de la licencia y la otra es una forma flexible (Buddhikot, 2007), donde se puede cambiar la tecnología y el servicio por ofrecer a lo largo del uso de la licencia.

El modelo de uso exclusivo dinámico se basa en el principio de que en un momento dado de tiempo y espacio, un solo operador puede tener la licencia exclusiva, pero por un breve espacio

de tiempo, porque el operador y el tipo de servicio varían constantemente (Marcus, y otros, 2005). Este tipo generalmente es caracterizado por la aplicación de los mercados secundarios del espectro.

Dentro de estos mercados secundarios, la Federal Communications Commission (FCC) (Buddhikot, 2007) clasifica dos formas: el modo gerente de espectro, donde la licencia primaria asume el rol de gerente del espectro y el arrendatario con la transferencia de la licencia reporta al concesionario todo lo referente a la licencia. En este tipo la responsabilidad de cumplimiento la tiene el concesionario, que velará por los intereses del arrendador, pero garantizará el cumplimiento de los requerimientos y parámetros de la licencia primaria. El otro modo, conocido como transferencia de facto, consiste en que los derechos son transferidos totalmente al arrendatario, la responsabilidad sobre la licencia es totalmente del arrendatario. Se aclara que estos dos modos son conocidos también como arrendamiento del espectro.

En el modelo de servicios homogéneos multioperador compartidos (Buddhikot, 2007) cambia dinámicamente la asignación espacio-temporal junto con la cantidad de espectro entre múltiples operadores y pueden ser utilizadas diversas tecnologías. Este modelo permite el ordenamiento de la capacidad de acuerdo con la demanda solicitada en un momento específico que tiene en cuenta la fluctuación de tráfico y tiene un manejo más eficiente.

Cuando un operador está subutilizando su frecuencia, otro operador que ofrezca el mismo servicio puede utilizarla en ese intervalo. Servicios ofrecidos como los de comunicación personal (PCS) de celular son los candidatos para este tipo de modelo debido a su acceso dinámico, aunque tiene ciertas falencias porque aunque la coordinación entre los operadores es técnicamente viable, hay que analizar la cooperación del negocio. El otro problema es la calidad del servicio y la complejidad de la ingeniería detrás de estos servicios homogéneos para lograr el acceso dinámico.

En este esquema también se analiza la Banda de Acceso Coordinada, un espectro para el acceso

dinámico y compartido, donde el regulador asigna una nueva banda que tiene unas condiciones espacio-temporales relativamente pequeñas, pero tiene problemas tecnológicos porque es complejo localizar transmisores de diferentes proveedores y más si intentamos asociarle un precio a la actividad. Sin embargo, se rescata que este modelo puede ser utilizado con las tecnologías actuales reconfigurándolas y estableciendo los protocolos necesarios.

El modelo de servicios heterogéneos multioperador compartidos se basa en que el espectro es compartido entre operadores de diferentes servicios en diferentes escalas espacio-temporales; se asume que la infraestructura (Buddhikot, 2007) es desarrollada en cada asignación y banda de frecuencia, que es operada de manera independiente por cada operador. Cuando un operador está subutilizando su banda asignada de frecuencia, otro operador de un servicio diferente puede entrar y utilizarla mientras esté sin uso.

- Uso compartido de la licencia primaria

En este modelo un usuario primario poseedor de la licencia comparte el uso con un usuario secundario sin licencia (Buddhikot, 2007), y se espera que el empleo de la frecuencia por los usuarios del secundario no interfiera con los del primario. Este modelo es especialmente eficiente para tecnologías como la radio cognitiva y la gestión dinámica del espectro (Chapin & Lehr, 2007), incrementa el acceso al espectro y puede coexistir con los otros modelos presentes. Se puede clasificar en dos tipos: el primero, conocido como el espectro subyacente, impone restricciones sobre la potencia de transmisión de los usuarios secundarios, de tal forma que transmitan debajo del piso de ruido de los usuarios primarios, lo cual busca disminuir la interferencia. Técnicas como la banda ultra ancha (UWB) (Zhao & Sadler, 2007) permiten acercarse a este modelo porque se puede transmitir una mayor cantidad de información con una potencia muy baja, aunque depende también de la técnica de modulación utilizada para su transmisión (Buddhikot, 2007).

El segundo tipo es el espectro superpuesto, investigado por el grupo Darpa de Siguiente Generación (XG) bajo el término acceso oportunista al espectro (OSA) (Zhao & Sadler, 2007), que no establece imposiciones en términos de potencia de transmisión, define el momento y lugar donde puede transmitir, busca los espacios en blanco del usuario primario y allí realiza la transmisión del usuario secundario; en él aparecen la radio cognitiva y el acceso dinámico al espectro (Akyildiz, Lee, & Chowdhury, 2009).

- Común

Los usuarios acceden al espectro sin necesidad de una licencia o de una coordinación entre ellos (García García, 2010). Se debe limitar a servicios de corto alcance sin causar interferencias a los sistemas de mayor alcance, y pueden ser redes de área local, sistemas de localización por radiofrecuencia, dispositivos médicos, entre otros. La principal limitante es que no se puede dar servicios a sistemas con alta potencia, porque pueden provocar interferencia. Nadie puede reclamar el uso exclusivo de un recurso compartido (Buddhikot, 2007) porque es un bien público y debe ser igualmente accesible para todos. Este modelo permite un número ilimitado de usuarios que pueden acceder con derechos de uso, pero sin protección contra interferencias.

Se pueden encontrar tres divisiones principales: la primera, el modelo común sin control (Buddhikot, 2007), en el cual ninguna entidad tiene una licencia exclusiva sobre las bandas de frecuencia, es decir, cualquiera puede tener dispositivos operando en estas bandas, y solamente se establece un pico de potencia de transmisión. Este modelo no tiene ninguna protección contra interferencias (Hazlett & Bazelon, 2007), las cuales se deben a que no hay una cooperación adecuada y algún otro operador puede transmitir a la misma frecuencia; esto es muy usual en las redes inalámbricas.

El segundo modelo es el común cooperativo y gerenciado. El común es un recurso propiedad de un conjunto de personas o entidades en el cual no

hay licencia, hay libre uso del espectro y libertad en la tecnología de acceso, además el control del espectro es compartido por diversos dispositivos. Hay dos fundamentos sobre los cuales se basa este modelo (Buddhikot, 2007) y que se deben garantizar para su correcta aplicación: la existencia de un protocolo de gestión que integra las reglas tecnológicas del sistema y la adición de mecanismos escalables y confiables que cuantifiquen el cumplimiento de las reglas por las diferentes entidades, controlen su aplicación y apliquen restricciones en caso de violación. Esto se debe realizar cuidadosamente porque la interferencia depende del control que se haga compartido entre diversos actores, lo cual no siempre es fácil en la práctica.

Las características de este modelo de gestión, según Buddhikot (2007), deben ser: promover la innovación, reducir el costo de las transacciones de acceso al espectro, ser flexible frente a los posibles cambios y proveer igualdad al acceso sin discriminación, lo que responde a las políticas estatales y a las recomendaciones internacionales en esta materia.

El tercer modelo es el común privado (Buddhikot, 2007), que permite el uso de tecnologías avanzadas que permitan acceder a diferentes partes del espectro de forma gradual sobre bandas existentes con licencia. La responsabilidad en establecer las reglas es del dueño de la licencia. Se planea que el desarrollo adecuado del modelo común puede ser una alternativa viable del mercado (Mastorakis, Pallis, Zacharopoulos, & Bourdena, 2011).

TENDENCIAS EN LA GESTIÓN DEL ESPECTRO

Debido a implementaciones tecnológicas como la Televisión Digital Terrestre (TDT) se está optimizando el uso del espectro radioeléctrico liberando bandas de frecuencia (Mastorakis, Pallis, Zacharopoulos, & Bourdena, 2011) que pueden ser utilizadas para otros servicios. También se investiga el uso de técnicas como la radio cognitiva y sistemas de optimización del espectro

dinámicos (Zhao & Sadler, 2007), alternativas que buscan emplear los espacios subutilizados de los sistemas tradicionales (Union Internacional de Telecomunicaciones, 2005).

Se están desarrollando otras investigaciones en el modelo de gestión del espectro dinámico centradas en herramientas tecnológicas como las microrredes (Microgrids) (He & Martínez, 2009), basadas en sistemas que utilizan la infraestructura eléctrica existente para generar una infraestructura moderna con un ancho de banda alto que llega al orden de los GHz.

También se encuentran modelos que buscan incluir el mercado en la gestión del espectro radioeléctrico (Butcher, Mark, & Geoff, 2007), lo que está acorde con la realidad colombiana y las políticas de la ANE. En el enfoque de la UIT-D (2001) se detalla que las políticas basadas en las fuerzas del mercado aseguran que los beneficios de las tecnologías y los servicios de las telecomunicaciones estén disponibles para todo el mundo en iguales condiciones. La introducción de mecanismos de mercado debe ser consistente con los objetivos y políticas de la entidad a cargo de la gestión y puede variar entre maximizar el valor social derivado del uso más eficiente del recurso (Mesas de Trabajo MinTIC-CRC-ANE, 2011), hasta maximizar el valor privado (procesos de selección objetiva), pasando por una combinación de ambos. Actualmente, en el país se da bastante prioridad al tema del valor privado, pero se deben buscar mecanismos que aumenten el valor social, sin descuidar lo privado (Guerra de la Espriella & Oviedo Arango, 2011).

La FCC ha intentado establecer audiencias, sorteos y diversos modelos de gestión del espectro, pero últimamente se habla de la licitación competitiva o subasta, la cual está siendo analizada también por el Gobierno colombiano para Telecomunicaciones Móviles Internacionales (IMT) (Chamorro & Barbosa, 2012), cuyas ventajas son rapidez, transparencia, promueve la eficiencia y conserva el interés público, de modo que recupera rápidamente el valor total del espectro.

El enfoque sugerido por la FCC se centra justamente en la idea de que el Estado no es el ente más acertado para considerar qué servicios y tecnologías necesitan los usuarios, sino que justamente el mercado (Oficina de desarrollo de las telecomunicaciones comisiones de estudio de la UIT-D, 2001) es el que determina estos parámetros y por esta razón se le debe dar una importancia mayor en la gestión del espectro radioeléctrico. Con esta metodología se busca que en vez de contar con entes reguladores que definan los límites del mercado, sea la reglamentación basada en las subastas y sus licencias asociadas, analizando el mercado, la que defina el área de servicio indicada según sus características de tamaño y servicio requerido. Esto establece un modelo mucho más flexible, pero como todo modelo de gestión, no aplica para todos los casos y debe ser revisado para su posible aplicación.

Otro enfoque que se puede abordar es desde una perspectiva económica. Se parte de que el objetivo común de cualquier sistema de asignación del espectro es maximizar su eficiencia, que se verá reflejada en la asignación del espectro a quien más lo valore (Bae, y otros, 2008) (Rivera, 2007), pero este concepto no es fácil de validar porque para un determinado servicio la franja de espectro más adecuada varía en términos de tiempo y ubicación. En este caso se estudia la posibilidad de que el espectro comparta diversas aplicaciones en una gran región geográfica a través de puntos de accesos similares a la red celular.

Los modelos basados en el mercado fueron generados a partir del trabajo del nobel Ronald Coase (Freyens, Loney, & Poole, 2010). En estos se mantiene la idea de establecer licencias para el espectro, que se asigna a un dueño exclusivo por subasta, quien tiene potestad sobre la reasignación de la licencia a través del comercio del espectro (Chin, y otros, 2008) (Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación; , 2006). De esta forma se asigna un mayor valor social al espectro, por lo que es un foco muy importante de investigación.

Asimismo, es necesario analizar el mercado, ya que con la alta demanda de espectro, esta puede superar la oferta y crear interferencias incontrolables y una disminución de la utilidad del modelo (Bae, y otros, 2008), aunque actualmente aún no hemos llegado a estos toques, por lo que el modelo común aún es válido (ANE Agencia Nacional del Espectro, 2010). Utilizando estos modelos se busca obtener diferentes sistemas de radio que no se enfocan tanto en la ocupación del espectro, porque el mismo espectro puede ser asignado a diferentes servicios, sitios o tiempos de acuerdo con la demanda, aunque se requiere un estudio más profundo de las características del mercado (Olafsson, Glover, & Nekovee, 2007). La aplicación de estos modelos requiere de análisis, ya que es probable que exista la necesidad de cambiar o revisar algunas condiciones regulatorias, pero es claro que estas alternativas (Cave, Doyle, & Webb, 2007) garantizan la aplicación de un costo-oportunidad de acceso al espectro, basado en el costo total en la mejor alternativa posible.

El mercado del espectro y su costo pueden tener un papel importante facilitando la reasignación ante la nueva demanda de servicios de telecomunicaciones (Marks & Marks, 2007), pero se deben tener en cuenta las limitaciones en su aplicación práctica (Alexander, 2010); aun cuando se han demostrado sus beneficios, se debe ser cuidadoso porque este modelo implica el establecimiento de derechos de acceso que pueden ser objeto de libre comercio y permitir el cambio de la tecnología en un entorno liberalizado.

Se ve una tendencia clara de la gestión del espectro radioeléctrico a examinar y replantear su fundamento central desde un enfoque basado en el mercado, que aumente el valor social y económico del espectro haciendo un uso más eficiente de este recurso, sin perder de vista el sector privado. Por lo tanto se debe analizar la posibilidad de implementar este modelo en nuestro país, debido a las necesidades del mercado y a las recomendaciones de organizaciones internacionales reconocidas internacionalmente como la FCC y la UIT.

GESTIÓN DEL ESPECTRO EN EL CONTEXTO COLOMBIANO

El sector de las tecnologías de la información y las comunicaciones en Colombia ha enfrentado una serie de retos regulatorios y políticos durante los últimos años debido al avance de la tecnología (Ayalde, 2011) (Tovar & Asociados Abogados Ltda, 2008). Con la Ley 1341 de 2009 se plasmaron los avances en el tema y se crearon o modificaron las agencias especiales de regulación, lo cual ha impactado positivamente en el sector (CINTEL Centro de Investigación de las Telecomunicaciones, 2011), pues esto ha permitido que los expertos y académicos discutan los diferentes temas planteados para la regulación en Colombia. Aunque aún nos falta desarrollo, especialmente en temas como NGN, el escenario para la gestión del espectro está en una etapa importante de desarrollo, como se puede apreciar en el Plan de Acción de la Agencia Nacional del Espectro, donde se busca modernizar la gestión del espectro (ANE Agencia Nacional del Espectro, 2012). Colombia se encuentra en una etapa de desarrollo impulsada por el Plan de Acción del Gobierno Vive Digital, que está articulado con el Plan de Desarrollo Nacional y constituye el eje central del Ministerio de Tecnologías de Información y las Comunicaciones (MinTIC). En el actual Plan 2010-2014 se busca masificar internet y consolidar la infraestructura tecnológica para el avance de los

usuarios dentro de un ecosistema digital basado en el Modelo del Banco Mundial (figura 4) (Chamorro & Barbosa, 2012). En el área de infraestructura de este ecosistema, los ejes principales son la expansión de la Red de Fibra Óptica Nacional y la asignación de espectro para IMT. Dentro del proceso de optimización del espectro, con la implementación de la televisión digital se tiene planeado que se liberen algunas bandas de frecuencia para aprovecharlas en la transmisión de datos y ampliar la cobertura en el país, así como establecer un estándar para la radio digital, que utiliza de manera más eficiente el espectro radioeléctrico asignado.

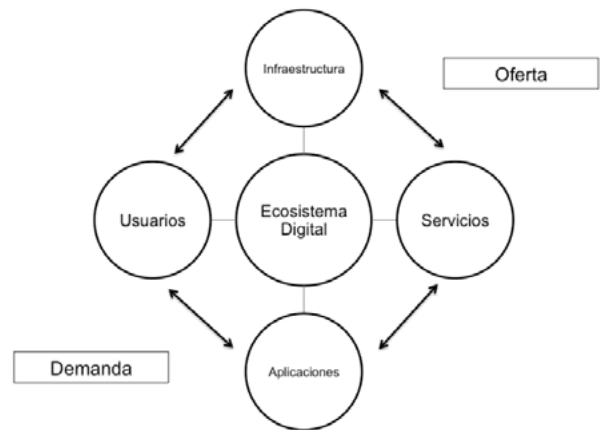


Figura 4. Ecosistema digital definido en el Plan Vive Digital.

Fuente: Chamorro y Barbosa (2012).

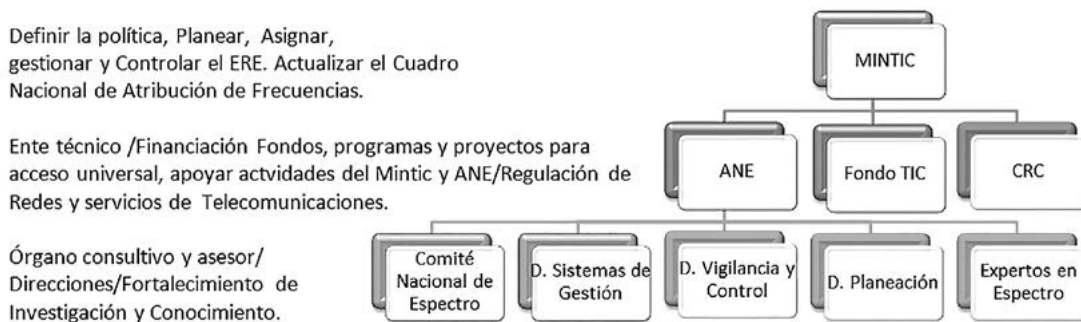


Figura 5. Entidades de gestión y control del espectro en Colombia.

Fuente: ANE (2012).

La figura 5 presenta las entidades más importantes en la gestión y control del espectro radioeléctrico en Colombia de acuerdo con el Plan Vive Digital (ANE Agencia Nacional del Espectro, 2012). A partir de la Ley 1341 de 2009 (Guerra de la Espriella & Oviedo Arango, 2011) se creó la Agencia Nacional del Espectro con el fin de establecer los parámetros técnicos referentes al espectro, pero se asignó al MinTIC la responsabilidad sobre la Planeación, Asignación, Gestión y Control del Espectro Radioeléctrico en el país.

El Plan de la ANE se enmarca en cuatro iniciativas (ANE Agencia Nacional del Espectro, 2012): asignación del espectro IMT, planeación estratégica del espectro, expertos en espectro, y vigilancia y control eficiente del espectro, para lo cual se está llevando a cabo una revisión y actualización de los procesos de gestión del espectro para hacer una administración del espectro más eficiente. Dentro de este contexto de la ANE, es el momento apropiado para revisar y plantear alternativas basadas en el mercado para la gestión del espectro radioeléctrico en el país.

Dentro de las actividades planeadas por el Estado (ANE Agencia Nacional del Espectro, 2012) se encuentra la socialización de los resultados de la CONFERENCIA MUNDIAL DE RADIOCOMUNICACIONES de la UIT, que le brinda a los países miembros como Colombia los lineamientos por seguir para los próximos cuatro años en materia de radiocomunicaciones, y se tiene planeado elaborar un plan maestro de gestión del espectro radioeléctrico.

Dentro de la reglamentación del espectro radioeléctrico en el país los siguientes documentos son los más relevantes (ANE Agencia Nacional del Espectro, 2012):

- Constitución Política de Colombia, Artículo 75.
- Documento CONPES, recomienda las políticas y los lineamientos para la Planeación, Gestión, Control y Vigilancia del Espectro Radioeléctrico.
- Ley 1341 de 2009, denominada Ley de las TIC, regula el acceso al uso del espectro radioeléctrico y crea la ANE.

- Decreto 4392 de 2010, procedimiento de selección objetiva.
- Resolución 290 de 2010, contraprestación económica de la utilización del espectro radioeléctrico.
- Resoluciones 2544/2009, 473/2012 y 2190/2003, que atribuyen frecuencias y bandas de uso libre.
- Decreto 093 de 2010, establece la estructura y funciones de la ANE.

En Colombia se han hecho atribuciones exclusivas a nivel de título primario a servicios de radiodifusión sonora y televisión y servicios IMT (ANE Agencia Nacional del Espectro, 2012). En Colombia, se adopta el tope de espectro, que desde el 2009 está en 55 MHz máximo por operador, y la asignación del espectro se hace mediante la modalidad de selección objetiva y se otorgan licencias en algunos casos de diez años, excluyendo radiodifusión y Tv. Uno de los principales inconvenientes es que no se cuenta con una base de datos sistematizada que permita conocer la atribución de frecuencia a determinados servicios y operadores. Se inicia la asignación de IMT en 1.9 GHz y se asignan frecuencias del dividendo digital en 700 MHz.

De acuerdo con la ANE (2010), usar el espectro radioeléctrico sin permiso previo implica la utilización ilegal de un bien del Estado, lo que se conoce como clandestinidad y genera unas sanciones penales y administrativas que dan cárcel de cuatro a diez años, así como multas hasta de mil salarios mínimos legales mensuales vigentes. Además, esto trae una pérdida de recursos para el Estado, desigualdad en el acceso al uso del espectro, interferencias generadas a los sistemas legalmente establecidos y a los operadores de servicios de telecomunicaciones, por esto la necesidad de un control exhaustivo del espectro para evitar este tipo de pérdidas.

Actualmente la ANE está estudiando diferentes alternativas, como el ingreso de operadores virtuales y el establecimiento de un mercado secundario (Guerra de la Espriella & Oviedo Arango, 2011)

para optimizar el recurso del espectro y así facilitar el ingreso de nuevos operadores y una mayor competencia, lo que beneficia al usuario en servicios y costos. Adicionalmente, se ve el interés de la ANE en cambiar el modelo de gestión del espectro actual, donde el Estado establece las reglas y parámetros de funcionamiento, a uno basado en el mercado (ANE Agencia Nacional del Espectro, 2012), más flexible, que apoye la optimización del espectro radioeléctrico.

Es importante resaltar que se está evaluando actualmente la radiación no ionizante debido a que el mercado necesita servicios de telecomunicaciones, pero que no afecten la salud de las personas (ANE Agencia Nacional del Espectro, 2010). La instalación de más torres de comunicaciones celulares no necesariamente implica más riesgo, por el contrario, la potencia de transmisión es menor, con lo cual se disminuye cualquier efecto que pueda tener sobre la salud humana. Al respecto cabe mencionar que se han hecho estudios que no muestran un índice de afectación debido a este tipo de radiación (ANE Agencia Nacional del Espectro, 2010).

CONCLUSIONES

El espectro es un bien público que inicialmente se define como un recurso escaso y cuyo aprovechamiento determina una ganancia económica grande para un país y unas condiciones de calidad del servicio para los usuarios de los servicios que se ofrecen a través de él. Los diversos métodos que buscan más flexibilidad en la gestión del espectro y con tecnologías como la radio cognitiva y la gestión dinámica del espectro, sumados a temas como el dividendo digital, la radio y la televisión digital terrestre, hacen que este ya no se vea como un recurso escaso, sino como un recurso limitado, que requiere de una gestión cada vez más eficiente.

De acuerdo con las características globales y nacionales, aunque en sintonía con las recomendaciones de la UIT, nuestra regulación debe trabajar mucho más en su desarrollo y actualización

para permitir modelos de gestión del espectro como los planteados en este artículo, que definan escenarios más realistas y donde el control deje de ser un asunto manejado por el Estado y sea enfocado a los servicios que realmente necesitan los usuarios, es decir, enfocado en el mercado de servicios de telecomunicaciones del país.

Los modelos tradicionales para la gestión del espectro, como el de "Instrucción y control", aunque aún son funcionales, están llegando a una etapa crítica donde están apareciendo problemas para asignar nuevas bandas de frecuencia, por lo cual en los nuevos modelos de gestión este modelo ya no aplica, aunque es el mejor para manejar temas de interferencia, pero es muy poco flexible.

Aunque los modelos basados en el mercado existen desde hace muchos años, se deben revisar en la actualidad, pues las características tecnológicas, sociales, políticas y regulatorias han creado un nuevo escenario de mercado en el que hay una amplia demanda de servicios inalámbricos y que cambia constantemente con los avances tecnológicos. Esto permitiría que el análisis y la implementación de este modelo sean viables, con lo cual ganaríamos un enfoque más social y mantendríamos la ganancia que se puede lograr con el comercio del espectro.

Muchos de los procesos que tienen que ver con los cambios en la gestión del espectro radioeléctrico están siendo materia de discusión e investigación, lo que hace oportuna la evaluación de alternativas como los modelos basados en el mercado de servicios de telecomunicaciones, cuya propuesta puede ser presentada para su implementación si se alinea correctamente con las políticas del MinTIC y la ANE y su proyección dentro del entorno generado por el Plan Vive Digital.

En Colombia debe fomentarse la capacitación en el manejo del espectro radioeléctrico, pues se desconoce su importancia para el país y la sociedad en general, no solo en el campo económico, sino como un medio para lograr el acceso universal a las redes y los servicios emergentes de telecomunicaciones. Por esto es importante la tarea que

está realizando el MinTIC de sensibilización y capacitación sobre el espectro radioeléctrico en todo el país, en la cual ha generado consultas abiertas sobre los distintos temas de la asignación, gestión y control del espectro para que expertos, académicos y miembros del sector de diferentes áreas aporten sus ideas en el tema, para que no se vuelva un ejercicio político, sino que se pueda analizar desde diferentes puntos de vista para lograr un mejor resultado que beneficie a la sociedad sin descuidar a los operadores privados e interesados en el espectro radioeléctrico.

FINANCIAMIENTO

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

REFERENCIAS

- Ahmed, A., Mubashir Hassan, M., Sohaib, O., Hussain, W., & Qasim Khan, M. (2011). An agent based architecture for cognitive spectrum management. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(12).
- Akyildiz, I., Lee, W. Y., & Chowdhury, K. (2009). Spectrum management in cognitive radio ad hoc networks. *Network, IEEE*, 23(4).
- Aldana J, A. T., & Vallejo, A. C. (2010). Telecomunicaciones, convergencia y regulación. *Revista Economía Institucional*, 12(23), 165-197.
- Alexander, E. (2010). *Asignación y Administración del Espectro Radioeléctrico en Países de Centroamérica y su Impacto en el Desarrollo del Sector de Servicios de Telecomunicación Móvil*. (Vol. 21). DIRSI (Diálogo Regional sobre Sociedad de la Información).
- ANE Agencia Nacional del Espectro. (2010). *Uso eficiente del espectro radioeléctrico*. Retrieved from <http://www.ane.gov.co/>
- ANE Agencia Nacional del Espectro. (2012). *Plan de Acción 2012*. Retrieved from <http://www.ane.gov.co/>
- Attar, A., & Aghvami, A. H. (2007). A Framework for Unified Spectrum Management (USM) in Heterogeneous Wireless Networks. *IEEE Communications Magazine*, 45(9), 44-51.
- Ayalde, L. V. (2011). El derecho de la competencia en el sector de las tecnologías de la información y las comunicaciones-TIC. *Revista de derecho de la competencia (Bogotá)*, 7, 127-190.
- Bae, J., Beigman, E., Berry, R., Honig, M. L., Shen, H., Vohra, R., & Zhou, H. (2008). Spectrum markets for wireless services. *3rd IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, DySPAN 2008.*, (pp. 1-10). Chicago, IL.
- Buddhikot, M. (2007). Understanding Dynamic Spectrum Access: Models, Taxonomy and Challenges. *2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2007. DySPAN 2007*, (pp. 649-663). Dublin.
- Butcher, J., Mark, L., & Geoff, L. (2007). *The Economics of Spectrum Management: A Review*.
- Calvet Madrigal, J. M., & Parra Valbuena, A. J. (2009). *Modelo de porter y estrategias de negocio de operadores de telecomunicaciones en España*. Departamento de Organización de Empresas. Cataluña: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Cave, M., Doyle, C., & Webb, W. (2007). *Essentials of modern spectrum management*. New York: Cambridge ; New York : Cambridge University Press.
- Cave, M. (2008). New spectrum-using technologies and the future of spectrum management: a European. *policy perspective*, 67(3), 1-20.
- Chamorro, L., & Barbosa, A. (2012). *Espectro abierto para el desarrollo*. (COLNODO, Ed.) Retrieved from <http://www.colnodo.apc.org/index.shtml>
- Chapin, J., & Lehr, W. (2007). Cognitive Radios For Dynamic Spectrum Access-The Path To Market Success For Dynamic Spectrum Access Technology. *IEEE Communications Magazine*, 45(5), 96-103.
- Chin, C. M., BT Group, Asian Res. Centre, Lumpur, K., Olafsson, S., Virginas, B., & Owusu, G. (2008). Radio Resource Management via Spectrum Trading. *IEEE Vehicular Technology Conference, 2008. VTC Spring 2008* (pp. 1781-1785). Singapore: IEEE.
- CINTEL Centro de Investigación de las Telecomunicaciones. (2011). *Panorama de las Tecnologías de la información y las Comunicaciones en Colombia*. Bogotá: CINTEL. Retrieved from <http://cintel.org.co/>

- Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación; . (2006). *La gestión de espectro y el modelo competencial del sector de las comunicaciones electrónicas*. Madrid: Asociación Española de Ingenieros de Telecomunicación.
- De León, O. (2009). *Perspectivas de las tecnologías de telecomunicaciones y sus implicancias en los mercados y marcos regulatorios en los países de América Latina y el Caribe*. Chile: Naciones Unidas. Retrieved from <http://www.cepal.org/SocInfo>
- De León, O. B., & González Soto, O. (2008). *Las Telecomunicaciones de Banda Ancha en la Región Américas*. Unión Internacional de Telecomunicaciones–UIT.
- Doshi, S., Duong, H., Bagrodia, R., & Thai, S. (2006). Spectrum and Network Management Convergence for Wireless Communications. *IEEE Military Communications Conference, 2006. MILCOM 2006* (pp. 1-7). Washington, DC: IEEE.
- Feijoo Gonzalez, C. A., Gómez Barroso, J. L., & Mochón, A. (2011). Modificaciones en la gestión del espectro: opciones y situación actual. *E.T.S.I. Telecomunicación (UPM)*.
- Foster, M. &, Cave, M., & Jones, R. . (2009). *Gestión del espectro radioeléctrico: Módulo 5: Conjunto de herramientas para la reglamentación de las TIC*. UIT-R, Unión Internacional de Telecomunicaciones and InfoDEV. Retrieved from <http://www.ictregulationtoolkit.org/en/Section.1247.htm>
- Freyens, B. P., Loney, M., & Poole, M. (2010). Wireless Regulations and Dynamic Spectrum Access in Australia. *IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum, 2010*, (pp. 1-12). Singapore.
- Gajewski, P., & Marek, S. (2009). Dynamic Spectrum Management for Military Wireless Networks. *NATO Research and Technology Organization*.
- García García, J. M. (2010). *Metodología para analizar y simular la eficiencia económica de la flexibilización del uso del espectro radioeléctrico*. Retrieved from http://eprints.ucm.es/11392/1/Methodolog%C3%ADa_flexibilizaci%C3%B3n_uso_espectro.pdf
- Guerra de la Espriella, M. D., & Oviedo Arango, J. D. (2011). De las telecomunicaciones las TIC: Ley de TIC de Colombia (L1341/09). *CEPAL Serie Estudios y Propectivas, 22*.
- Hang, Z., Randall, B., Honig, M. L., & Vohra, R. (2009). Complementarities in spectrum markets. *47th Annual Conference on Communication, Control, and Computing 2009* (pp. 499–506). Allerton: IEEE.
- Hazlett, T. W., & Bazelon, C. (2007). Market allocation of radio spectrum. *ITU Workshop on Market Mechanisms for Spectrum Management*. Geneva.
- He, D., & Martínez, R. (2009). *Spectrum Management for MicroGrids*. Retrieved from <http://www.pointview.com/data/files/3/2422/1380.pdf>
- Mansilla, E. V. (1996). La administración del espectro de frecuencias como reflejo de una política de comunicaciones.
- Marcus, J. S., Nett, L., Scanlan, M., Stumpf, U., Cave, M., & Pogorel, G. (2005). *Towards More Flexible Spectrum Regulation*. Germany: Bad Honnef.
- Marks, P., & Marks, B. (2007). Spectrum Allocation, Spectrum Commons and Public Goods: the Role of the Market. *Communications & Strategies, 67*, 65-84.
- Mastorakis, G., Pallis, E., Zacharopoulos, V., & Bourdena, A. (2011). New business strategies and marketing opportunities utilizing a liberalized spectrum management framework. *WSEAS Transactions on Business and Economics, 8(2)*, 39-49.
- Mesas de Trabajo MinTIC-CRC-ANE. (2011). Nuevas dimensiones. *11 Simposio Mundial de Reguladores de telecomunicaciones*, (pp. 1-71). Armenia (Colombia).
- Ministerio de Comunicaciones. (2008). *Fundamentos de Gestión Nacional del Espectro Radioeléctrico: Manual de gestión Nacional del espectro radio eléctrico para Colombia*. Bogotá: Ministerio de Comunicaciones, República de Colombia.
- Oficina de desarrollo de las telecomunicaciones comisiones de estudio de la UIT-D. (2001). *Guía regulatoria para la construcción de una comunidad global de información*. Retrieved from http://www.itu.int/ITU-D/study_groups/SGP_1998-2002/SG1/.../195S.doc%E2%80%8E
- Olafsson, S., Glover, B., & Nekovee, M. (2007). Future management of spectrum. *Future management of spectrum. BT Technology Journal, 25(2)*, 52-63.

- Olafsson, S., Glover, B., & Nekovee, M. (2007). Future management of spectrum. *BT Technology Journal*, 25(2).
- Quintero, A. (2008). Acceso dinámico al espectro: estado actual, tendencias y retos. *Revista entre Ciencia e Ingeniería*, 2(4), 38-57.
- Quintuña Rodríguez, V. K. (2010). *Mapa de control de espectro radioeléctrico*. Retrieved from <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/419>
- Rivera, E. (2007). *Modelos de privatización y desarrollo de la competencia en las telecomunicaciones de Centroamérica y México*. México, D.F.: Naciones Unidas, CEPAL, Unidad de Comercio Internacional e Industrial.
- Tovar, F., & Asociados Abogados Ltda. (2008). *Fundamentos de Gestión Nacional del Espectro Radioeléctrico*. Bogotá: MinTIC (Ministerio de tecnologías de la información y telecomunicaciones).
- UIT-R Unión Internacional de Telecomunicaciones, s. R. (2010). *Orientaciones sobre el marco reglamentario para la gestión nacional del espectro*.
- Union Internacional de Telecomunicaciones. (2005). *Manual de técnicas informatizadas para la gestión del espectro*. Ginebra: UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones).
- Valenzuela, L. F. (2010). *La estrategia y la política sectorial de las tecnologías de la información y las telecomunicaciones en Colombia*. Obtenido de http://www.fce.unal.edu.co/media/files/documentos/Comunicaciones/doccid_no.3_valenzuela1.pdf
- Wellenius, B., & Neto, I. (2005). *Radio spectrum : opportunities and challenges for the developing world*. Washington, D.C: World Bank, Global Information and Communications Technology, Strategy Unit.
- Wellenius, B., Neto, I., & Bank, W. (2008). *Managing the radio spectrum : framework for reform in developing countries*. Washington, D.C.: The World Bank.
- Zhao, Q., & Sadler, B. M. (2007). A survey of dynamic spectrum access. *IEEE Signal Processing Magazine*, 24(3), 79-89.





UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

INSTRUCCIONES PARA LOS AUTORES

Revista *TECNURA* Universidad Distrital Francisco José de Caldas Facultad Tecnológica

CONTENIDO

- Alcance y política editorial de la revista
- Tipos de artículos aceptados
- Formato del artículo
- Envío de artículos
- Procedimiento para la publicación
- Arbitraje de artículos
- Contacto

1. ALCANCE Y POLÍTICA EDITORIAL DE LA REVISTA

La revista *Tecnura* es una publicación institucional de la Facultad Tecnológica de la Universidad Francisco José de Caldas, de carácter científico-tecnológico con periodicidad trimestral, que se publica los meses de enero, abril, julio y octubre. Su primer número apareció en el segundo semestre del año 1997 y hasta la fecha ha mantenido su regularidad.

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

La revista *Tecnura* está dirigida a docentes, investigadores, estudiantes y profesionales interesados en la actualización permanente de sus conocimientos y el seguimiento de los procesos de investigación científico-tecnológica, en el campo de las ingenierías. Tiene como misión divulgar resultados de proyectos de investigación realizados en el área de las ingenierías, a través de la publicación de artículos originales e inéditos, realizados por académicos y profesionales pertenecientes a instituciones nacionales o extranjeras del orden público o privado. Los artículos presentados deben ser trabajos inéditos escritos en español o inglés; sin embargo, tendrán preferencia los artículos que muestren conceptos innovadores de gran interés, que traten sobre asuntos relacionados con el objetivo y cobertura temática de la revista.

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

(Chile), e-Revistas (España), DOAJ (Suecia), Ulrich de Proquest (Estados Unidos).

Tecnura es una revista arbitrada mediante un proceso de revisión entre pares de doble ciego. La periodicidad de la conformación de sus comités Científico y Editorial está sujeta a la publicación de artículos en revistas indexadas internacionalmente por parte de sus respectivos miembros.

La Universidad Distrital Francisco José de Caldas, sus directivas, el Editor, el Comité Editorial y Científico no son responsables por la opinión y criterios expresados en el contenido de los artículos y estos se publican bajo la exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento del Comité Editorial.

Además de la versión impresa, la revista *Tecnura* tiene también una versión digital disponible en su página web: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>

2. TIPOS DE ARTÍCULOS ACEPTADOS

De acuerdo con la clasificación del Índice Nacional de Publicaciones Científicas y Tecnológicas (Publindex-Colciencias), la revista *Tecnura* recibe postulaciones de artículos inéditos de los siguientes tipos:

- **Artículos de investigación científica y tecnológica:** documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos de investigación. La estructura generalmente utilizada contiene cuatro apartes importantes: introducción, metodología, resultados y conclusiones.
- **Artículos de reflexión:** documento que presenta resultados de investigación desde una perspectiva analítica, interpretativa o crítica del autor, sobre un tema específico y recurriendo a fuentes originales.
- **Artículo de revisión:** documento resultado de una investigación donde se analizan, sistematizan e integran los resultados de las investigaciones publicadas o no publicadas, sobre un campo en ciencia o tecnología, con el fin de dar cuenta de los avances y las tendencias de desarrollo. Se caracteriza por presentar una cuidadosa revisión bibliográfica de al menos 50 referencias.

3. FORMATO DEL ARTÍCULO

3.1 Del lenguaje y estilo apropiado para la redacción de artículos

- Deben emplearse estructuras de oraciones simples, evitando las que sean demasiado largas o complejas.
- El vocabulario empleado debe ser básico y común. Los términos técnicos deben explicarse brevemente; asimismo, el significado de las siglas debe presentarse la primera vez que estas aparecen en el texto.
- Los autores son responsables de que su trabajo sea conducido de una manera profesional y ética.

3.2 De la extensión de los documentos

Los artículos no deben tener una extensión de más de 25 páginas en tamaño carta y a doble espacio, con márgenes simétricas de 3 cm. Solo en el caso de los artículos de revisión las 25 páginas no incluyen las referencias bibliográficas.

3.3 Del formato de presentación

Los artículos presentados deben ser trabajos inéditos escritos en español o inglés y deben digitarse en Microsoft Word (2003 en adelante), cumpliendo con las siguientes indicaciones:

- Letra *Times New 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@udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com

Página web: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>



INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

Tecnura journal District francisco José de caldas university Faculty of technology

CONTENT

- **Scope and editorial policy of the journal**
- **Type of accepted articles**
- **Article format**
- **Article submission**
- **Publication procedure**
- **Arbitration of article process**
- **Contact**

1, 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>

2. 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.

3. ARTICLE FORMAT

3.1 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.

3.2 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.

3.3 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.

3.4 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.xxxxxxxx

Surnames, A. A. (Ed.). (Year). *Title*. City: Editorial.

Book with author

Goleman, D. (2000). *La inteligencia emocional: Por qué es más importante que el cociente intelectual*. México: Ediciones B.

Book with editor:

Castillo Ortiz, A. M. (Ed.). (2000). *Administración educativa: Técnicas, estrategias y prácticas gerenciales*. San Juan: Publicaciones Puertorriqueñas

Book electronic version:

Montero, M. & Sonn, C. C. (Eds.). (2009). *Psychology of Liberation: Theory and applications*. [Versión de Springer]. doi: 10.1007/978-0-387-85784-8

T

echnical 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

4. 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.

4.1 Cover letter

The article must be submitted with a cover letter addressed to the director and editor of the journal, Engineer Cesar Augusto Garcia Ubaque, 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.

4.2 Article-authors information format

The article has to be submitted with an information format about the article and its authors which can be downloaded from the web page of Tecnura journal <http://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.

4.3 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.

5. PUBLICATION PROCEDURE

The procedure to be followed by Tecnura journal for the evaluation and possible publication of the papers sent by the authors is the following in chronological order:

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.

6. 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@udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com

Web page:

[http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/](http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/index)

[Tecnura/index](http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/index)



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

SUSCRIPCIÓN

Revista *Tecnura*

Nombre completo: _____
Institución u organización: _____
Factura a nombre de: _____
Dirección de envío: _____
Ciudad: _____ Departamento, Estado o provincia: _____
Código postal: _____ Apartado aéreo / P.O. Box: _____
País: _____ Correo electrónico: _____
Teléfono: _____ Fax: _____ Firma: _____

Tabla de costos de suscripción:

| Región | 1 Año | 2 Años |
|----------------------------|------------|------------|
| Bogotá | 40 000 COP | 70 000 COP |
| Colombia | 45 000 COP | 80 000 COP |
| América Latina y el Caribe | 40 USD | 70 USD |
| Estados Unidos y Canadá | 40 USD | 70 USD |
| Otras regiones | 60 USD | 100 USD |

Nota: los precios tanto en dólares como en pesos incluyen el valor del envío.

Diligenciar el formato de suscripción y enviarlo por correo junto con la copia del recibo de consignación a la dirección postal que aparece en el parte inferior de esta página o escaneado a los correos electrónicos tecnura@udistrital.edu.co 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@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
 Transversal73ANo.70B-35 Sur
 Phone: +57 - 1 - 7311542
 Mobile:+57-3153614852
 E-mail: tecnura@udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com