

EDITORIAL

INVESTIGACIÓN

Metodología para la selección de atributos y condiciones operativas para la localización de fallas basada en la máquina de soporte vectorial

Methodology for selection of attributes and operating conditions for SVM-Based fault locator's
DEBBIE JOHAN ARREDONDO ARTEAGA, WALTER JULIÁN GIL GONZÁLEZ, JUAN JOSÉ MORA FLÓREZ

Despacho económico en sistemas de potencia considerando estabilidad transitoria

Economic dispatch in power systems considering transient stability
DIEGO ALEJANDRO DÍAZ TAMAYO, ALEJANDRO GARCÉS RUIZ, DIEGO GONZÁLEZ OCAMPO

Sondeo compresivo aplicado al sondeo de espectro de banda ancha eficiente en sistemas de radio cognitivo

Compressive sensing applied to efficient broadband spectrum sensing on cognitive radio systems
EVELIO ASTAIZA HOYOS, HÉCTOR FABIO BERMÚDEZ OROZCO, LUIS FREDDY MUÑOZ

Fibras vegetales colombianas como refuerzo en compuestos de matriz polimérica

Colombian vegetal fibers as a reinforcement in polymeric matrix composites
JOSÉ LUIS SUAREZ CASTAÑEDA, JOSÉ WILLIAM RESTREPO MONTOYA, ADRIANA QUINCHÍA FIGUEROA, ADRIANA QUINCHÍA FIGUEROA

Efecto del gas en la velocidad de onda de corte de suelos arenosos densificados con explosivos

Effect of gas on shear wave velocity of sandy soils densified with explosives
CARLOS ALBERTO VEGA-POSADA, ALFONSO MARIANO RAMOS-CAÑÓN, EDWIN FABIÁN GARCÍA ARISTIZÁBAL

E2CAV, Pavement layer thickness estimation system based on image texture operators

E2CAV, sistema para la estimación del espesor de la capa de pavimento basándose en operadores de textura en imágenes
BRAYAN BARRIOS ARCILA, BLADIMIR BACCA CORTES, SANDRA NOPE RODRÍGUEZ

11 OpenRRArch: una arquitectura abierta, robusta y confiable para el control de robots autónomos 96

OpenRRArch: An open, robust and reliable architecture for controlling autonomous robots
FREDDY HERNÁN MARTÍNEZ SARMIENTO, DIEGO ARMANDO GIRAL RAMÍREZ

15 ESTUDIO DE CASO

Global navigation approach for assistant robot 105

Enfoque de navegación global para un robot asistente

FERNANDO MARTÍNEZ SANTA, SANTIAGO ORJUELA RIVERA, MARIO ARBULÚ

SAAVEDRA

27 Análisis de temperaturas durante la cocción de ladrillos macizos y sus propiedades finales 118

Analysis of temperatures during the firing bricks and final properties solid

GUSTAVO GUERRERO GÓMEZ, EDWIN ESPINEL BLANCO, HELLER GUILLERMO SÁNCHEZ ACEVEDO

Identificación de un método cuantitativo para la evaluación de la calidad ambiental de centros educativos cercanos a antenas de estaciones base de telefonía 132

Identification of a quantitative method for the evaluation of the environmental quality of educational centers near to antennas of base stations of mobile telephony

ALEXÁNDER ARMESTO ARENAS, WILSON ANGARITA CASTILLA

Instrucciones para los autores 140

67 Instructions for authors 148

SUSCRIPCIÓN 156

SIGN UP

81

Tecnura

p-ISSN: 0123-921X
Volumen 21 - Número 51
Enero - Marzo de 2017

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad Tecnológica



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Revista Tecnura • Volumen 21 – Número 51 • Enero - Marzo de 2017
p-ISSN: 0123-921X • e-ISSN: 2248-7638 • Bogotá D.C. Colombia

Tecnura

Tecnología y cultura, afirmando el conocimiento

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad Tecnológica

Despacho económico en sistemas de potencia considerando estabilidad transitoria

Fibras vegetales colombianas como refuerzo en compuestos de matriz polimérica

E2CAV, sistema para la estimación del espesor de la capa de pavimento basándose en operadores de textura en imágenes

Global navigation approach for assistant robot



Tecnura

Tecnología y cultura, afirmando el conocimiento

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad Tecnológica

Vol. 21 No. 51
Enero - Marzo de 2017
p-ISSN: 0123-921X
e-ISSN: 2248-7638



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

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

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

EDITOR

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

COMITÉ EDITORIAL

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

COMITÉ CIENTÍFICO

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

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

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

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

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

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

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

EVALUADORES

PhD. Carlos Alberto Restrepo Patiño
Universidad de Talca. Chile

PhD. Carlos Andrés Torres Pinzón
Universidad Santo Tomás. Colombia

PhD. Cesar Augusto Orozco Henao
Universidad del Norte, Colombia

PhD. Ramon de la Rosa Steinz
Universidad de Valladolid, España

PhD. Ronald Saul Gutierrez Rios
Universidad de la Sabana, Colombia

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

PhD. Yeleny Zulueta Véliz
Reperto Novia del Mediodía. Cuba

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

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

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

MEng. Jaiber Evelio Cardona Aristizabal
Universidad del Quindío, Colombia

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

MEng. Jhón Jairo Galvis
Universidad de los Andes, Colombia

MEng. Juan Pablo Franco Rubio
Corporación Unificada Nacional de educación superior
CUN, Colombia

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

Esp. Luis Antonio Noguera Vega
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

ASISTENTES DE LA REVISTA TECNURA

MEng. Diego Armando Giral Ramírez

COORDINACIÓN EDITORIAL

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

Tecnura

Vol. 20 No. 50

Enero - Marzo de 2017

REVISTA *TECNURA*

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

PERIODICIDAD

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

COBERTURA TEMÁTICA

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

MISIÓN

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

PÚBLICO OBJETIVO

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

INDEXACIÓN

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

FORMA DE ADQUISICIÓN

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

SUSCRIPCIÓN

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

REPRODUCCIÓN

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

DIRECCIÓN POSTAL

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

DISEÑO ORIGINAL

Julián Hernández-Taller de Diseño

CORRECCIÓN DE ESTILO PARA ESPAÑOL

Fernando Carretero Padilla

CORRECCIÓN DE ESTILO PARA INGLES

Laura Ximena García

DIAGRAMACIÓN Y DISEÑO DE CUBIERTA

Julián Hernández-Taller de Diseño
director@julianhernandez.co

IMPRESIÓN

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



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

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

EDITOR

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

EDITORIAL COMMITTEE

Ph.D. Ing. Electo Eduardo Silva
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

PhD. Carlos Alberto Restrepo Patiño
Universidad de Talca, Chile

PhD. Carlos Andrés Torres Pinzón
Universidad Santo Tomás, Colombia

PhD. Cesar Augusto Orozco Henao
Universidad del Norte, Colombia

PhD. Ramon de la Rosa Steinz
Universidad de Valladolid, España

PhD. Ronald Saul Gutierrez Rios
Universidad de la Sabana, Colombia

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

PhD. Yeleny Zulueta Véliz
Reperto Novia del Mediodía, Cuba

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

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

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

MEng. Jaiber Evelio Cardona Aristizabal
Universidad del Quindío, Colombia

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

MEng. Jhón Jairo Galvis
Universidad de los Andes, Colombia

MEng. Juan Pablo Franco Rubio
Corporación Unificada Nacional de educación superior CUN, Colombia

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

Esp. Luis Antonio Noguera Vega
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

TECNURA JOURNAL ASSISTANTS

MEng. Diego Armando Giral Ramírez

EDITORIAL COORDINATION

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

Tecnura

Vol 21 No. 51

January - March de 2017

TECNURA JOURNAL

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

PERIODICITY

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

THEMATIC COVERAGE

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

MISSION

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

TARGET AUDIENCE

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

INDEXING

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

FORM OF ACQUISITION

Tecnura journal is available through purchase, exchange or subscription.

SIGN UP

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

REPRODUCTION

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

POSTAL ADDRESS

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

ORIGINAL DESIGN

Julián Hernández - Taller de Diseño
director@julianhernandez.co

STYLE CORRECTION IN SPANISH

Fernando Carretero Padilla

STYLE CORRECTION IN ENGLISH

Laura Ximena García

LAYOUT AND TITLE PAGE 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: Optima LT Std
Printing: 400 copies

DECLARACIÓN DE ÉTICA Y BUENAS PRÁCTICAS

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

Obligaciones y responsabilidades generales del equipo editorial

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

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

Relaciones con los lectores

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

Relaciones con los autores

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

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

Relaciones con los evaluadores

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

Proceso de evaluación por pares

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

Reclamaciones

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

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

Fomento de la integridad académica

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

Protección de datos individuales

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

Seguimiento de malas prácticas

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

Integridad y rigor académico

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

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

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

Relaciones con los propietarios y editores de revistas

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

Conflicto de intereses

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

Quejas/denuncias

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

CODE OF ETHICS AND GOOD PRACTICE

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

General duties and responsibilities of the editorial board

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

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

Relations with authors

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

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

Relations with evaluators

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

Peer review process

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

Claims

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

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

Promoting Academic Integrity

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

Protection of individual data

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

Tracking malpractice

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

Integrity and academic rigour

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

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

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

Relations with owners and journal editors

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

Conflict of interest

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

Complaints / allegations

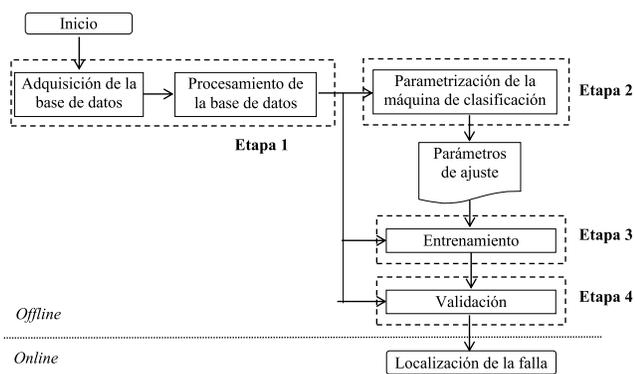
Any author, reader, reviewer or editor may refer their complaints to the competent authorities.

Contenido

EDITORIAL

11

INVESTIGACIÓN

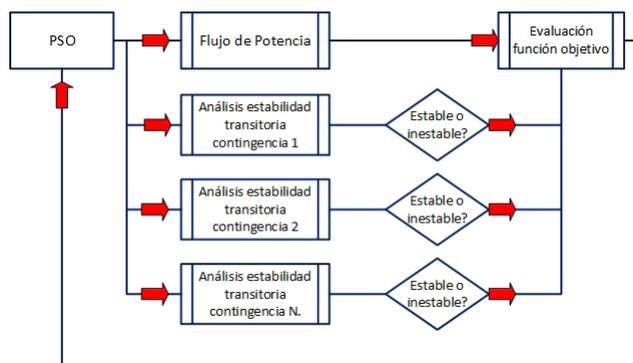


Metodología para la selección de atributos y condiciones operativas para la localización de fallas basada en la máquina de soporte vectorial

15

Methodology for selection of attributes and operating conditions for SVM-Based fault locator's

DEBBIE JOHAN ARREDONDO ARTEAGA, WALTER JULIÁN GIL GONZÁLEZ, JUAN JOSÉ MORA FLÓREZ

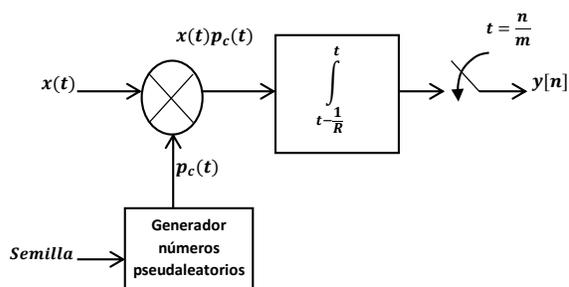


Despacho económico en sistemas de potencia considerando estabilidad transitoria

27

Economic dispatch in power systems considering transient stability

DIEGO ALEJANDRO DÍAZ TAMAYO, ALEJANDRO GARCÉS RUIZ, DIEGO GONZÁLEZ OCAMPO

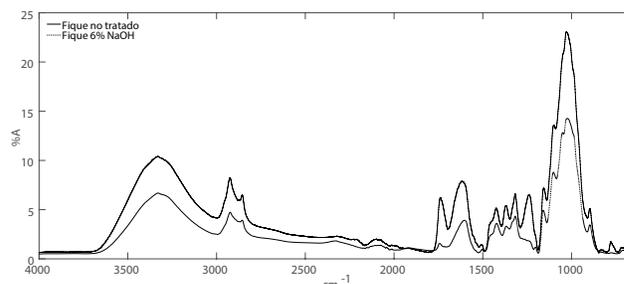


Sondeo compresivo aplicado al sondeo de espectro de banda ancha eficiente en sistemas de radio cognitivo

42

Compressive sensing applied to efficient broadband spectrum sensing on cognitive radio systems

EVELIO ASTAIZA HOYOS, HÉCTOR FABIO BERMÚDEZ OROZCO, LUIS FREDDY MUÑOZ

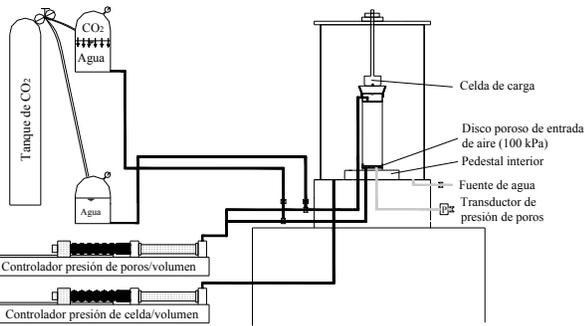


Fibras vegetales colombianas como refuerzo en compuestos de matriz polimérica

57

Colombian vegetal fibers as a reinforcement in polymeric matrix composites

JOSÉ LUIS SUAREZ CASTAÑEDA, JOSÉ WILLIAM RESTREPO MONTOYA, ADRIANA QUINCHÍA FIGUEROA, ADRIANA QUINCHÍA FIGUEROA

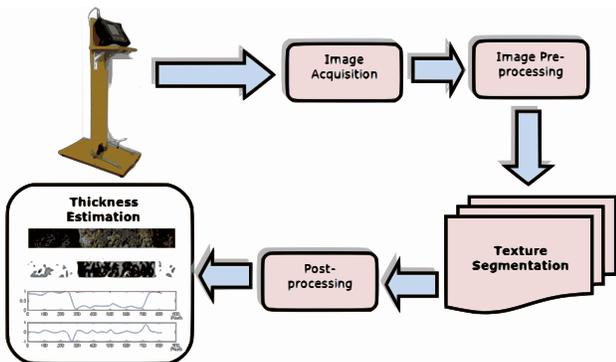


Efecto del gas en la velocidad de onda de corte de suelos arenosos densificados con explosivos

67

Effect of gas on shear wave velocity of sandy soils densified with explosives

CARLOS ALBERTO VEGA-POSADA, ALFONSO MARIANO RAMOS-CAÑÓN, EDWIN FABIÁN GARCÍA ARISTIZÁBAL

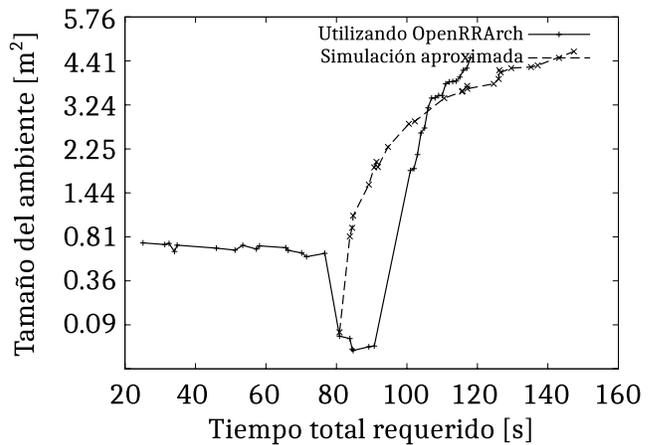


E2CAV, Pavement layer thickness estimation system based on image texture operators

81

E2CAV, sistema para la estimación del espesor de la capa de pavimento basándose en operadores de textura en imágenes

BRAYAN BARRIOS ARCILA, BLADIMIR BACCA CORTES, SANDRA NOPE RODRÍGUEZ



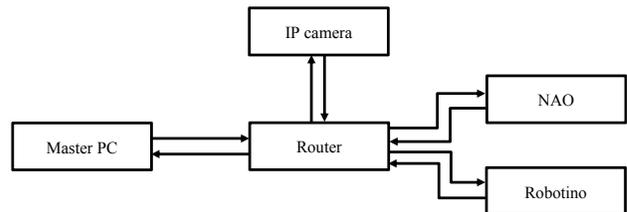
OpenRRArch: una arquitectura abierta, robusta y confiable para el control de robots autónomos

96

OpenRRArch: An open, robust and reliable architecture for controlling autonomous robots

FREDY HERNÁN MARTÍNEZ SARMIENTO, DIEGO ARMANDO GIRAL RAMÍREZ

ESTUDIO DE CASO



Global navigation approach for assistant robot

105

Enfoque de navegación global para un robot asistente

FERNANDO MARTÍNEZ SANTA, SANTIAGO ORJUELA RIVERA², MARIO ARBULÚ SAAVEDRA

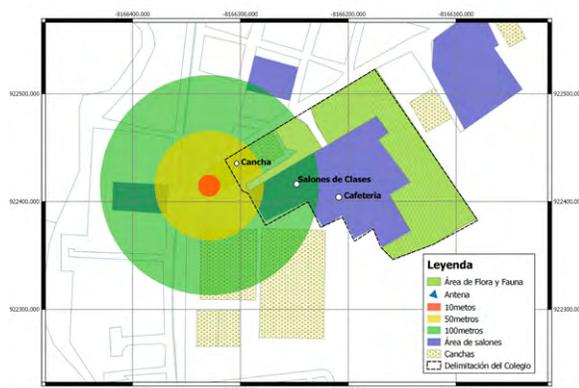


Análisis de temperaturas durante la cocción de ladrillos macizos y sus propiedades finales

Analysis of temperatures during the firing bricks and final properties solid

GUSTAVO GUERRERO GÓMEZ, EDWIN ESPINEL BLANCO, HELLER GUILLERMO SÁNCHEZ ACEVEDO

118



Identificación de un método cuantitativo para la evaluación de la calidad ambiental de centros educativos cercanos a antenas de estaciones base de telefonía

132

Identification of a quantitative method for the evaluation of the environmental quality of educational centers near to antennas of base stations of mobile telephony

ALEXÁNDER ARMESTO ARENAS, WILSON ANGARITA CASTILLA

Instrucciones para los autores

140

Instructions for authors

148

SUSCRIPCIÓN

156

SIGN UP

La población mundial ha superado ya los 7000 millones de habitantes. Hay preocupación creciente por la escasez del agua en el mundo por causa del cambio climático global, lo cual ha empezado a ser un motivo de conflicto en países como Somalia, Etiopía, Israel, Siria, Palestina, entre otros, con bajos niveles de recursos hídricos (González, 2005).

El agua es un líquido inodoro e insípido, con punto de congelación 0°C, punto de ebullición a partir de los 100°C a nivel del mar y densidad máxima a partir de una temperatura de 4°C; es un agente ionizante, es decir, un disolvente universal, y actúa como catalizador en muchas reacciones químicas (Decreto 1541,1978). El agua presenta tres estados de la materia, los cuales son: sólido, líquido y gaseoso. Como sólido o hielo se encuentran los glaciares, los casquetes polares, en forma de nieve, granizo y escarcha. En estado líquido se presenta como nubes de agua y precipitación en la vegetación y cubriendo las tres cuartas partes (3/4) de la superficie terrestre: pantanos, lagos, ríos, mares y océanos. Finalmente, como gas se presenta en la niebla, vapor, vapor atmosférico (medición de la humedad relativa) y nubes. Por otra parte, debido a la gravedad y la precipitación, el agua se acumula debajo de la superficie terrestre, formando depósitos de aguas subterráneas que abastecen pozos y manantiales.

Al hacer un análisis con respecto al recurso hídrico, se encuentra que Colombia a finales del siglo XX ocupó el cuarto lugar en el mundo por disponibilidad per cápita del agua. Mientras que en la actualidad, de acuerdo con el informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo Aguas para todos—Agua para la vida (World Water day 2016, UNESCO), Colombia ocupa el puesto 24 entre 203 países en el mundo. La pérdida del cuarto puesto es un indicador principal del aumento de la población y el crecimiento de las actividades productivas que afectan la disponibilidad del recurso hídrico; así también el cambio climático que nos afecta globalmente por consecuencia de la falta de pertenencia ante nuestros recursos hídricos, ecosistémicos y forestales (Gualdrón, 2011).

De manera un tanto paradójica, nuestro país ha tenido un importante desarrollo en materia de legislación ambiental, a partir de la Convención de Estocolmo de

1972, cuyos principios se acogen desde el Código nacional de recursos naturales renovables y de protección al medio ambiente, contenido en el decreto ley 2811 de 1974. En 1991, como fruto de la nueva constitución política de Colombia, la protección al medio ambiente favorece el derecho colectivo de comunidades indígenas y ciudadanos del común en cuanto a la protección al medio ambiente, a través de acciones populares (acciones de tutela y de cumplimiento) (CRA, 1997). En concordancia con la Conferencia de las Naciones Unidas sobre medio ambiente y desarrollo, realizada en Río de Janeiro, Brasil, en 1992, se expide la Ley 99 de 1993 que conformó el Sistema Nacional Ambiental (SINA), creándose así el Ministerio de Medio Ambiente como su ente rector (actualmente Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial). A su vez, esta Ley de Gestión Ambiental –SINA–incorpora los recursos naturales renovables en Colombia (ANLA, 2016).

En materia de recursos hídricos, la normatividad actual sobre las aguas en Colombia, tanto marinas como no marinas, describe las características generales sobre las propiedades de las aguas. Relaciona las aguas marinas y/o aguas marítimas consagradas en el derecho público internacional (Artículo 101 de la Constitución Política de Colombia). Define que “el territorio junto con los bienes públicos que de él formen parte pertenecerán a la Nación”. Es necesario aclarar que, mientras el dominio público sobre las aguas marinas se desprende de la Constitución Política, del derecho internacional y de los tratados internacionales, las aguas continentales son administradas por el estado a través de los entes territoriales (Art. 674, 677 y 678 del Código Civil de Colombia). Sin embargo, el Estado no es titular del territorio, es decir, no es dueño de éste, sino que la Nación ejerce la soberanía sobre él (UBA, 2010).

Nuestra legislación separa el régimen jurídico de las aguas del mar con el de las aguas no marítimas (Decreto Ley 2811,1974), dando origen a varios documentos relacionados con el recurso hídrico de las aguas marinas, proponiendo el derecho sostenible de espacios oceánicos y zonas costeras, contribuyendo al mejoramiento de la calidad de vida de estas poblaciones, desarrollo de actividades productivas, preservación y conservación de los recursos marinos y costeros. Por

esta razón, las aguas que se encuentran en tierras firmes se llaman aguas continentales. De igual manera, el mar territorial, la zona contigua, la plataforma continental y zona económica hacen parte del territorio nacional (Decreto 2324, 1984). Adicionalmente, se reorganiza la dirección general, marítima y portuaria DIMAR (Dirección General Marítima), definiendo la regulación, dirección, coordinación y control de las actividades marítimas (Decreto Ley 2324, 1984), en concordancia con lo dispuesto en el Decreto 5057 de 2009.

En cuanto a las aguas no marítimas, la reglamentación de normas relacionadas con el recurso hídrico en todos sus estados comprende los siguientes aspectos: 1) Dominio de las aguas, cauces, riberas y normas que rigen su aprovechamiento, sujeto al desarrollo humano, social de la comunidad; 2) Reglamentación de aguas, ocupación de los cauces y declaración de reservas de agotamiento; 3) Restricción y limitación al dominio del aprovechamiento de las aguas; 4) Condiciones para la construcción de obras hidráulicas que garanticen la correcta y eficiente utilización del recurso; 5) Manejo y distribución del recurso hídrico; 6) Extinción del

dominio privado de las aguas; 7) Concesiones; 8) Aguas subterráneas, minerales y termales; 9) Reglamento de vertimientos (Decreto 1541,1978).

Pese a la gran cantidad de normas, la legislación ambiental que regula el uso de las aguas en Colombia es demasiado flexible, pues los volúmenes permisibles de contaminación y uso del recurso hídrico son muy altos en comparación a la normatividad que actualmente se desarrolla y rige internacionalmente, en especial para el sector agroindustrial. En contraste con ello, es necesario desarrollar tecnologías y mecanismos agropecuarios que incentiven la participación de las comunidades indígenas y poblaciones campesinas en los territorios con características adecuadas para el desarrollo de actividades agrícolas, ganaderas o pecuarias, que puedan ser sostenibles en el tiempo. Nuestro país requiere crear mecanismos para dignificar a las poblaciones vulnerables que en su mayoría habitan en zonas con alto riesgo de inundación, deslizamientos o desplazamientos; contribuyendo así al cumplimiento de las metas en esta etapa de post-conflicto, y a su vez a los compromisos internacionales en materia ambiental.

CÉSAR AUGUSTO GARCÍA-UBAQUE
Director

The world population has already surpassed the 7000 million inhabitants, and there is also an increasing worry about global climate change. This is the reason why in countries as Somalia, Ethiopia, Israel, Syria, Palestine, among others with low levels of water resources, there is conflict (González, 2005).

Water is an odorless and tasteless liquid; it freezes at 0°C, boils at 100°C, and shows maximum density from 4°C. It is also an ionizing agent, which means that it is a universal solvent, and it works as a catalyst in many chemical reactions (Decree 1541, 1978). Likewise, water is present in the three states of matter: solid, liquid, and gaseous. As examples of solid state, there are the glaciers, polar ice caps, snow, hail and frost. In liquid state, there are the clouds and precipitation, and swamps, lakes, rivers, seas and oceans, covering three quarters of the surface of the Earth. Finally, fog, steam, and atmospheric steam (relative humidity, RH) are examples of water in gaseous form. On the other hand, due to gravity and precipitation, water accumulates below the earth's surface, forming groundwater reservoirs that supply wells and springs.

When analyzing the water resource, it is found that Colombia at the end of the 20th century ranked fourth in the world per-capita availability of water. However, nowadays, Colombia ranks 24 out of 203 countries in the world, according to the United Nations report on the development of water resources in the world (World Water Day 2016, UNESCO). The loss of the fourth post is a major indicator of population growth, and the growth of productive activities that affect the availability of water resources. Additionally, the climate change affects us all because of the lack of ownership of our water, ecosystem and forest resources (Gualdrón, 2011).

Paradoxically, our country has made important developments in environmental legislation since the Stockholm Convention in 1972. The principles established in this Convention were included and applied in the National code of renewable natural resources and protection of the environment, contained in Decree Law 2811 of 1974. In 1991, the new political Constitution of Colombia favors the collective right of protecting the environment through guardianship and compliance actions (CRA, 1997). Later in 1992, there was the United

Nations Conference on Environment and Development, held in Rio de Janeiro, Brazil. Because of this conference, Colombia established the Law 99 of 1993, which formed the National Environmental System (SINA) and created the Ministry of the Environment as its governing body (currently the Ministry of Environment, Housing and Territorial Development); in addition, this law includes renewable natural resources in Colombia (ANLA, 2016).

Regarding hydrological resources, the current regulations in Colombia describe in first place the general characteristics and properties of water both marine and non-marine. Secondly, it identifies maritime waters enshrined in international public law (Article 101 of the Political Constitution of Colombia). Thirdly, it states, "The territory as well as the public goods belonging to it belong to the Nation." Additionally, it is worth mentioning that, while the public domain over marine waters is derived from the Political Constitution, and the international law and treaties, regulations over inland waters are managed by the state through territorial entities (Art. 674, 677 and 678 from the Civil Code of Colombia). However, the State is not the owner of the territory, so it does not own it; it is the Nation that exercises sovereignty over it (UBA, 2010).

Our legislation separates the legal regime of the waters of the sea from those of non-maritime waters. This has generated several documents related to the water resource of the marine waters, proposing the sustainable law of oceanic spaces and coastal zones. This process has contributed to the improvement of the quality of life of nearby populations, the development of productive activities, and the conservation of marine and coastal resources. For this reason, the waters on the mainland are called inland waters; this, the territorial sea, the contiguous zone, the continental shelf and economic zone are part of the national territory (Decree 2324, 1984). According to the Decree 5057 of 2009, the legislations also reorganize the general, maritime and port direction (DIMAR, General Maritime Direction); and it defines the regulation, direction, coordination and control of maritime activities (Decree Law 2324, 1984).

Regarding non-maritime waters, the regulation of standards related to water resources in all its states

includes the following aspects: 1) Dominion of the waters, channels and banks, and norms that govern their use, subject to the human and social development of the community; 2) Water regulation, occupation of riverbanks, and declaration of depletion reserves; 3) Restriction and limitation to the use of water; 4) Conditions for the construction of hydraulic works that guarantee the correct and efficient use of the resource; 5) Management and distribution of the water resource; 6) Extinction of private domain of waters; 7) Concessions; 8) Underground, mineral and thermal waters; and 9) Dumping regulations (Decree 1541, 1978).

Despite the large number of standards, the environmental legislation that regulates the use of water in Colombia is too flexible. The permissible volumes of

pollution and use of the water resource are very high compared to the regulations that are currently developed internationally, especially for the agro industrial sector. In contrast, it is necessary to develop agricultural technologies and mechanisms that encourage the participation of indigenous communities and peasant populations in territories with suitable characteristics for the development of agricultural or livestock activities that may be sustainable over time. Our country needs to create mechanisms to dignify vulnerable populations, who live in areas with high risk of flooding, landslides or displacement. This would contribute to the fulfillment of the goals in this post-conflict stage, and to the international commitments in environmental matters.

CÉSAR AUGUSTO GARCÍA-UBAQUE
Director



Metodología para la selección de atributos y condiciones operativas para la localización de fallas basada en la máquina de soporte vectorial

Methodology for selection of attributes and operating conditions for SVM-Based fault locator's

Debbie Johan Arredondo Arteaga¹, Walter Julián Gil González², Juan José Mora Flórez³

Fecha de recepción: 18 de marzo de 2016

Fecha de aceptación: 23 de noviembre de 2016

Cómo citar: Arredondo A., D.J.; Gil-G., W.J. y Mora F., J.J. (2017). Metodología para la selección de atributos y condiciones operativas para la localización de fallas basada en la máquina de soporte vectorial. *Revista Tecnura*, 21(51), 15-26. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.1.a01

Resumen

Contexto: Las técnicas de localización de fallas se presentan como una alternativa ágil de restauración del servicio eléctrico en las redes de distribución de energía, debido a que los circuitos de distribución son generalmente de gran tamaño y las interrupciones del servicio son comunes. Por tanto, las empresas distribuidoras deben emplear estrategias para cumplir con su servicio oportuno y de alta calidad. Sin embargo, las técnicas de localización son poco robustas y presentan algunas limitaciones en costo computacional y en la descripción matemática de los modelos utilizados.

Método: Este artículo está orientado al análisis de las condiciones adecuadas de ajuste y validación de un localizador de fallas para sistemas de distribución, basado en la máquina de soporte vectorial. Con esto es posible determinar el número mínimo de condiciones operativas que permiten alcanzar un buen desempeño con un bajo esfuerzo computacional.

Resultados: La metodología propuesta se prueba en un circuito de distribución prototipo rural

de Colombia a 34,5 kV, subdividido en 20 zonas, el cual, ante fallas monofásicas y diferentes condiciones de operativas, permite obtener una base de datos de 630.000 registros. Como resultado, se determina que a partir de 200 condiciones operativas adecuadamente seleccionadas, el localizador mostró un desempeño superior al 98 %.

Conclusiones: Es posible mejorar el desempeño de localizadores de fallas basados en la máquina de soporte vectorial (SVM), mediante la selección adecuada de atributos y condiciones operativas, las cuales afectan directamente el rendimiento en términos de desempeño y costo computacional.

Palabras clave: falla monofásica, localizador de fallas, máquina de soporte vectorial.

Abstract

Context: Energy distribution companies must employ strategies to meet their timely and high quality service, and fault-locating techniques represent and agile alternative for restoring the electric service in the power distribution due to the size of distribution

1 Ingeniero electricista, magíster en Ingeniería Eléctrica. Universidad Tecnológica de Pereira (UTP). Pereira, Colombia. Contacto: djarredondo@utp.edu.co

2 Ingeniero electricista, magíster en Ingeniería Eléctrica. Universidad Tecnológica de Pereira (UTP). Pereira, Colombia. Contacto: wjgil@utp.edu.co

3 Ingeniero electricista, doctor en Ingeniería Eléctrica. Docente titular de la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP). Pereira, Colombia. Contacto: jjmora@utp.edu.co

services (generally large) and the usual interruptions in the service. However, these techniques are not robust enough and present some limitations in both computational cost and the mathematical description of the models they use.

Method: This paper performs an analysis based on a Support Vector Machine for the evaluation of the proper conditions to adjust and validate a fault locator for distribution systems; so that it is possible to determine the minimum number of operating conditions that allow to achieve a good performance with a low computational effort.

Results: We tested the proposed methodology in a prototypical distribution circuit, located in a rural area of Colombia. This circuit has a voltage of 34.5

KV and is subdivided in 20 zones. Additionally, the characteristics of the circuit allowed us to obtain a database of 630.000 records of single-phase faults and different operating conditions. As a result, we could determine that the locator showed a performance above 98% with 200 suitable selected operating conditions.

Conclusions: It is possible to improve the performance of fault locators based on Support Vector Machine. Specifically, these improvements are achieved by properly selecting optimal operating conditions and attributes, since they directly affect the performance in terms of efficiency and the computational cost.

Keywords: fault locator, single phase fault, support vector machine.

INTRODUCCIÓN

La continuidad del servicio de energía eléctrica ha sido ampliamente estudiada, ya que es considerada un aspecto importante de la calidad en el nuevo entorno de mercado, y debido a su fuerte impacto sobre el servicio al cliente y la repercusión que tiene sobre los ingresos de las empresas relacionadas con energía eléctrica. Una de las causas más relevantes que afectan la continuidad del servicio son las fallas permanentes, las cuales se caracterizan por requerir de la intervención humana para la restauración del servicio. Para lograr que el tiempo de desconexión de los usuarios sea mínimo, se han propuesto metodologías robustas que determinen la posición de la falla, para reducir así el tiempo total de la indisponibilidad.

Dos de las metodologías más usadas en la localización de fallas son los métodos basados en el modelo (MBM) y los métodos basados en el conocimiento (MBC). Los MBM estiman la distancia desde la subestación a la falla, a partir del modelo matemático en la subestación. Aunque estas metodologías presentan gran velocidad en la estimación, tienen errores debidos a la múltiple estimación del sitio de falla, debido a las

características radiales y altamente ramificadas de los sistemas de distribución, tal como se describe en Flórez y Londoño (2007), y Thukaram, Khincha y Vijaynarasimha (2005). Por otro lado los MBC determinan la localización de la falla con la información que proviene de los registros de tensión y corrientes medidos en la subestación. Esta metodología no tiene el problema de la múltiple estimación, aunque sus altos costos computacionales lo hacen poco deseados.

Los MBC se centran en técnicas que tengan la habilidad de reconocer patrones tal como lo hace la máquina de soporte vectorial (SVM). La SVM pertenece a las técnicas de aprendizaje supervisado, su objetivo principal es extraer el conocimiento de las bases de datos; la aplicación de esta técnica al problema de localización de fallas ha tenido gran éxito (Flórez y Londoño, 2007; Mora-Flórez, Meléndez y Carrillo-Caicedo, 2008; Morales-Espana, Mora-Flórez y Vargas-Torres, 2010). Sin embargo, en las referencias citadas no se consideran la selección adecuada de las condiciones de prueba, como también el número de condiciones operativas para parametrización y entrenamiento, y finalmente no se evalúa el tiempo requerido para la prueba (entrenamiento y validación).

En este artículo se realiza un análisis que permite encontrar las variables que afectan los métodos de localización de fallas basado en máquinas de soporte vectorial, desde la selección de atributos, las constantes de parametrización, el tamaño de la base de datos en función del número de condiciones operativas para el entrenamiento; para así poder determinar un número adecuado en tiempo y condiciones para un sistema de distribución de energía eléctrica.

FUNDAMENTACIÓN

Máquina de soporte vectorial (SVM)

La SVM tienen su origen en la teoría de aprendizaje estadístico la cual, que tiene como característica especial la independencia del conocimiento inicial de la densidad de probabilidad de los datos que se analizan (Moguerza y Muñoz, 2006). Otra ventaja importante de esta técnica de aprendizaje es que solo tiene dos variables de ajuste, la constante de penalización C y el parámetro del kernel. Para un kernel de base radial (RBF) dado por la ecuación (1) (Yao, Hu, Zhang y Jin, 2014).

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

Donde, \vec{x} y \vec{y} corresponden a las entradas de la SVM.

Búsqueda tabú (TS)

Esta estrategia de optimización metaheurística encuentra soluciones factibles a problemas complejos con un coste computacional aceptable en los equipos de cómputo modernos.

Esta técnica considera los registros de búsqueda con una estrategia de memoria, que le permita explorar adecuadamente el espacio de solución (Yao *et al.*, 2014). La lista tabú sirve para modelar la memoria y facilita el seguimiento y exclusión de las soluciones ya evaluadas. Cada paso o ejecución del algoritmo, permite encontrar una solución y la mejor de ellas se incluye en la lista.

METODOLOGÍA

La metodología general utilizada para encontrar las variables que tienen mayor influencia en el desempeño del localizador, se muestran en la figura 1.

En la etapa 1 se adquieren los registros de falla del sistema de potencia y se procesan los datos necesarios para que los MBC tengan un mejor rendimiento. En la etapa 2 se seleccionan los parámetros de la SVM usando la técnica metaheurística de búsqueda tabú. En la etapa 3 se entrena la SVM para que relacione la localización de las fallas con los registros de entrada, mediante la creación de los vectores de soporte. Finalmente, en la etapa 4 se realiza la validación del desempeño del localizador.

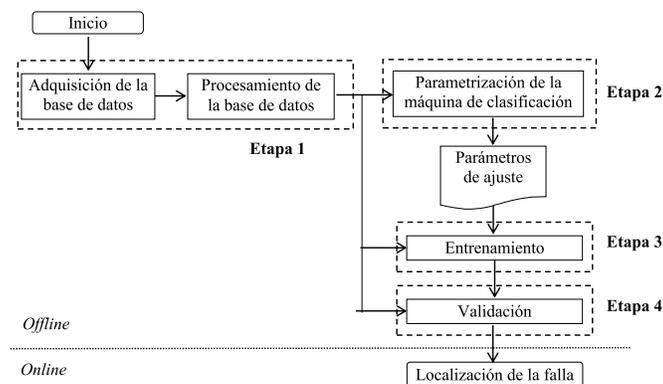


Figura 1. Esquema general del método de clasificación

Fuente: elaboración propia.

Etapa 1

Adquisición de datos

Los registros de falla utilizados se obtienen a partir de la simulación intensiva del sistema de distribución, utilizando una herramienta desarrollada en ATP y MATLAB. Las fallas utilizadas consideran diferentes situaciones operativas, valores diferentes de resistencia de falla y varios tipo de fallas (Hernández, Londoño, & Flórez, 2009).

Zonificación de la red de distribución

Como la SVM es una técnica de aprendizaje supervisado, se requiere que en el entrenamiento se relacionen tanto los datos de falla como la clase a la cual pertenecen. La clase en este caso se define como una de las subdivisiones del sistema de distribución bajo análisis. Una subdivisión o zona se define como un subsistema radial, para reducir el problema de múltiple estimación del sitio en falla (Zapata-Tapasco, Mora-Flórez y Pérez-Londoño, 2014). El tamaño de esta subdivisión puede variar según el criterio del operador del sistema de potencia y las necesidades específicas de cada sistema. La división en zonas que se propone en este artículo se realizó mediante una herramienta automática de zonificación, propuesta por Zapata (2013).

Procesamiento de los datos de entrada

El procesamiento de datos es una etapa de suma importancia en las técnicas de aprendizaje, debido a que los algoritmos de optimización de fondo requieren un tiempo menor de convergencia si los datos son procesados; en la fase de procesamiento se realizan actividades como la extracción de características, normalización, filtrado y selección de los datos (Kotsiantis, Kanellopoulos y Pintelas, 2006).

La selección de los atributos es una de las fases de la etapa de procesamiento, donde se toman las características de las fallas las cuales contienen la mayor cantidad de información posible. Estos atributos son extraídos de los fasores de tensión y corriente medidos en una subestación aguas arriba, esta subestación alimenta el ramal de distribución

bajo falla. En este artículo, los atributos utilizados corresponden a la selección de las mejores combinaciones propuestas por Arredondo, Mora y Román (2014). Además, es necesario relacionar cada falla de acuerdo con la ubicación en la cual ocurrió, a este proceso se le conoce como *asignación de etiquetas* (Zapata-Tapasco et al., 2014).

Ya que es posible encontrar un atributo (o entre ellos) con grandes diferencias de magnitudes asociadas a las fallas (Kotsiantis, Kanellopoulos y Pintelas, 2006), es necesario el proceso de estandarización de la base de datos, en esta investigación fue implementada la técnica de normalización *Min-max*, que ha presentado buen desempeño en el problema de localización de fallas (Zapata-Tapasco, Mora-Flórez y Pérez-Londoño, 2014; Gil, Mora y Pérez, 2014; Morales-Espana, Mora-Flórez y Vargas-Torres, 2010).

Esta técnica es una de las más simples, los valores mínimos y máximos de la base de datos se desplazan a los valores 0 y 1, respectivamente, y todos los datos se transforman en el rango {0,1} (Safadi, Derbas y Quénot, 2015), utilizando la ecuación (2).

$$s'_{ij} = \frac{s_{ij} - \min(s_j)}{\max(s_j) - \min(s_j)} \quad (2)$$

Donde, s'_{ij} es el dato i transformado del conjunto de datos j ; s_{ij} es el dato i original del conjunto de datos j ; $\min(s_j)$ es el valor mínimo del conjunto de datos j ; $\max(s_j)$ es el valor máximo del conjunto de datos j .

Etapa 2

En esta se realiza la selección de los parámetros de penalización y dimensionalidad de la técnica de aprendizaje (C y γ); dicha selección no es un proceso trivial, debido al espacio de selección y los altísimos costos computacionales. Debido a esto, es necesario implementar una técnica metaheurística basada en la exploración del espacio de soluciones, logrando alcanzar puntos de alta calidad.

En este artículo se implementó la técnica llamada *búsqueda tabú*, donde el error de validación cruzada se utiliza como la función objetivo, y así el algoritmo evoluciona hasta encontrar el menor error de validación.

La validación cruzada es el proceso en el cual se exploran los cúmulos de información de la base

de datos, el cual consiste en dividir esta última en partes iguales, para así entrenar la técnica con $n-1$ subconjuntos y validar con el subconjunto restante, así hasta alcanzar los n entrenamientos y validaciones, al final se promedian los errores encontrados y se obtiene un solo error de validación (Zapata-Tapasco, Mora-Flórez y Pérez-Londoño, 2014).

$$\text{Error de validación} = \frac{\text{Número de datos mal clasificados}}{\text{Número de datos de prueba}} \cdot 100\% \quad (3)$$

Etapa 3

En esta etapa se utilizan diferentes condiciones operativas del sistema de potencia, las cuales consideran variación en los parámetros del circuito. Se hicieron pruebas considerando diferentes conjuntos de entrenamiento (variando el número de condiciones operativas), tomando en cuenta tiempo y precisión. El entrenamiento puede determinar el desempeño de la máquina de soporte tanto en tiempo como en error, debido a esto es importante encontrar un número mínimo de condiciones operativas que sean suficientes en el entrenamiento de la SVM y obtener un buen desempeño del clasificador, y así la estimación de zona en falla se reduzca considerablemente en el tiempo de ejecución. Adicionalmente, al trabajar con menos

condiciones operativas se evitan sobreentrenamientos, los cuales no mejoran el desempeño del localizador, pero sí aumentan el tiempo de cómputo de esta metodología (uno de los factores más importantes en el trabajo con MBC es el tiempo de cómputo, tiempos elevados la hacen poco deseable en comparación con metodologías como las MBM).

Etapa 4

Finalmente, esta etapa consiste en evaluar el rendimiento del localizador, que se realiza a partir del cálculo de la precisión del método ante datos no considerados en las etapas de parametrización y entrenamiento. La precisión se calcula como se muestra en la ecuación (4).

$$\text{Precisión} = \frac{\text{Número de datos bien clasificados}}{\text{Número de datos de prueba}} \cdot 100\% \quad (4)$$

RESULTADOS

La metodología propuesta se prueba en un circuito prototipo rural presentado en Osorio (2014), que opera a 34,5 kV. Este circuito fue diseñado con el fin de considerar las características generales de las redes de distribución en Colombia, como se presentan en las zonas rurales de los departamentos de Boyacá y Cundinamarca. Además, presenta cargas industriales y veredas donde su comportamiento es predominantemente inductivo, laterales

trifásicos y múltiples calibres de conductor, las estructuras, normas técnicas y su descripción detallada se describe en Osorio (2014). La zonificación del circuito se obtiene mediante un algoritmo de zonificación automática, el cual está basado en la técnica metaheurística *tabú* y una zonificación inicial hecha por ingenieros que conocen el circuito en detalle. El algoritmo se encuentra descrito en Zapata (2013) (el circuito se divide en 20 zonas), tal como se muestra en la figura 2.

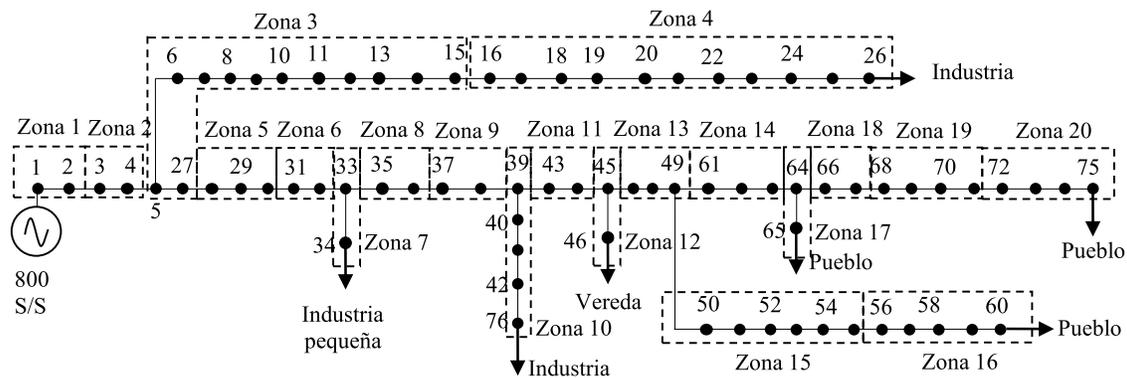


Figura 2. Red 34,5 kV rural

Fuente: elaboración propia.

Los escenarios considerados para probar la metodología solo contienen fallas monofásicas, debido a la alta carga computacional de las pruebas. Además, este tipo de fallas representan aproximadamente un 70 % de las fallas que se presentan en un circuito de distribución (Mora, 2007). Se simulan diferentes resistencias de fallas que varían entre 0,05 Ω hasta 40 Ω en paso de 4 Ω , los cuales son valores comunes en sistemas de distribución (Dagenhart, 2000). Adicionalmente, se simuló 1400 condiciones operativas del sistema de potencia, para tener una representación real del circuito. Para cada condición operativa se simulan fallas en todos los nodos, de donde se obtienen 450 fallas por condición operativa, que conforman una base de datos de 630.000 fallas. Las condiciones operativas se obtienen con la ayuda de la herramienta desarrollada por Alzate-González, Mora-Flórez y Pérez-Londoño (2014). Se utiliza la técnica de muestreo *Latin Hypercube*, la cual explora todo el espacio de soluciones, con lo cual se considera un gran número de condiciones de operación del circuito. La herramienta permite hacer variaciones de los parámetros del circuito como: magnitud y ángulo de la tensión de la fuente, carga promedio, factor de potencia, longitud de la línea y resistividad del terreno. Los rangos de variación considerados para cada parámetro se presentan en la tabla 1, estas variaciones se realizan de acuerdo con los valores nominales del circuito, por ejemplo: si se

tiene un factor de potencia nominal de una carga de 0,9 en atraso, la herramienta puede variar este valor entre 0,88 y 0,92.

Tabla 1. Rangos de la variación de los parámetros del circuito

Parámetros	Rango de incertidumbre	
	Mínimo	Máximo
Magnitud de tensión en la fuente	0,95 p.u	1,10 p.u
Ángulo de tensión en la fuente	-3,4°	3,4°
Carga promedio	10 %	150 %
Factor de potencia	-0,02	0,02
Longitud del conductor	95 %	105 %
Resistividad del terreno	80 Ω m	120 Ω m

Fuente: elaboración propia.

Las variaciones como la magnitud de la tensión en la fuente, el ángulo de la tensión en la fuente, son globales, esto quiere decir que solo se realizan una vez por circuito. El factor de potencia y la longitud de la línea también fueron variaciones globales, es decir, para cada factor de potencia en la carga y cada segmento de línea se realizó el mismo porcentaje de variación. Sin embargo, la magnitud de cada carga del sistema varió de forma individual cada una, con la idea de representar condiciones más severas de las que se presentan en un circuito real.

La combinación de atributos utilizados fue determinada con una búsqueda exhaustiva, como la presentada en Arredondo, Mora y Román (2014). Para este circuito las mejores tres combinaciones se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Mejores combinaciones de atributos

Número de combinación	Atributos
Combinación 1	$dV, dI, d\theta_v$
Combinación 2	$dV, dI, d\theta_i$
Combinación 3	$dV_v, dI_v, d\theta_v, d\theta_i$

Fuente: elaboración propia.

Pruebas a condición nominal en la parametrización

Esta prueba se parametrizó con fallas simuladas a condición nominal del circuito, con un total de 450

fallas. En el entrenamiento y la validación se utilizaron todas las condiciones operativas simuladas.

La etapa de entrenamiento se realizó con diferentes conjuntos de condiciones operativas, utilizando inicialmente 25 e incrementando en cada prueba 25 condiciones operativas hasta 400 (esto se realiza para cada combinación de descriptores utilizada). Además, para determinar el número máximo de condiciones operativas, se tuvo en cuenta que el desempeño del clasificador no aumentará considerablemente y que el costo computacional fuera muy alto.

La etapa de validación se realizó con 1000 condiciones operativas para un total de 450.000 fallas (sin incluir las condiciones operativas ya utilizadas en la parametrización y entrenamiento).

En las figuras 3 y 4 se muestra el desempeño para cada combinación de atributos y el tiempo de entrenamiento para cada número condiciones de operativas que se trabajó, respectivamente.

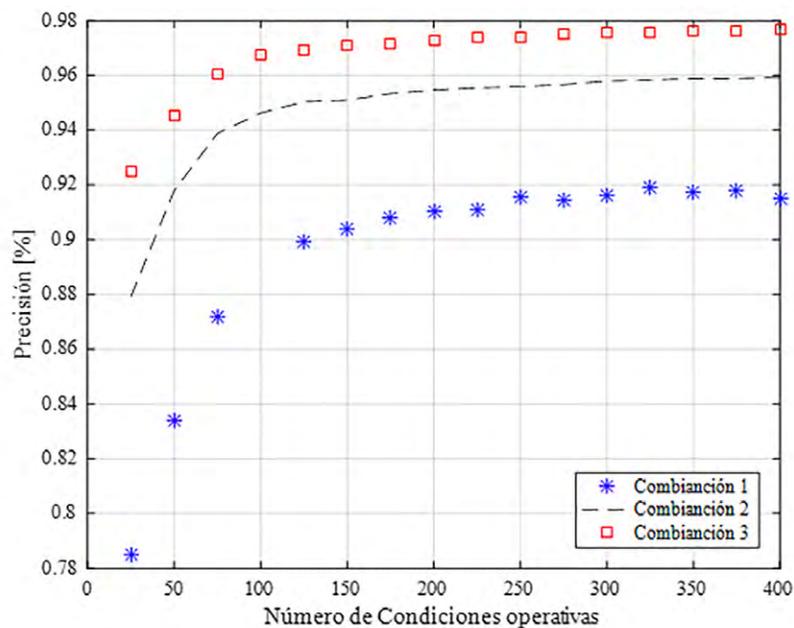


Figura 3. Número de condiciones operativas de entrenamiento vs. desempeño para cada combinación de atributos

Fuente: elaboración propia.

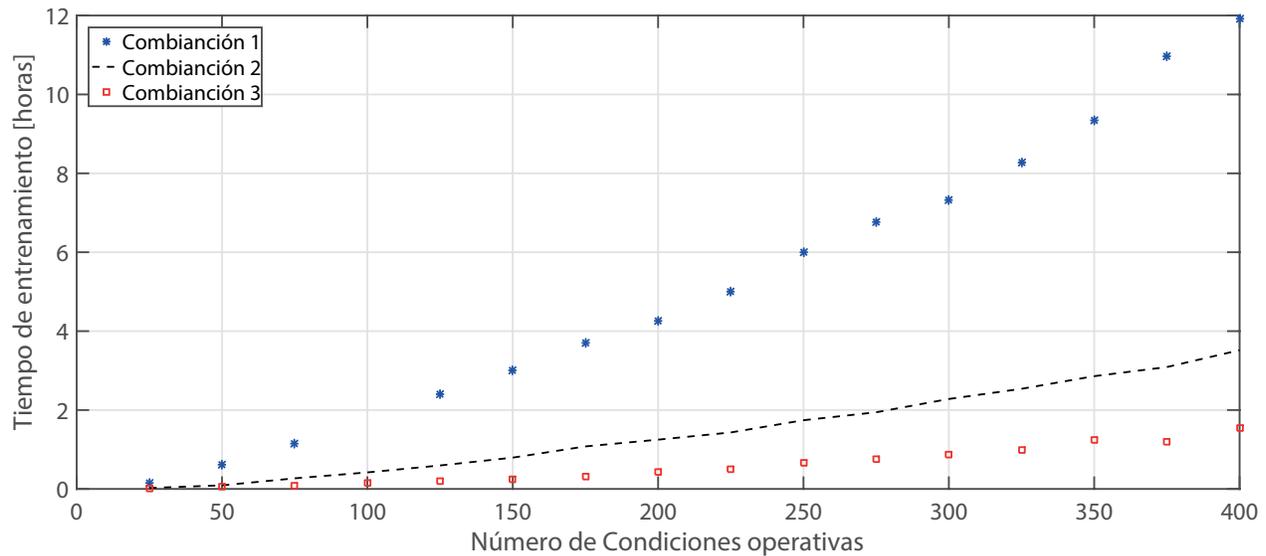


Figura 4. Número de condiciones operativas de entrenamiento vs. tiempo de entrenamiento para cada combinación de atributos

Fuente: elaboración propia.

Se puede observar en las figuras 3 y 4, que la mejor combinación de atributos es la denominada combinación 3, la cual alcanza un mejor desempeño en la validación como en el tiempo de entrenamiento. Además, se puede observar en la figura 3 que alrededor de 200 condiciones operativas el desempeño del localizador no aumenta significativamente, en cambio el tiempo en el entrenamiento crece, lo cual es poco deseable.

Pruebas a diferentes condiciones de operación en la parametrización

En esta prueba se busca determinar el número de condiciones operativas en la parametrización, para lograr un mayor desempeño del localizador tanto en rendimiento como en el tiempo de entrenamiento, la prueba solo se realizó para la combinación 3, debido a que fue la que presentó mejores tiempos y desempeños diferentes en el localizador resultados en la prueba anterior. Esta prueba se realizó aumentando de dos en dos las condiciones

operativas, incluyendo siempre la condición nominal del circuito, hasta que no se observara mejora en el desempeño del localizador. Se notó que a partir de nueve condiciones operativas en la parametrización el localizador no presentó mejoría. El entrenamiento y la validación se realizaron igual que en la prueba anterior.

En la figura 5 se muestran los desempeños para cada número de condiciones operativas en la parametrización (No. cond. parametrización) y en la figura 6 se muestran los tiempos de entrenamiento para cada caso.

Se puede notar en las figuras 5 y 6 que la prueba realizada para las diferentes condiciones de parametrización (1, 3, 5, 7, 9) generan tiempos y desempeños diferentes en el localizador, al usar muchas más condiciones en la parametrización se puede notar que es poco eficiente dado el alto costo computacional y el bajo rendimiento de la máquina. Los mejores desempeños se encuentran con siete condiciones operativas, aunque en tiempo de entrenamiento sea un poco menos

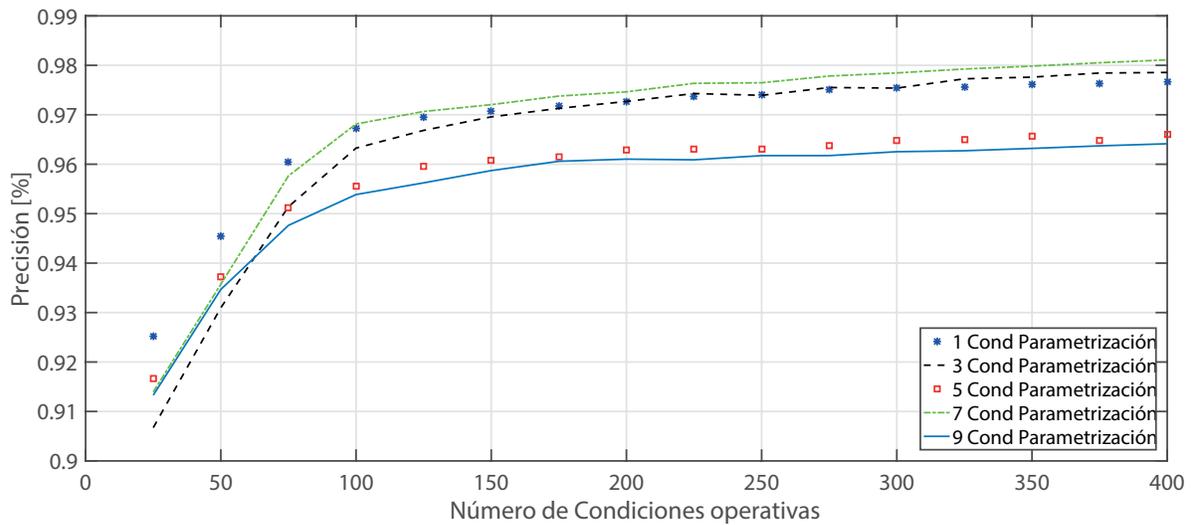


Figura 5. Número de condiciones operativas de entrenamiento vs. desempeño para cada parametrización
Fuente: elaboración propia.

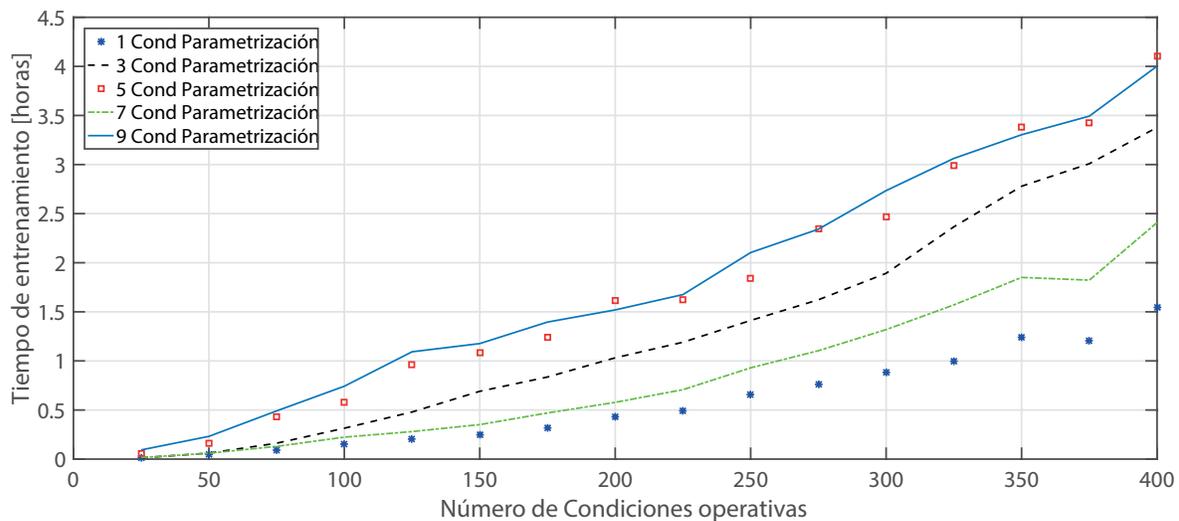


Figura 6. Número de condiciones operativas de entrenamiento vs. tiempo de entrenamiento para cada parametrización
Fuente: elaboración propia.

eficaz que la parametrización con una condición o condición nominal; seleccionar cualquiera de las dos condiciones es una buena elección, aunque es preferible seleccionar la condición nominal dado que contiene menos datos. Se nota que esta prueba no se presentó una tendencia, debido que las pruebas para 1, 3 y 7 condiciones operativas

presentan mejores resultados que en el caso 5 y 9. Estos resultados pueden explicarse debido a que las condiciones que presentan buenos resultados representan mucho mejor el comportamiento del circuito, por tanto, se esperaba que la prueba a condición nominal representará el circuito y sus zonas de falla adecuadamente.

Finalmente, se trata de disminuir el rango de gamma, ya que este parámetro afecta en gran medida el desempeño de la SVM y, por ende, el del localizador. En esta parte se trató de discretizar el rango de gamma en rangos pequeños como se muestra en la tabla 3, y así poder disminuir el tiempo de parametrización y obtener un mejor desempeño con menores esfuerzos computacionales. Esta prueba se realizó solo para la combinación 3 y utilizando siete condiciones operativas en el entrenamiento.

Tabla 3. Rangos de variación de gamma

γ	Rango
1	0-8
2	8-16
3	16-24
4	24-32
5	32-40

Fuente: elaboración propia.

En la figura 7 se muestran los desempeños para cada rango de gamma, y en la figura 8, los tiempos de entrenamiento para cada caso.

Como se puede observar en la figura 7, la variación del parámetro gamma no afecta significativamente el desempeño, en todos los casos el comportamiento de localizador es similar. Sin embargo, los tiempos de entrenamiento sí varían para cada rango de gamma como se puede notar en la figura 8, siendo para los rangos de gamma 4 y 5 los mejores resultados en tiempo de simulación. Esta variación de los tiempos se debe a que, para algunos rangos de γ , la SVM pueda separar mejor los datos y esto se ve reflejado en el tiempo de entrenamiento.

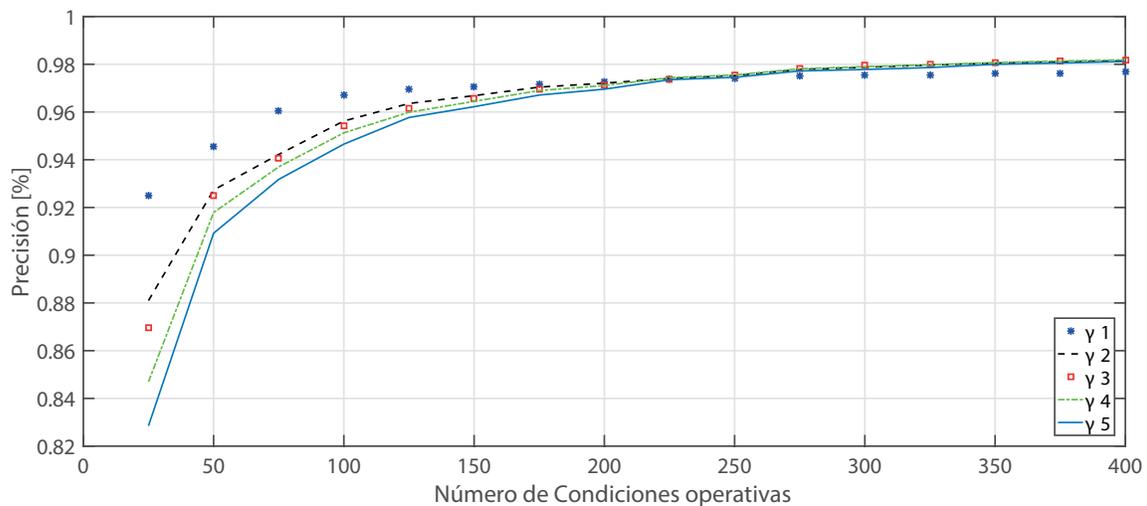


Figura 7. Desempeño de la máquina con respecto a la variación de gamma

Fuente: elaboración propia.

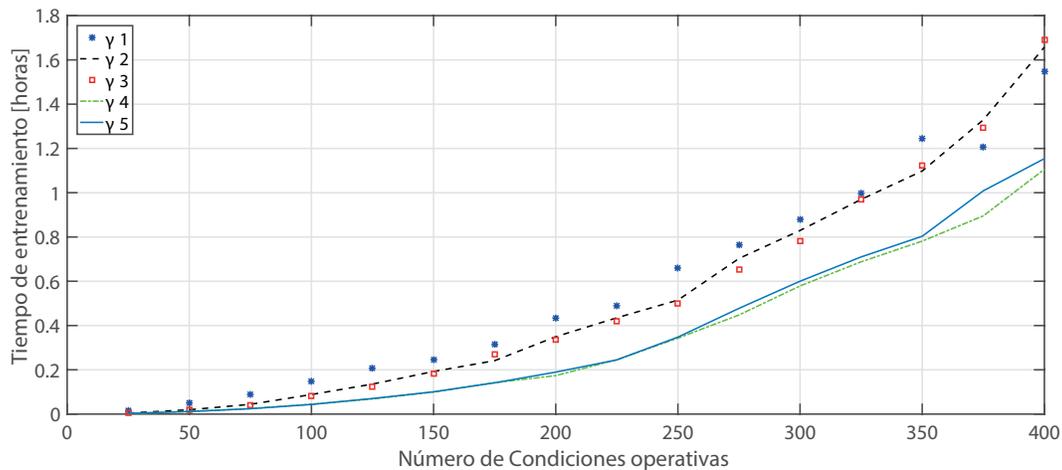


Figura 8. Tiempo de entrenamiento con respecto a la variación de gamma.

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

La selección adecuada de los datos de entrenamiento es un paso muy importante en la SVM, debido a que afecta directamente el rendimiento en cuanto a desempeño y costo computacional. En este artículo se demuestra la influencia del conjunto de datos de entrenamiento para un localizador de fallas basado en SVM, considerando tres combinaciones de atributos, variaciones del rango del parámetro del kernel durante la parametrización y el tamaño de la base de datos para entrenamiento. En general, el localizador presentó un buen desempeño para todas las combinaciones utilizadas; sin embargo, la combinación tres presentó el mejor desempeño con precisiones hasta 98,21 % para todas las pruebas propuestas. Adicionalmente, cuando se considera la combinación tres, se requiere un menor esfuerzo computacional en todas las pruebas.

También, se observa que el número de condiciones operativas en el entrenamiento es el factor que más influye en el desempeño del localizador. Se aprecia que a partir de 200 condiciones operativas el desempeño no varía significativamente, sin embargo, el tiempo computacional crece rápidamente.

Finalmente, se puede notar que el localizador tiene un alto grado de confiabilidad, debido a que las variaciones realizadas al circuito de prueba son exhaustivas con la idea de simular cualquier condición operativa que se pueda presentar en un circuito real. Además, en todos los casos trabajados la base de datos de prueba siempre es mayor que la base de prueba en los entrenamientos (un 60 % más grande en el peor de los casos). Estos buenos desempeños también suceden debido a que la SVM tiene una alta capacidad de generalización, lo que implica que provee buenos resultados ante datos desconocidos, el cual la hace útil en sistemas de distribución reales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alzate-González, N.; Mora-Flórez, J. y Pérez-Londoño, S. (2014). Methodology and software for sensitivity analysis of fault locators. In 2014 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition–Latin America (PEST&D-LA) (pp. 1–6). Medellín: IEEE. <http://doi.org/10.1109/TDC-LA.2014.6955261>
- Arredondo, D.; Mora, J. y Román, L. (2014). Búsqueda exhaustiva de descriptores para mejorar el desempeño de las máquinas de soporte vectorial en localización de fallas. *Energética*, 44, 69–74.

- Recuperado de: <http://www.bdigital.unal.edu.co/46935/1/45314-237156-1-PB.pdf>
- Dagenhart, J. (2000). The 40- Ω ground-fault phenomenon. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 36(1), 30–32. <http://doi.org/10.1109/28.821792>
- Flórez, J.J.M. y Londoño, S.M.P. (2007). Reducción del tamaño de la zona bajo falla para determinar el desempeño de un localizador de fallas basado en vectores de soporte y aplicado a sistemas de distribución. *Revista Tecnura*, 10(20), 78–89.
- Gil, W.J.; Mora, J.J. y Pérez, S.M. (2014). Análisis del procesamiento de los datos de entrada para un localizador de fallas en sistemas de distribución. *Revista Tecnura*, 18(41), 64–75. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.3.a05>
- Hernández, L.P.; Londoño, S.P. y Flórez, J.M. (2009). Diseño de una herramienta eficiente de simulación automática de fallas en sistemas eléctricos de potencia. *Revista DYNA*, 164(164), 178-188. <http://doi.org/0012-7353>
- Kotsiantis, S.B.; Kanellopoulos, D. y Pintelas, P. (2006). Data Preprocessing for Supervised Learning. *International Journal of Computer Science*, 1(2), 111–117. Recuperado de: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.132.5127&rep=rep1&type=pdf>
- Mora-Flórez, J.; Meléndez, J. y Carrillo-Caicedo, G. (2008). Comparison of impedance based fault location methods for power distribution systems. *Electric Power Systems Research*, 78(4), 657–666. <http://doi.org/10.1016/j.epr.2007.05.010>
- Mora Flórez, J.J. (2007). *Localización de faltas en sistemas de distribución de energía eléctrica usando métodos basados en el modelo y métodos basados en el conocimiento*. Tesis doctoral. Girona: Universitat de Girona.
- Morales-Espana, G.; Mora-Florez, J. y Vargas-Torres, H. (2010). Fault location method based on the determination of the minimum fault reactance for uncertainty loaded and unbalanced power distribution systems. In 2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA) (pp. 803–809). IEEE. <http://doi.org/10.1109/TDC-LA.2010.5762977>
- Moguerza, J.M. y Muñoz, A. (2006). Support Vector Machines with Applications. *Statistical Science*, 21(3), 322–336. <http://doi.org/10.1214/088342306000000493>
- Osorio, J. (2014). *Diseño e implementación en ATP de redes de distribución prototipo de media tensión en Colombia para pruebas de localización de fallas*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira. Recuperado de: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/5191/621319O83.pdf?sequence=1>
- Safadi, B.; Derbas, N. y Quénot, G. (2015). Descriptor optimization for multimedia indexing and retrieval. *Multimedia Tools and Applications*, 74(4), 1267–1290. <http://doi.org/10.1007/s11042-014-2071-6>
- Thukaram, D.; Khincha, H.P. y Vijaynarasimha, H.P. (2005). Artificial neural network and support vector machine approach for locating faults in radial distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20(2), 710–721. <http://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.844307>
- Yao, B.; Hu, P.; Zhang, M. y Jin, M. (2014). A support vector machine with the tabu search algorithm for freeway incident detection. *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci*, 24(2), 397–404. <http://doi.org/10.2478/amcs-2014-0030>
- Zapata, A. (2013). *Implementación y comparación de técnicas de localización de fallas en sistemas de distribución basadas en minería de datos*. Pererira: Universidad Tecnológica de Pereira. Recuperado de: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/3821/621319Z35.pdf?sequence=1>
- Zapata-Tapasco, A.; Mora-Flórez, J. y Pérez-Londoño, S. (2014). Metodología híbrida basada en el regresor knn y el clasificador *boosting* para localizar fallas en sistemas de distribución. *Ingeniería y Competitividad*, 177(2), 165–177.





Despacho económico en sistemas de potencia considerando estabilidad transitoria

Economic dispatch in power systems considering transient stability

Diego Alejandro Díaz Tamayo¹, Alejandro Garcés Ruiz², Diego González Ocampo³

Fecha de recepción: 8 de marzo de 2016

Fecha de aceptación: 23 de noviembre de 2016

Cómo citar: Díaz T., D.A.; Garcés R., A. y González O., D. (2017). Despacho económico en sistemas de potencia considerando estabilidad transitoria. *Revista Tecnura*, 21(51), 27-41. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.1.a02

Resumen

Contexto: El despacho económico es una metodología clásica en los sistemas de potencia que generalmente se estudia en estado estacionario; no obstante, se trata de un sistema dinámico.

Método: En este artículo se abordó una metodología que presenta el problema incorporando restricciones de estabilidad transitoria. El modelo matemático incluye ecuaciones diferenciales que describen la evolución temporal de todos los generadores síncronos del sistema frente a un conjunto predefinido de contingencias. Dada la complejidad del problema se usó el algoritmo de Particle Swarm Optimization (PSO) para integrar todos los elementos considerados en el modelo.

Resultados: Se demostró una rápida convergencia y soluciones de buena calidad. La metodología propuesta fue evaluada en el sistema IEEE de 39 nodos de Nueva Inglaterra.

Conclusiones: Los resultados indican una reducción en el costo de operación, además de garantizar la estabilidad transitoria. El tiempo de cómputo es adecuado para ser implementado en sistemas reales.

Palabras clave: despacho económico, estabilidad, estabilidad transitoria, optimización, optimización por enjambre de partículas.

Abstract

Context: Economic dispatch is classic methodology in power systems which is studied in stationary state despite being a dynamical problem.

Method: This paper presents a methodology that considers this problem by including transient stability constraints. The mathematical model includes a set of ordinary differential equations which describes the dynamics of the systems after a failure. Due to the high complexity of the problem, we used an algorithm of Particle Swarm Optimization (PSO) to consider all the elements of the proposed model.

Results: The algorithm has proved to be fast and generated good quality solutions. The proposed methodology was evaluated in the IEEE 39 node system of New England.

Conclusions: The results demonstrated a reduction in the operative costs with a guaranteed stability index. Additionally, the computational time is low enough for the method to be implemented in real power systems.

Keywords: economic dispatch, optimization, particle swarm optimization, stability, transient stability.

1 Ingeniero Electricista, estudiante de la Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia. Contacto: dialdiaz@utp.edu.co

2 Ingeniero Electricista, magíster en Ingeniería Eléctrica, doctor en Ingeniería Electrónica. Profesor de la Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia. Contacto: alejandrogarcés@utp.edu.co

3 Ingeniero Electricista, magíster en Ingeniería Eléctrica. Profesor de la Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia. Contacto: diegogo@utp.edu.co

INTRODUCCIÓN

Motivación

El despacho económico (DE) ha sido un área de investigación activa desde que se empezaron a operar los sistemas de potencia. El problema de DE tiene como objetivo lograr operar estos sistemas, de forma que se garantice mínimo costo, al igual que altos estándares de seguridad y confiabilidad. Por otra parte, el estudio de la estabilidad transitoria es una de las principales preocupaciones a la hora de operar los sistemas de potencia, ya que es necesario saber cómo se comporta ante perturbaciones severas y si es capaz de recuperar una estabilidad de operación.

En consecuencia, existe una necesidad de desarrollar modelos de DE que incorporen restricciones de seguridad y de estabilidad transitoria, con el fin de garantizar la continuidad en el servicio de energía eléctrica a los usuarios finales. Un método de despacho económico con restricciones de estabilidad transitoria (DE-RET) supone un modelo de optimización no lineal que además tenga en cuenta las restricciones en forma de ecuaciones diferenciales no lineales. Estas últimas se pueden modelar como simulaciones en el dominio del tiempo las cuales son exigentes computacionalmente. Otra dificultad inherente al problema es el desarrollo de una métrica que permita cuantificar la estabilidad del sistema, ya que un sistema es estable o inestable. Estas características particulares hacen necesario el uso técnicas metaheurísticas, a pesar de que el problema, en principio, es continuo.

Antecedentes

Actualmente la expansión e implementación de nuevas tecnologías en los sistemas de potencia crea un gran reto de operar el sistema de tal forma que el uso del DE sujeto a múltiples tipos de restricciones se hace cada vez más necesario debido al gran crecimiento de los sistemas eléctricos; por tanto, existe

la necesidad de desarrollar modelos de DE que incorporen diversas restricciones de seguridad para garantizar un nivel de confiabilidad adecuado.

Por otro lado, para estudiar la estabilidad transitoria en función de una perturbación severa en el sistema se requiere de simulaciones en el dominio del tiempo que generalmente son complicadas. Incorporar las restricciones de estabilidad transitoria dentro de un modelo de DE plantea un desafío de la simulación en el tiempo y un modelo de optimización no lineal (R. Zarate-Minano, Van Cutsem, Milano y Conejo, 2010).

Dos aspectos principales se han planteado en los modelos del DE-RET: el primero es cómo incluir las restricciones de estabilidad transitoria en el problema del DE y el flujo de potencia óptimo; el segundo es cómo abordar la evaluación de la estabilidad transitoria (Zarate-Minano *et al.*, 2010).

La estabilidad transitoria puede ser evaluada mediante la simulación en el dominio del tiempo teniendo en cuenta el modelo dinámico del sistema. Así se puede comprobar que las desviaciones angulares del rotor de la máquina se encuentren en un rango específico de valores (Zarate-Minano, *et al.*, 2010). Ahora bien, la inclusión de restricciones de estabilidad transitoria en un DE resulta ser un problema de optimización no lineal difícil de solucionar. En Fang *et al.* (2007) la evaluación de la estabilidad transitoria se resuelve y los resultados se utilizan para determinar el límite en la generación de potencia de un grupo de máquinas críticas en el problema despacho económico. En la actualidad, una de las herramientas disponibles más comunes para solucionar este tipo de problemas de optimización es MINOS (Murtagh *et al.*, 2002).

Alternativamente existen pocos procedimientos heurísticos para resolver problemas similares. Una de las técnicas más utilizadas en problemas continuos es la metodología de PSO, como se plantea en Mo, Zou, Chan y Pong (2007) y Xia, Chan, Bai y Guo (2015). Sin embargo, se encontraron muy pocos trabajos referentes al despacho económico considerando restricciones de estabilidad transitoria utilizando PSO.

Características del modelo

La formulación matemática del DE-RET puede entenderse como un modelo de optimización donde se tiene una función objetivo sujeta a restricciones de igualdad, desigualdad y ecuaciones diferenciales.

Un enfoque común para la solución del problema de optimización con restricciones es el uso de una función de penalización (Mo *et al.*, 2007). El problema general se transforma a uno sin restricciones, penalizando la violación de algún límite establecido obteniendo como resultado una única función objetivo, que se minimiza mediante un algoritmo de optimización sin restricciones.

En este caso se propone un modelo en cual la estabilidad es evaluada mediante una simulación transitoria desarrollada en un conjunto de contingencias determinadas previamente. El modelo propuesto fue optimizado mediante el algoritmo de optimización heurístico PSO que se desarrolló en *Matlab*. La función objetivo planteada para el DE-RET tiene como variables de salida el costo total de la generación y las potencias de salida de cada generador, de forma que garantizan la estabilidad transitoria ante una serie de contingencias. Como datos de entrada en la función objetivo se tiene toda la información del sistema de potencia (líneas de transmisión, cargas, datos de los generadores que son necesarios para el estudio de estabilidad transitoria), además se le debe proporcionar la información del fallo que se simulará, el instante en el que ocurre y el tiempo en el que se aclara.

METODOLOGÍA

Formulación DE clásico

El problema de DE se puede formular como se muestra en la ecuación (1).

$$\begin{aligned} \min f(x) & \quad (1) \\ \text{sujeto a: } G(x) &= 0 \\ H(x) &\leq x \end{aligned}$$

Donde: x es el vector que contiene las variables de estado y las variables de control, $f(\cdot)$ es la función objetivo, $G(\cdot)$ son las restricciones de igualdad, $H(\cdot)$ son las restricciones de desigualdad. En este caso, la función objetivo representa el costo total de la generación. Las restricciones de igualdad son, por lo general, las de flujo de potencia para una condición de funcionamiento específico. Las restricciones de desigualdad representan los límites de las variables de control y los límites de funcionamiento del sistema.

Función objetivo

La función objetivo es una función cuadrática, como muestra la ecuación (2), propuesta para despacho de plantas térmicas (Kothari, 2006), puesto que el sistema de prueba es puramente térmico.

$$Fg = \sum_{i=1}^N a_i \times P_{Gi}^2 + b_i \times P_{Gi} + c_i \quad (2)$$

Donde: P_{Gi} potencia activa del i -ésimo generador, N es el número total de generadores y a_i b_i c_i son coeficientes de costo del i -ésimo generador.

Restricciones del DE-RET

El DE-RET puede ser considerado matemáticamente como un despacho económico convencional con restricciones de desigualdad adicionales impuestas ya sea por límites del ángulo del rotor o por la velocidad angular del mismo. La solución del flujo de potencia que no solo debe cumplir con las restricciones de estado estable impuestas por el problema de DE convencional, sino también las restricciones dinámicas impuestas por la velocidad angular del rotor durante el periodo transitorio en estudio para un conjunto dado de contingencias. Es importante resaltar que para este trabajo la métrica utilizada que define el criterio de estabilidad transitoria es la velocidad angular en comparación con lo propuesto en Zarate-Minano *et al.* (2010) y Mo *et al.* (2007) que es el ángulo del rotor.

Restricciones de igualdad

La ecuación (3) pertenece al balance del flujo de potencia y forma parte de las restricciones de igualdad.

$$P_{Gi} - P_{Di} - P_{PL} = 0 \quad (3)$$

Donde: P_{Gi} es la potencia generada en el i-ésimo nodo PV, P_{Di} es la potencia demanda en el i-ésimo nodo de carga PQ, y P_{PL} es la potencia de pérdidas en las líneas de transmisión. El término P_{PL} de la ecuación (3) se define como se muestra en la ecuación (4) (Kothari, 2006; Garcés-Ruiz, Correa y Bolaños, 2015).

$$V_i \times \sum_{j \in N_i} V_j \times (G_{ij} \times \cos \theta_{ij} - B_{ij} \times \sin \theta_{ij}) \quad i = 1, \dots, N_B \quad (4)$$

Donde N_B es el número total de nodos.

Restricciones de desigualdad

Las restricciones de desigualdad están dadas por los límites máximos y mínimos de generación de potencia activa, como se muestra en la ecuación (5).

$$P_{Gi\text{mín}} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi\text{máx}} \quad i = 1, \dots, N_G \quad (5)$$

Donde N_G es el número total de generadores.

Restricciones de estabilidad transitoria

Las máquinas síncronas son las responsables de generar gran parte de la energía eléctrica absorbida en la red. Así que su respuesta dinámica es determinante para la estabilidad del sistema después de una perturbación, el problema de estabilidad transitoria está descrito por un conjunto de ecuaciones algebraico-diferenciales. La ecuación (6) muestra el modelo de segundo orden de la máquina síncrona, para el i-ésimo generador del sistema (Kundur, Balu y Lauby, 1994; Grainger, Stevenson y Sousa, 1996).

$$M_i \dot{\omega}_i = \omega_0 (P_{mi} - P_{ei} - D_i \omega_i) \quad i = 1, 2, \dots, N_G \quad (6)$$

$$\dot{\delta}_i = \omega_i - \omega_0$$

Donde:

- δ_i es el ángulo del rotor del i-ésimo generador.
- ω_i es la velocidad angular del i-ésimo generador.
- D_i coeficiente de amortiguamiento del i-ésimo generador.
- P_{mi} potencia mecánica del i-ésimo generador.
- P_{ei} potencia eléctrica del i-ésimo generador.
- ω_0 velocidad síncrona.

En este trabajo para simplificar el criterio de estabilidad transitoria en términos de la velocidad angular del rotor ω y, por tanto, la restricción de desigualdad se formula como se muestra en la ecuación (7).

$$\omega \leq \omega_{referencia} \quad (7)$$

Donde: $\omega_{referencia}$ fue un valor heurístico tomado como 1,5708 (rad/s) y ω_{medida} es la diferencia (ecuación (8)) entre la velocidad angular máxima ($\omega_{máxima}$) y la velocidad angular mínima ($\omega_{mínima}$) durante el posfallo del conjunto de generadores síncronos que conforman el sistema de potencia.

$$\omega_{medida} = |\omega_{máxima} - \omega_{mínima}| \quad (8)$$

Para mejor comprensión del criterio de restricciones de estabilidad transitoria propuesta en este modelo, en la figura 1 se muestra el comportamiento del modelo dinámico del sistema en un estado inestable según la métrica planteada. Es evidente que la diferencia de velocidades angulares, $\omega_{máxima}$ y $\omega_{mínima}$, durante el posfallo es mayor 1,5708 (rad/s), violando el límite establecido, de ahí que el sistema se considera en un estado inestable.

Ahora bien, en la figura 2 se muestra el comportamiento del modelo dinámico del sistema en un estado estable para la métrica planteada. Se puede observar que la diferencia de velocidades angulares, $\omega_{máxima}$ y $\omega_{mínima}$ durante el posfallo es igual a cero (0), manteniéndose dentro del rango establecido (1,5708 (rad/s)), de modo que se cumpla el criterio de estabilidad transitoria. El algoritmo

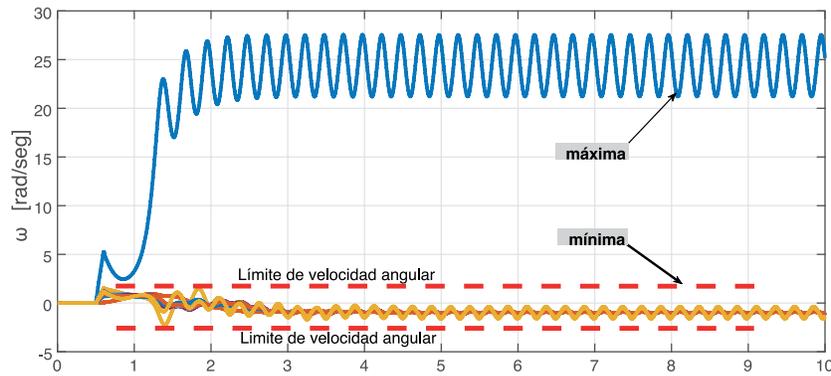


Figura 1. Dinámica del sistema en estado inestable

Fuente: elaboración propia.

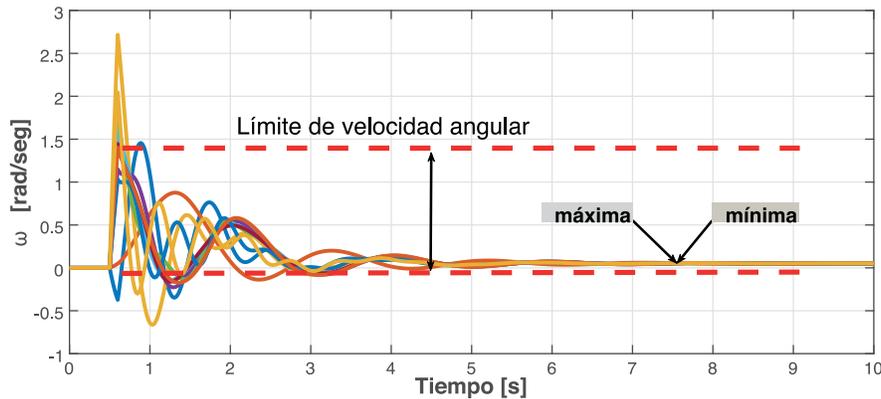


Figura 2. Dinámica del sistema en estado estable

Fuente: elaboración propia.

propuesto siempre asegurará que el sistema cumpla con la métrica de estabilidad propuesta.

Planteamiento del problema del DE-RET

Teniendo la función objetivo de la ecuación (2) y agregando las restricciones de las ecuaciones (3) y (7), el problema del DE con restricciones de estabilidad transitoria puede ser formulado matemáticamente como la ecuación (9).

$$\begin{aligned} &\text{mín } f(x, u) \\ &\text{sujeto a } G_i(x, u) = 0 \quad i = 1, 2, 3, \dots, \\ &N_{eq} H_i(x, u) \leq 0 \quad i = 1, 2, 3, \dots, N_{eq} \end{aligned} \quad (9)$$

Función de evaluación

Como se mencionó anteriormente, la solución del problema de optimización con restricciones es el uso de una función de penalización, el problema general se transforma a uno sin restricciones, penalizando la violación de algún límite establecido, obteniendo como resultado una única función objetivo. La función objetivo resultante para el DE-RET se muestra en la ecuación (10).

$$\text{mín } F(x, u) = f(x, u) + \beta \times h(x, u) \quad (10)$$

Dado que la restricción de igualdad (ecuación (3)) se impone explícitamente por el cálculo del

flujo de potencia, se elimina de la función objetivo. Por otro lado, la restricción de desigualdad de estabilidad transitoria (ecuación (7)) se le suma a la función objetivo acompañado de un factor de penalización β que fue escogido heurísticamente, buscando un valor representativo que significara un aumento considerable para la función objetivo si violaba el límite establecido por la restricción y presentara inestabilidad transitoria.

Implementación de la metodología

La metodología propuesta supone tres componentes: primero, un algoritmo de optimización PSO que propone las potencias inyectadas por los generadores y, al final de las iteraciones, entrega la solución más óptima; segundo, un flujo de potencia (Newton Raphson) que se ejecuta con las potencias propuestas por el PSO cumpliendo con el balance de potencias; tercero, un algoritmo que evalúa la estabilidad transitoria con los mismos datos del flujo de potencia, dicha estabilidad se evalúa utilizando el modelo de segundo orden de la

máquina síncrona, ante diferentes contingencias en el sistema de prueba; finalmente, con los datos obtenidos en los pasos anteriores, se procede a la evaluación de la función objetivo obteniendo el mínimo costo en el despacho y asegurando la estabilidad transitoria. Un panorama general de la implementación de la metodología puede ser observado en la figura 3.

USO DEL PSO

Algoritmo PSO

La optimización por enjambre de partículas o PSO es un modelo de optimización para resolver problemas no lineales, inspirado en modelos de conductas sociales, como el movimiento descrito por las bandadas de aves o bancos de peces, desarrollado por los investigadores Kennedy y Eberhart, en 1995 (Zhu, 2009; Yang, 2010; Burke y Kendall, 2005). PSO es denominado como un modelo de optimización metaheurístico, puesto que asume pocas o ninguna hipótesis alrededor del problema a optimizar y puede aplicarse en amplios espacios

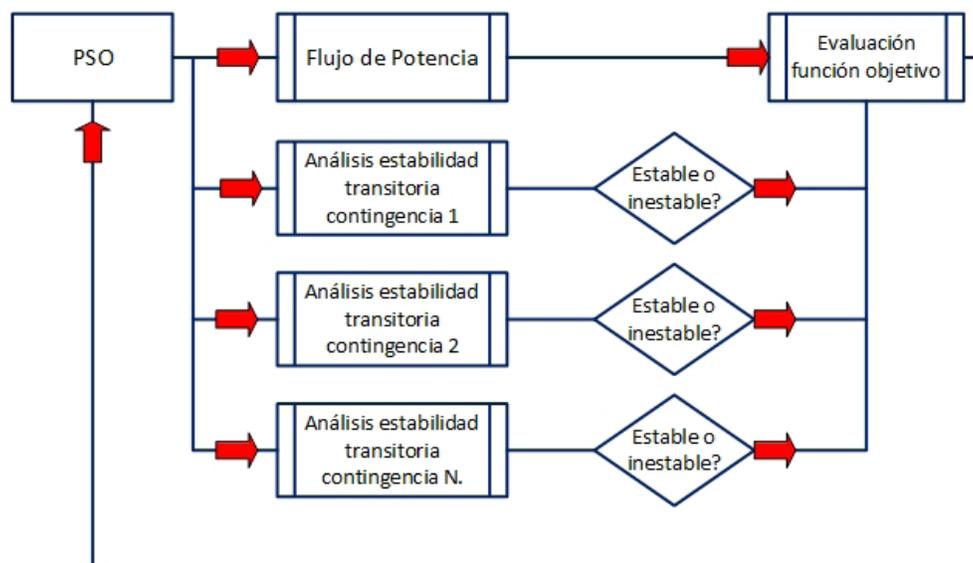


Figura 3. Implementación de la metodología

Fuente: elaboración propia

de soluciones candidatas. La optimización por enjambre de partículas consiste en una población de individuos o partículas, estos identifican diferentes posiciones al interior del espacio de búsqueda y tienen, además, una velocidad por medio de la cual actualizan sus posiciones. Referente a la optimización, dentro del espacio de búsqueda cada posición tiene asociado un valor numérico que es cuantificado mediante la función objetivo, de tal forma que el óptimo de la función se encuentra en la posición en la que tome el valor mínimo o máximo, según lo que se desee.

En el algoritmo convencional de PSO, cada partícula se mueve con una velocidad dentro del espacio de solución y retiene en su memoria la mejor posición que encontró. En PSO un número de partículas forman un enjambre que vuela en todo el hiperespacio del problema para buscar una solución óptima. Las coordenadas de cada partícula representan una posible solución con dos vectores asociados a ella, la posición X y la velocidad V . Durante su búsqueda, las partículas interactúan entre sí de una manera determinada para optimizar su experiencia de búsqueda. En cada iteración, cada partícula guarda la mejor posición P_{best} obtenida en su recorrido y a su vez guarda la mejor posición obtenida por el líder del cúmulo G_{best} (Zhu, 2009). Conceptualmente, P_{best} representa la memoria autobiográfica, a través de la cual cada partícula recuerda sus antiguas experiencias (Gallejo, Escobar, Toro y Romero, 2010). La velocidad y la posición de cada partícula se pueden calcular utilizando las ecuaciones (11) y (12)

Dónde: v_i y x_i es la velocidad y posición actual de la iteración i -ésima; ω es el factor de inercia y se propone como se la ecuación (13).

$$\omega^t = \omega_{m\acute{a}x} - \frac{\omega_{m\acute{a}x} - \omega_{m\acute{i}n}}{t_{m\acute{a}x}} \times t \quad (13)$$

Dónde: t_{max} es el máximo número de iteraciones, t es el número actual de la iteración, ω_{max} y ω_{min} son los límites superiores e inferiores del factor de inercia. Los valores típicos de ω están entre 0 y 1 (Burke y Kendall, 2005); para este trabajo, los valores de las ω fueron de 0,4 y 0,9, respectivamente. Este factor permite controlar el balance entre la diversificación y la intensificación de la búsqueda en el espacio de soluciones y divide el cúmulo de partículas en individuos exploradores y colonizadores. Un valor grande de ω produce partículas exploradoras, es decir, durante el proceso iterativo explora en gran parte el espacio de soluciones. Un valor pequeño de ω produce individuos colonizadores, es decir, enfocan su búsqueda en una región específica.

C_1 y C_2 son las constantes de aceleración que direccionan las partículas hacia una mejor posición local o global. La constante C_1 regula la influencia que tiene la mejor posición alcanzada por la partícula para la determinación de su nueva dirección. C_2 regula la influencia del líder del cúmulo en la dirección de búsqueda de cada partícula. Se propone que estas constantes de aceleración se modifiquen de manera adaptativa. De acuerdo con esto, estas constantes se determinan en concordancia con la ecuación (14).

$$v_i(t + 1) = \omega \times v_i(t) + C_1 \times rand \times (P_{best} - x_i(t)) + C_2 \times rand \times (G_{best} - x_i(t)) \quad (11)$$

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + v_i(t + 1) \quad (12)$$

$$C_1 = \frac{C_{1\min} + C_{1\max}}{t_{\max}} \times t + C_{1\max} \quad (14)$$

$$C_2 = \frac{C_{2\min} + C_{2\max}}{t_{\max}} \times t + C_{2\max}$$

$rand()$ son dos números aleatorios generados por separado, uniformemente distribuidos en el intervalo 0 y 1 que añaden la naturaleza estocástica al modelo.

RESULTADOS

Casos de estudio

El algoritmo fue implementado en el sistema de prueba IEEE39 nodos de Nueva Inglaterra, el cual cuenta con 10 generadores, 46 líneas de transmisión, una carga de 61,2450 p.u de potencia activa y 15,9336 en p.u de potencia reactiva ($S_{\text{base}}=100\text{MVA}$). En dicho algoritmo se buscaba obtener el mínimo costo del despacho económico garantizando la estabilidad transitoria mediante el análisis de las soluciones obtenidas y representadas en las gráficas de convergencia, verificar el comportamiento de las variables de estado del generador en el dominio del tiempo y el ajuste de los parámetros del modelo de optimización PSO. El tiempo de simulación para el análisis de estabilidad transitoria para cada iteración fue de 0 a 10 segundos, rango que es adecuado para revelar si se produce dicha inestabilidad.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la optimización del despacho económico, considerando restricciones de estabilidad transitoria propuesto, desarrollado en el *software Matlab* y ejecutado en un computador portátil Intel(R) Core(TM)2 Duo 2.10GHz, 4,00 GB de memoria RAM. Los datos del sistema de prueba IEEE 39 nodos de Nueva Inglaterra se encuentran en Padiyar, 2008). Adicionalmente, los parámetros de ajuste del algoritmo de optimización PSO se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros PSO

Parámetros	Valor
Número de partículas	20
Iteraciones	200
Factor de inercia	$\omega_{\min} = 0,4$ $\omega_{\max} = 0,9$
Constantes de aceleración	$C_{\min} = 0,9$ $C_{\max} = 1$

Fuente: elaboración propia.

Para cada caso de estudio se realizó una contingencia en una línea de transmisión, en un periodo de 10 segundos para el análisis de estabilidad transitoria, donde el fallo ocurría a los 0,5 segundos y cuyo libramiento se lleva a cabo en el segundo 0,6. Cabe señalar que se utilizó en el modelo de la máquina síncrona un coeficiente de amortiguamiento (*damping*) de 0,5.

Para el caso 1 en particular, se mostrarán las gráficas de la velocidad angular (ω), ángulo (δ) y velocidad angular respecto al centro de inercia (Ω_{CO}), además, las gráficas de potencia mecánica y eléctrica cuando el sistema se encontraba en una condición estable e inestable. Para los demás casos, por simplicidad, se mostrará la solución óptima en una muestra de 10 despachos, enseñando las potencias inyectadas por cada generador, las pérdidas, el costo, el tiempo computacional y la gráfica de convergencia.

Caso base

Inicialmente se realizó una simulación del DE convencional dejando a un lado el análisis y las restricciones de estabilidad transitoria con el objetivo de probar el modelo de optimización PSO planteado y corroborar el correcto funcionamiento de este.

En la tabla 2 se muestra el mejor resultado obtenido de 10 ensayos, donde se tienen las potencias inyectadas por los diez generadores en p.u, las pérdidas en p.u, el costo total del despacho en dólares (US\$) y el tiempo computacional en segundos (s). Para el caso base, el costo total de la generación fue de $4,5005 \times 10^9$ US\$. En la figura 4 se muestra la gráfica de convergencia de dicho

despacho; en el eje vertical, el costo de la generación y en el eje horizontal las iteraciones.

Tabla 2. Convergencia caso base

P.G [p.u]	Caso base
Pg1	4,9210
Pg2	11,0465
Pg3	2,5982
Pg4	3,1660
Pg5	6,8678
Pg6	4,3042
Pg7	5,5200
Pg8	6,9950
Pg9	8,0373
Pg10	8,3077
Pérdidas [p.u]	0,5185
Costo [U\$]	4,5005x10 ⁹
Tiempo [s]	52,3343

Fuente: elaboración propia.

Caso 1. Fallo en la línea que conecta los nodos 12 y 11

Para el algoritmo planteado, en cada iteración se obtenían 20 posibles soluciones debido a que en los parámetros de ajuste del modelo de optimización se tenía una población de 20 partículas. Entre esas posibles soluciones, se contaba con partículas que hacían el sistema estable e inestable. En las figuras 5, 6 y 7 se muestra la evolución de la velocidad angular ω , el ángulo δ_{COI} y la velocidad angular Ω_{COI} , las potencias mecánica y eléctrica de cada uno de los generadores en la primera iteración de una partícula estable.

Como se puede observar, las variables de estado después de ser sometidas a la contingencia regresaron a un punto de operación estable, garantizando mantener el sincronismo de los generadores del sistema.



Figura 4. Gráfica de convergencia caso base

Fuente: elaboración propia.

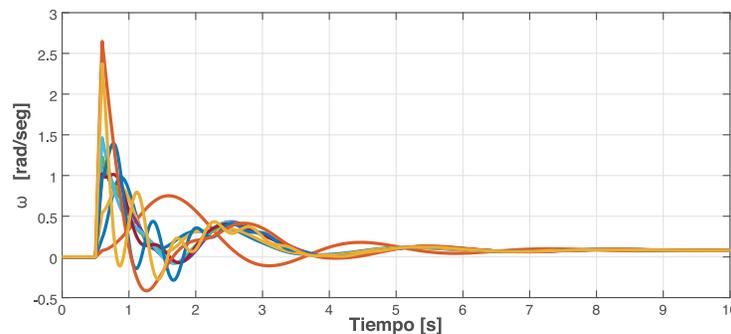


Figura 5. Gráfica de ω partícula estable. Primera iteración

Fuente: elaboración propia.

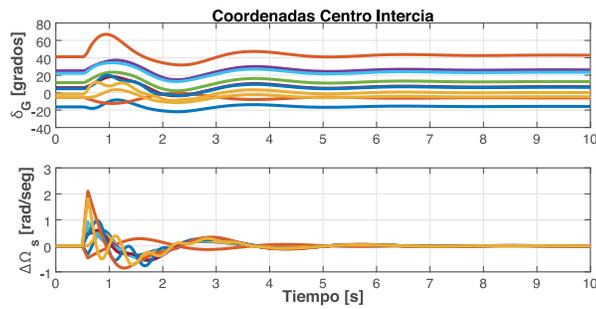


Figura 6. Gráfica de δ_{COI} y Ω_{COI} partícula estable. Iteración 1

Fuente: elaboración propia.

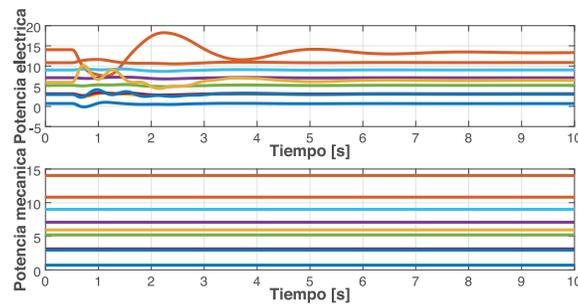


Figura 7. Gráfica potencia eléctrica y mecánica partícula estable. Iteración 1

Fuente: elaboración propia.

Por el contrario, en las figuras 8, 9 y 10 se muestra el comportamiento de las variables de estado de una partícula inestable en la primera iteración. Es evidente que los 10 generadores se aceleraron y se mantuvieron en estado transitorio, asimismo sus ángulos δ_{COI} y velocidades Ω_{COI} tienden a infinito, además, la potencia eléctrica es oscilante, lo que hace que los generadores pierdan el sincronismo. Por otro lado, la

potencia mecánica se mantiene constante como característica del modelo propuesto.

Cabe aclarar que el modelo de optimización, con el paso de las iteraciones, descartaba las partículas que fueran inestables, es decir, la solución final aseguraba la estabilidad transitoria de todas las partículas. En la figura 11 se muestra, para el caso de estudio, el número de partículas inestables

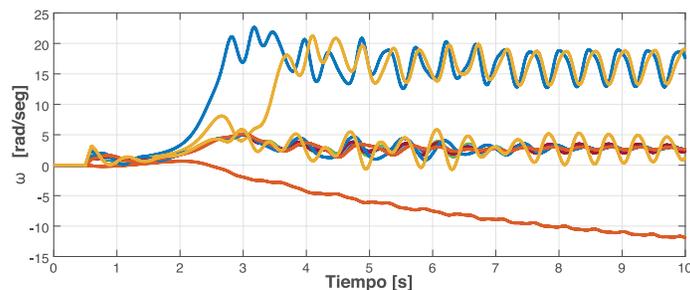


Figura 8. Gráfica de ω partícula inestable. Iteración 1

Fuente: elaboración propia.

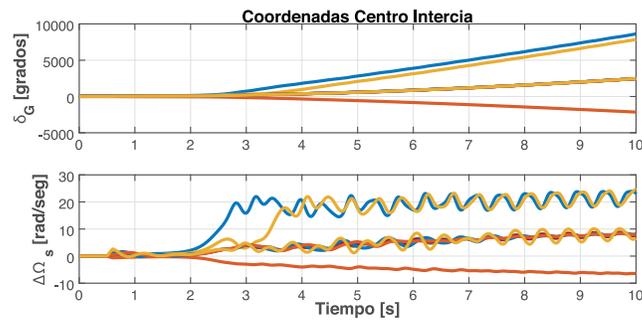


Figura 9. Gráfica de δ_{COI} y Ω_{COI} partícula inestable. Iteración 1

Fuente: elaboración propia.

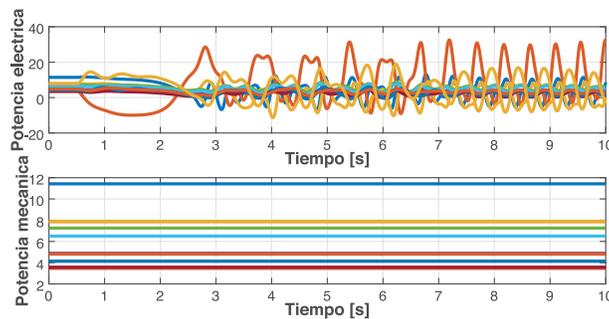


Figura 10. Gráfica potencia eléctrica y mecánica partícula inestable. Iteración 1

Fuente: elaboración propia.

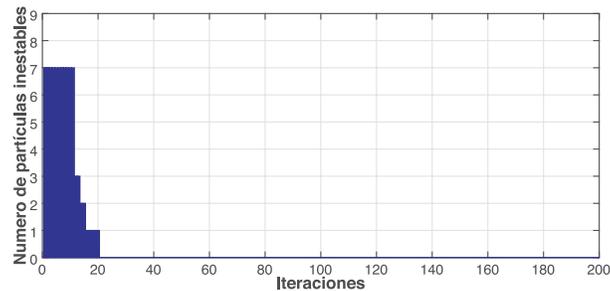


Figura 11. Partículas inestables caso 1

Fuente: elaboración propia.

durante el proceso iterativo. Como se puede observar, a partir de la iteración 28 el modelo de optimización garantizaba que todas las partículas fueran estables y se aseguraba un despacho económico garantizando la estabilidad transitoria, como se

evidencia en las figuras 12, 13 y 14, las cuales corresponden a una partícula en la iteración final. Es importante resaltar que al final del proceso iterativo todas las partículas tuvieron el mismo comportamiento mostrado en dichas gráficas.

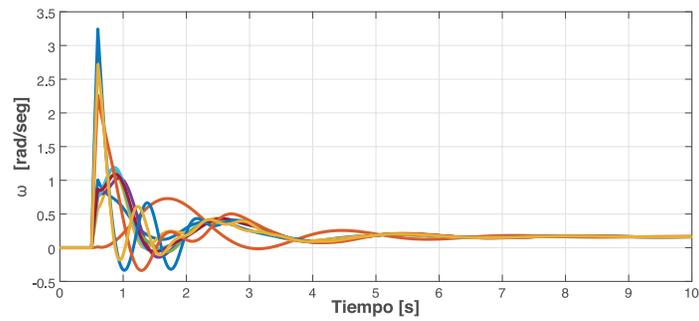


Figura 12. Gráfica de ω . Iteración 200

Fuente: elaboración propia.

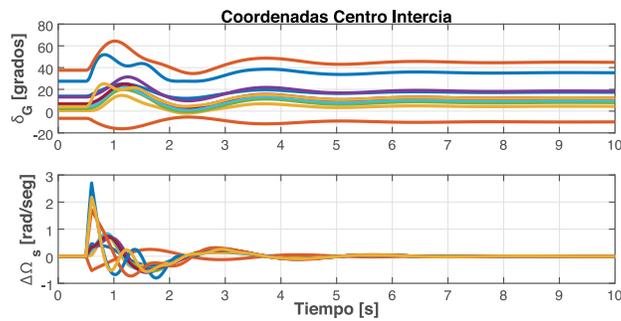


Figura 13. Gráfica de δ_{COI} y Ω_{COI} . Iteración 200

Fuente: elaboración propia.

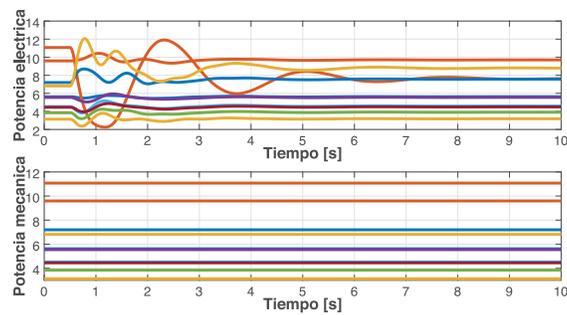


Figura 14. Potencia eléctrica y mecánica. Iteración 200

Fuente: elaboración propia.

Entre tanto, en la figura 15 se muestra la gráfica de convergencia, de la cual se puede concluir que el método de optimización encontraba el óptimo global a partir de la iteración 115. Adicionalmente,

en la tabla 3 se muestran las potencias inyectadas por los generadores, las pérdidas y el costo total del despacho en este caso.

Tabla 3. Tabla de potencias caso 1

P.G [p.u]	Caso 1
Pg1	5,8926
Pg2	11,0758
Pg3	3,8321
Pg4	5,8557
Pg5	6,4151
Pg6	3,9884
Pg7	4,2806
Pg8	6,4557
Pg9	7,6649
Pg10	6,3162
Pérdidas [p.u]	0,4605
Costo [U\$]	4,6607x10 ⁹
Tiempo [s]	1711,2302

Fuente: elaboración propia.

Caso 2. Fallo en la línea que conecta los nodos 14 y 34

La tabla 4 muestra los resultados obtenidos del proceso de optimización del DE-RET para un fallo en la línea que conecta los nodos 14 y 34. Para este caso, el valor la desviación angular máxima δ_{COI} entre el grupo de los 10 generadores en la última iteración fue 51 grados, donde al final del proceso se aseguró la estabilidad transitoria. Para prueba de ello, se puede observar en la figura 16 que a partir de la iteración 74 el modelo de optimización descartaba las soluciones inestables.



Figura 15. Convergencia caso 1

Fuente: elaboración propia.

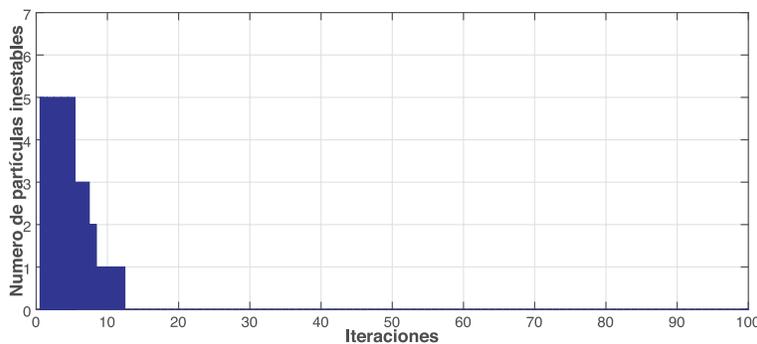


Figura 16. Partículas inestables, caso 2

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Tabla de potencias caso 2

P.G [p.u]	Caso 2
Pg1	4,1469
Pg2	11,0400
Pg3	3,3910
Pg4	3,9548
Pg5	8,3437
Pg6	2,3269
Pg7	6,3244
Pg8	6,2886
Pg9	8,0085
Pg10	7,9468
Pérdidas [p.u]	0,5266
Costo [U\$]	4,5500x10 ⁹
Tiempo [s]	1695,6997

Fuente: elaboración propia.

El la figura 17 se muestra la evolución del valor final de la función objetivo en este caso.

**Figura 17.** Convergencia, caso 2

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

Se presentó un modelo de optimización para determinar el punto de operación óptimo de un sistema de potencia cuando es sometido a una perturbación severa, considerando tanto las restricciones técnicas de operación del sistema como las restricciones de estabilidad transitoria del mismo. Además, el modelo de despacho económico considerando restricciones de estabilidad transitoria resultante, incluye la solución de ecuaciones en el dominio del tiempo que describen la evolución temporal de todas las

máquinas del sistema. De ahí que el modelo propuesto es confiable y, generalmente, proporciona soluciones óptimas en los casos estudiados.

El conjunto de soluciones obtenidas muestra que con la variación de las potencias inyectadas por los generadores síncronos, puede cambiar el punto de operación del sistema desde el punto de vista de la estabilidad transitoria, es decir, se puede pasar de un estado inestable a uno estable mediante la variación de las mismas.

Los resultados demuestran la eficacia y potencialidad del modelo de optimización metaheurística

Particle Swarm Optimization para la solución del DE-RET, asimismo, el PSO resulta ser un fuerte competidor de los modelos de optimización de búsqueda aleatoria como lo son los algoritmos genéticos, aplicados a la optimización de los sistemas de potencia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bolaños, R. y Correa, C. (2014). Transmission planning considering security and demand uncertainty through non-linear programming and evolutionary techniques. *Revista Tecnura*, 18(39), 62-76.
- Burke, E.K. y Kendall, G. (2005). *Search methodologies*. Springer, ISBN-10:0-387-23460-8, New York.
- Espitia-Chuchango, E.; Sofrony-Esmeral, J. (2014). Vortex Particle Swarm Optimization with Individual and Group Search. *Revista Tecnura*, 18(42), 24-37.
- Fang, D.; Xiaodong, Y.; Jingqiang, S.; Shiqiang, Y. y Yao, Z. (2007). An optimal generation rescheduling approach for transient stability enhancement. *IEEE Transactions on Power Systems*, 22(1), 386-394. [En línea]. Recuperado de: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4077106>.
- Gallego, R.; Escobar, A.; Toro, E. y Romero, R. *Técnicas heurísticas y metaheurísticas de optimización*. Editorial Universidad Tecnológica de Pereira, ISBN: 9789587222074, Pereira, 2015.
- Garcés-Ruiz, A.; *Sistemas de Generación de Energía*, Editorial Universidad Tecnológica de, ISBN: 978-958-722-044- Pereira, Pereira, 2006.
- Grainger, J.J.; Stevenson, W.D. y Sousa, C.L. (1996). *Análisis de sistemas de potencia*. McGraw-Hill, México.
- Kothari, J. D. D.P. (2006). *Power system optimization*. Nueva Delhi: PHI Learning Pvt. Ltd.
- Kundur, P.; Balu, N.J. y Lauby, M.G. (1994). *Power system stability and control*. Vol. 7. Nueva York: McGraw-Hill.
- Mo, N.; Zou, Z.; Chan, K. y Pong, T. (2007). Transient stability constrained optimal power flow using particle swarm optimisation. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 1(3), 476-483. Recuperado de: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4202028>.
- Murtagh, B.; Saunders, M.; Murray, W.; Gill, P.; Raman, R. y Kalvelagen, E. (2002). Gams/Minos: A solver for large-scale nonlinear optimization problems. Recuperado de: <https://pdfs.semanticscholar.org/5166/2c15571df1209b15293b2352a5ed70405b49.pdf>
- Padiyar, K. (2008). *Power system dynamics*. Hyderabad, India: BS Publications.
- Xia, S.; Chan, K.W.; Bai, X. y Guo, Z. (2015). Enhanced particle swarm optimisation applied for transient angle and voltage constrained discrete optimal power flow with flexible AC transmission system. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 9(1), 61-74. [En línea]. Recuperado de: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7024965>.
- Yang, X.S. (2010). *Nature-inspired metaheuristic algorithms*. Frome: Luniver Press.
- Zarate-Minano, R.; Van Cutsem, T.; Milano, F. y Conejo, A. (2010). Securing transient stability using time-domain simulations within an optimal power flow. *IEEE Transactions on Power Systems*, 25(1), 243-253. Recuperado de: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=5288558>.
- Zhu, J. (2009). *Optimization of power system operation*. Nueva Jersey: John Wiley & Sons.





Sondeo compresivo aplicado al sondeo de espectro de banda ancha eficiente en sistemas de radio cognitivo

Compressive sensing applied to efficient wideband spectrum sensing on cognitive radio systems

Evelio Astaiza Hoyos¹, Héctor Fabio Bermúdez Orozco², Luis Freddy Muñoz³

Fecha de recepción: 12 de marzo de 2016

Fecha de aceptación: 23 de noviembre de 2016

Cómo citar: Astaiza H., E.; Bermúdez O., H.F. y Muñoz, L.F. (2017). Sondeo compresivo aplicado al sondeo de espectro de banda ancha eficiente en sistemas de radio cognitivo. *Revista Tecnura*, 21(51), 42-56. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.1.a03

Resumen

Contexto: El sondeo de espectro es universalmente conocido como el principal habilitador de radio cognitivo (CR), dado que dota al dispositivo de CR de la capacidad de conocimiento del entorno de radio.

Objetivo: En este artículo se presenta un algoritmo diseñado para realizar el sondeo de espectro de banda ancha en sistemas de radio cognitivo (CR).

Método: El sondeo de espectro está basado en sondeo compresivo (CS), mediante el cual los usuarios cognitivos, sin necesidad de conocimiento *a priori* de características de la señal en el entorno de radio, minimizan la cantidad de muestras a procesar y, con ello, reducen de forma proporcional los tiempos de detección, consumos de energía y capacidades de procesamiento requeridas en los dispositivos de radio cognitivo (CRD).

Resultados: El desempeño del algoritmo propuesto se evalúa mediante la obtención de las curvas de probabilidad de detección, probabilidad de omisión de detección, probabilidad de falsa alarma y

las características operativas del receptor (ROC) en comparación con otros algoritmos propuestos en el estado del arte.

Conclusión: Los resultados de simulación demuestran que el método propuesto permite realizar el sondeo de espectro de manera eficiente, mejorando el desempeño del sondeo en función de la probabilidad de detección y de las características operacionales del receptor con respecto a otros algoritmos propuestos basados en muestreo *sub-Nyquist*.

Palabras clave: demodulador aleatorio, muestreo, relajación convexa, sondeo compresivo, sondeo de espectro.

Abstract

Context: Spectrum sensing is universally known as the main Cognitive Radio (CR) enabler, since it provides the CR device with the ability to know the radio environment.

Objective: This article presents an algorithm designed to perform the broadband spectrum sensing in Cognitive Radio systems.

- 1 Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, magíster en Ingeniería área Electrónica y Telecomunicaciones, candidato a doctor en Ciencias de la Electrónica. Docente de la Universidad del Quindío, Armenia, Colombia. Contacto: estaiza@uniquindio.edu.co
- 2 Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, magíster en Electrónica y Telecomunicaciones, candidato a doctor en Ingeniería Telemática. Docente de la Universidad del Quindío, Armenia, Colombia. Contacto: hfermudez@uniquindio.edu.co
- 3 Ingeniero de Sistemas, candidato a doctor en Ciencias de la Electrónica. Docente de la Fundación Universitaria de Popayán (FUP), Popayán, Colombia. Contacto: freddy.munoz@docente.fup.edu.co

Method: Spectrum sensing is based on Compressive Sensing (CS), by which cognitive users minimize the amount of samples to be processed, without the need for a priori knowledge of signal characteristics in the radio environment. In this way, it is possible to proportionally reduce detection times, power consumption and processing capacity required in cognitive radio devices (CRD).

Results: The performance of the proposed algorithm is evaluated by obtaining the probability of detection, the probability of missdetection, the probability of false alarm, and the Receiver Operating

Characteristics (ROC), and comparing it with other algorithms proposed in the state of the art.

Conclusion: The simulation results demonstrate that the proposed method enables efficient spectrum sensing. This improves the probe performance based on the probability of detection and the Receiver Operating Characteristic ROC, and it is better than the other proposed algorithms based on sub-Nyquist sampling.

Keywords: Convex relaxation, Compressive sensing, Random demodulator, Sampling, Spectrum sensing.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la demanda de servicios de comunicaciones inalámbricas ha crecido de manera exponencial, lo cual ha producido que se hable de una saturación del espectro, situación que no necesariamente es correcta, debido a que hay bandas de frecuencias subutilizadas, donde el ejemplo más evidente son las bandas asignadas para la prestación del servicio de televisión; por tanto, en general, existen huecos espectrales que en algunos casos son permanentes, y en otros, se producen en determinados momentos sobre algunas bandas de frecuencia; lo cual es un dilema, ya que, por un lado, los usuarios de algunos servicios como los móviles, no poseen suficiente cantidad de espectro para transmitir, por otro, algunas bandas espectrales no se encuentran completamente en uso. Para resolver este dilema surge radio cognitivo (RC), el cual es una tecnología propuesta para comunicaciones inalámbricas en la que, tanto los dispositivos de red y la red en sí misma, tienen la capacidad de cambiar sus parámetros de transmisión para establecer una comunicación en la cual se haga uso eficiente de los recursos de radio, sin interferir con los usuarios a quienes se les ha concedido el derecho legal de utilización de las bandas espectrales subutilizadas (usuarios licenciados o usuarios primarios). La alteración de parámetros

de transmisión se basa en el monitoreo de ciertos factores en el entorno de radio, dentro de los cuales, uno de los más importantes es el estado del espectro, que se obtiene mediante la implementación de la función de sondeo de espectro, que a su vez permite realizar el proceso de acceso dinámico de espectro.

Sin embargo, realizar el sondeo de espectro es una tarea que implica grandes retos desde la perspectiva de los recursos computacionales requeridos, ya que implementar esta función con los métodos tradicionales, como: detector de energía (Urkowitz, 1967; Kumar, Taluja y Lal, 2012; Penagos *et al.*, 2013; Hernández, Martínez y Sarmiento, 2016), sondeo por filtro adaptado (Kumar *et al.*, 2012; Sahai, Hoven y Tandra, 2004; Shobana, Saravanan y Muthaiah, 2013), sondeo por características cicloestacionarias (Kumar *et al.*, 2012; Ghozzi, Marx, Dohler y Palicot, 2006; Sutton, Nolan y Doyle, 2008) y detector wavelet (Tian y Giannakis, 2006; Hur *et al.*, 2006; Lavanya, Sindhu y Saravanan, 2013), entre otros, implica realizar el muestreo del espectro de banda ancha a tasas por encima de la tasa de Nyquist; por ello, resulta atractivo implementar un nuevo paradigma denominado sondeo compresivo (SC) (Candes, Romberg y Tao, 2006; Donoho, 2006; Tropp *et al.*, 2010), el cual proporciona una manera eficiente de procesar señales dispersas o señales que

pueden ser aproximadas adecuadamente por señales dispersas, es decir, que pueden ser aproximadas por una expansión en términos de una base adecuada, que solo tiene algunos términos significativos; al ser SC una nueva herramienta, solo en Astaiza, Jojoa y Bermúdez (2015) se presenta una primera aproximación metodológica que permite abordar de manera formal problemas en el área del procesamiento de señales utilizando SC, aproximación que aún no se ha validado.

Con la motivación anterior, el presente trabajo se enfoca en proponer un algoritmo de sondeo de espectro de banda ancha basado en muestreo sub-Nyquist, que permita validar la metodología propuesta en Astaiza, Jojoa y Bermúdez (2015), reducir la complejidad computacional asociada al muestreo a tasas iguales o superiores a la tasa de Nyquist y que permita superar la limitación del detector de energía (*energy detector*, ED) con respecto a la necesidad de conocimiento a priori de la varianza del ruido y reducir los costos energéticos asociados al sondeo de espectro de banda ancha a la tasa de Nyquist.

Haciendo uso del hecho de que las señales inalámbricas en redes de espectro abierto son típicamente dispersas en el dominio de la frecuencia (Mishali y Eldar, 2011), se presenta un modelo de sondeo de espectro de banda ancha que permite reducir significativamente la tasa de muestreo; en el modelo, la banda de interés se divide en un número finito de bandas espectrales, en las cuales se examina la presencia o no de portadora mediante la reconstrucción del espectro muestreado; el proceso de muestreo se realiza a través del demodulador aleatorio propuesto en Tropp *et al.* (2010), y la reconstrucción del mismo para la identificación de ocupación o no a través de la identificación de presencia o ausencia de portadora, se realiza mediante el algoritmo de relajación convexa (Astaiza, Jojoa y Bermúdez, 2015).

El principal objetivo del presente artículo es validar la metodología propuesta en Astaiza, Jojoa y Bermúdez (2015) y evaluar el éxito del modelo propuesto basado en sondeo compresivo para el

sondeo de espectro en sistemas de RC. La estructura del artículo se presenta a continuación: en el “Marco de referencia” se describen las generalidades de SC, el algoritmo de relajación convexa y el demodulador aleatorio; en la “Metodología y modelo del sistema” se ilustra el modelo del sistema y la metodología utilizada; en los “Resultados de simulación” se muestran y analizan los resultados de simulación, y por último se exponen las “Conclusiones”.

MARCO DE REFERENCIA

Sondeo compresivo

En el paradigma de sondeo compresivo, se asume que una señal $z \in \mathbb{R}^n$ se encuentra conformada por muestras tomadas a la tasa de Nyquist. Esta señal, a su vez, puede ser representada por una aproximación dispersa en un dominio transformado, donde se denota Φ a la matriz de tamaño $n \times n$ que representa la transformación entre el dominio original de la señal y el dominio en el cual la señal es dispersa. Al asumir que en el dominio transformado, la señal $x \in \mathbb{R}^n$, se describe como $x = \Phi z$, y tiene solamente k componentes significativas, donde $k \ll n$ y las componentes restantes son aproximadamente cero (0). Se dice que la señal \mathbb{R}^n es k -dispersa, lo cual se representa como $\|x\|_0 \leq k$, donde el operador $\|x\|_p$ denota la norma ℓ_p del vector x cuando $p = 0$. La norma definida en la ecuación (1) no cumple la desigualdad triangular, por tanto, por definición se tiene que $\|x\|_0 = |supp|$, donde *supp* indica el soporte de un vector y $|supp|$ representa la cardinalidad del soporte del vector x , luego $\|x\|_0$ hace referencia al número de coeficientes diferentes de cero (0) que tiene el vector; la norma ℓ_p del vector x denotada por $\| \cdot \|_p$ se define como se muestra en la ecuación (1).

$$\|x\|_p = \begin{cases} \left(\sum_{i=1}^n |x_i|^p \right)^{\frac{1}{p}} & \text{para } p \in [1, \infty) \\ \max_{i=1,2,3,\dots,n} |x_i| & \text{para } p = \infty \end{cases} \quad (1)$$

Se puede interpretar de una manera no muy precisa, pero muy ilustrativa, que el sondeo compresivo permite realizar un muestreo a la tasa de Nyquist seguido de un submuestreo realizado a través de una matriz A de tamaño $n \times n$, donde $m < n$, por consiguiente, el proceso de tomar m medidas lineales mediante un sistema de adquisición, puede representarse matemáticamente como lo indica la ecuación (2).

$$y = Ax \quad (2)$$

Donde, $y \in \mathbb{R}^m$ es el vector de mediciones.

Para garantizar la recuperación única de la señal original a partir de las medidas lineales y , la matriz de sondeo A debe cumplir en general con la propiedad de isometría restringida (RIP) (Candes y Tao, 2005), la cual se ilustra en la siguiente definición.

Definición 1: Una matriz A cumple la propiedad de isometría restringida de orden k , si existe un $\delta_k \in (0,1)$ tal que

$$(1 - \delta_k)\|x\|_2^2 \leq \|Ax\|_2^2 \leq (1 + \delta_k)\|x\|_2^2 \quad (3)$$

Para todo $x \in S_k$, con $S_k = \{x: \|x\|_0 \leq k\}$.

Si una matriz A satisface la propiedad de isometría restringida de orden $2k$, de la ecuación (3) se puede interpretar que la matriz A conserva la distancia de cualquier par de vectores k -dispersos.

El problema de reconstrucción de la señal $x \in \mathbb{R}^n$ a partir del vector de mediciones $y \in \mathbb{R}^m$, se puede realizar mediante algoritmos basados en relajación convexa; que expresan un enfoque fundamental de aproximación dispersa. Estos algoritmos reemplazan la función combinatoria ℓ_0 con la función convexa ℓ_1 , trasladando el problema combinatorio a un problema de optimización convexa (Gribonval y Nielsen, 2007); la norma ℓ_1 es la función convexa más aproximada a la función ℓ_0 . El enfoque natural, desde el cual se aborda el problema de aproximación dispersa, se basa en encontrar la solución dispersa de $y = Ax$, al resolver la ecuación (4).

$$\min_x \|x\|_0 \quad \text{sujeto a } y = Ax \quad (4)$$

El problema planteado en la ecuación (4) es un problema combinatorio, el cual en general es NP-Hard (Natarajan, 2006), y el hecho de trabajar con todos los soportes de cardinalidad k se convierte en un problema computacional intratable, al reemplazar la norma ℓ_0 por la norma ℓ_1 el problema se convierte en el planteado en la ecuación (5).

$$\min_x \|x\|_1 \quad \text{sujeto a } y = Ax \quad (5)$$

Para el caso de mediciones imperfectamente dispersas (medidas contaminadas por ruido), se considera el modelo de sondeo presentado por la ecuación (6).

$$y = Ax + w \quad (6)$$

Donde A es la matriz de sondeo de tamaño $m \times n$, $y \in \mathbb{R}^m$ es el vector de mediciones y $w \in \mathbb{R}^m$ es el vector de ruido, por tanto, las entradas de y son las medidas de x contaminadas por ruido, por ende el problema de optimización de la ecuación (5) se convierte en la ecuación (7).

$$\min_x \|x\|_1 \quad \text{sujeto a } \|Ax - y\|_2 \leq \epsilon \quad (7)$$

O, de manera equivalente

$$\min_x \left(\|x\|_1 + \frac{\mu}{2} \|Ax - y\|_2^2 \right) \quad (8)$$

Los dos programas son equivalentes, ya que la solución de un problema es también la solución del otro, siempre que los parámetros ϵ y μ se establezcan adecuadamente; sin embargo, no se conoce a priori la correspondencia entre ϵ y μ . Dependiendo de la aplicación y la información disponible, alguno de ellos puede ser más fácil de obtener, lo que hace que uno de los dos problemas presentados en las ecuaciones (7) y (8) sea preferido sobre el otro. Es muy importante la selección adecuada en la práctica de ϵ o μ ; como principios generales de selección se tienen: 1) realizar presunciones

estadísticas, estimaciones de máximo *a posteriori*, sobre w y x e interpretar las ecuaciones (7) o (8). 2) Validación cruzada (reconstruir a partir de un subconjunto de medidas y hacer la validación de la recuperación sobre el otro subconjunto de medidas). 3) Determinar los mejores parámetros sobre un conjunto de datos de prueba y usarlos sobre los datos actuales con ajustes apropiados, para subsanar las diferencias en escala, rango dinámico, dispersión y nivel de ruido.

Demodulador aleatorio

El demodulador aleatorio (*random demodulator*, RD) (Tropp *et al.*, 2010) puede considerarse como un nuevo tipo de sistema de muestreo, el cual puede usarse para realizar la adquisición de señales dispersas limitadas en banda (señales con solo algunos tonos de frecuencia significativos), el diagrama en bloques de este sistema se muestra en la figura 1.

La figura 1 muestra que la señal de entrada al demodulador aleatorio se multiplica por una secuencia pseudoaleatoria de alta tasa, la cual dispersa la energía de los tonos sobre el ancho de banda total ocupado por la secuencia; posteriormente, se aplica filtraje antialiasing de acuerdo con el límite superior del inverso de la tasa de información de la señal $\frac{1}{R}$ con $R = \mathcal{O}[K \log(W/K)]$ (Tropp *et al.*, 2010), para finalmente muestrear la señal a una

tasa inferior a la de Nyquist. El proceso de demodulación (multiplicación por la secuencia pseudoaleatoria) garantiza que cada tono presente en la señal de entrada presenta una *firma* diferente dentro de la banda pasante del filtro; dado que la señal de entrada al demodulador aleatorio se encuentra conformada solamente por algunos tonos, es posible identificar los tonos y sus amplitudes a partir de las muestras de baja tasa.

En el caso ideal, el demodulador aleatorio es un sistema lineal que mapea una señal de tiempo continuo a una secuencia discreta de muestras (Tropp *et al.*, 2010), el cual actúa sobre la forma discreta de la señal de entrada $x[n]$ de la señal de tiempo continuo $x(t)$, cada muestra x_n de la señal $x[n]$, donde cada muestra es el promedio de la señal $x(t)$ sobre el n -ésimo intervalo de tiempo, se multiplica por la señal aleatoria respectiva c_n donde c_1, c_2, \dots, c_n es la secuencia de tiempo discreto de valores ∓ 1 equiprobables, producida por el generador de números pseudoaleatorios, por consiguiente, el proceso de demodulación es equivalente a mapear $x \rightarrow Dx$ donde D es una matriz diagonal de tamaño $n \times n$ como se aprecia en la ecuación (9).

$$D = \begin{bmatrix} c_1 & & & \\ & c_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & c_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

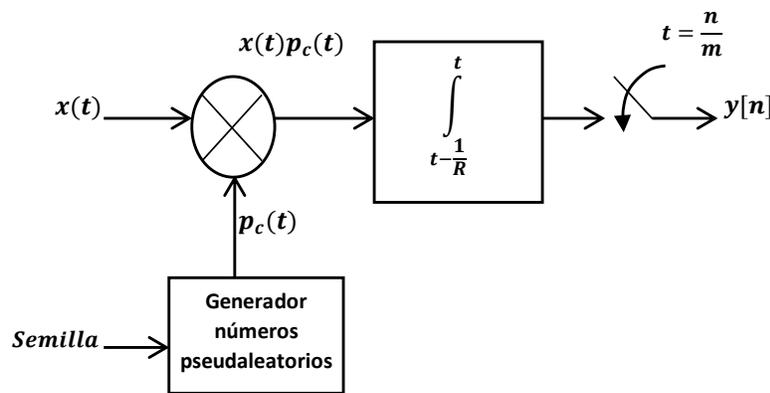


Figura 1. Diagrama en bloques del demodulador aleatorio

Fuente: Tropp *et al.* (2010).

solo requiere identificar las portadoras activas dentro del ancho de banda licenciado, este orden de dispersión puede asumirse como el máximo posible, el cual equivale a tener los K canales del operador ocupados por los usuarios primarios; luego, la señal sensada en este caso es K -dispersa, con orden de dispersión $k = K$.

La función de sondeo de espectro realizada por el terminal cognitivo es determinar la ocupación de los K canales en la banda asignada al operador primario, donde los K – L canales disponibles en la red representan oportunidades de transmisión a los usuarios cognitivos siempre y cuando los terminales cognitivos se encuentren en capacidad de detectar correctamente los canales disponibles en la banda sensada.

En general, asumiendo que los usuarios primarios utilizan un esquema cualquiera de modulación digital, la señal presente en la banda licenciada se representa como se ilustra en la ecuación (11).

$$x(t) = \sum_{k=1}^K [x_{I_n}(t) \cos(2\pi f_n t + \theta_n) - x_{Q_n}(t) \sin(2\pi f_n t + \theta_n)] \quad (11)$$

Donde, $x_{I_n}(t)$ representa la componente en fase de la señal de la n-ésima portadora con frecuencia f_n , $x_{Q_n}(t)$ representa la componente en cuadratura de la señal de la n-ésima portadora con frecuencia f_n y θ_n representa la fase de la portadora.

Dado que la señal en el canal es dispersa en el dominio frecuencia, se realiza la transformada de Fourier de la señal $x(t)$ y se umbraliza la magnitud cuadrática de la transformada, la cual permite llegar a la aproximación dispersa de la señal la cual se muestra en la ecuación (12).

$$X(f) = \mathcal{U}[\mathcal{F}\{x(t)\}]^2 \quad (12)$$

Donde, $\mathcal{U}[z]$ representa la función de umbralización, la cual se define como se indica en la ecuación (13).

$$\mathcal{U}(z) = \begin{cases} 0 & \text{si } z \leq \gamma \\ z & \text{si } z > \gamma \end{cases} \quad (13)$$

Con γ que denota la potencia de ruido en la banda de interés.

Una vez obtenida la representación dispersa de la señal $x'(t) = \mathcal{F}^{-1}\{X(f)\}$, se toman las medidas de $x'(t)$ o medio del demodulador aleatorio, el cual entrega medidas $y[m]$ de acuerdo a la ecuación (14).

$$y = \mathbf{M}x' \quad (14)$$

Donde \mathbf{M} representa la matriz de sondeo de tamaño $m \times n$, $y \in \mathbb{R}^m$ corresponde al vector de mediciones y $x' \in \mathbb{R}^n$ es el vector que representa la señal dispersa.

Con el vector de mediciones $y \in \mathbb{R}^m$ se resuelve el problema de relajación convexa planteado en la ecuación (5), obteniendo el vector estimado de la señal $\hat{x}[n] = [\hat{x}_1[n] \hat{x}_2[n] \dots \hat{x}_K[n]]$, donde $\hat{x}_k[n]$ denota la k-ésima sub-banda de la banda licenciada, a las cuales se aplican las hipótesis de detección mostradas en la ecuación (15).

$$\begin{aligned} H_0: \hat{x}_k[n] &> 0 \text{ Canal Ocupado} \\ H_1: \hat{x}_k[n] &= 0 \text{ Canal Disponible} \end{aligned} \quad (15)$$

Las hipótesis de detección se plantean de esta manera, dado que el proceso de umbralización realizado para obtener la representación dispersa de la señal en la banda de interés considera el piso de ruido como umbral de decisión.

En el modelo propuesto en este artículo, la cantidad de mediciones m realizadas de la señal dispersa se aproxima a $m = O(k^2) + c$, donde c es el mínimo valor entero que permite garantizar que la relación n/m sea entera.

RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Por simplicidad, el escenario planteado de simulación considera una red que opera en una banda hipotética comprendida entre 1,5MHz y 19,5MHz, en la cual se definen 6 sub-bandas de frecuencia; cada usuario primario transmite a una tasa de 2Msps utilizando moduladores 16QAM con un factor de *roll off* de 0,5; asumiendo que, en un instante de tiempo cualquiera, en el sistema solo se tienen tres usuarios primarios activos, haciendo uso de las portadoras ubicadas en 3MHz, 9MHz y

15MHz, la señal presente en la banda del operador primario luce como se muestra en la figura 2.

En este escenario, se tiene que la cantidad de canales del sistema es $K = 6$, el número de canales ocupados por los usuarios primarios es $L = 3$, el número de canales disponibles para los usuarios cognitivos es $K - L = 3$, el ancho de banda licenciado al operador primario es $B = 19,5\text{MHz} - 1,5\text{MHz} = 18\text{MHz}$, por tanto cada canal cuenta con un ancho de banda de operación de $\frac{B}{K}\text{MHz} = \frac{18}{6}\text{MHz} = 3\text{MHz}$; de igual forma se asume que todos los usuarios primarios transmiten con la misma potencia, y que la relación señal a ruido es de 30dB. Según lo planteado en "Metodología y modelo del sistema", el orden de dispersión de la señal presente en la banda licenciada es desconocido, sin embargo, en general, se presenta un límite superior, el cual es igual a la cantidad de sub-bandas de frecuencias definidas en la banda de interés, motivo por el cual, el orden de dispersión con el cual se aborda el escenario es $k = K = 6$, sin desconocer que para el caso particular planteado en el escenario, el orden de dispersión se conoce de antemano el cual es igual a $k = 3$; se realiza la simulación con $k = 6$ con la intención de abordar el problema de realizar las mediciones y reconstrucción de la señal dispersa, en

un escenario que se aproxime de mejor manera al escenario real, en el cual no se conoce con certeza el orden de dispersión.

De acuerdo con la relación señal a ruido planteada de 30dB y con la ecuación (12), se realiza el proceso de umbralización de la señal, con lo que se obtiene la señal umbralizada que se muestra en la figura 3.

Sin embargo, el interés es identificar las sub-bandas de frecuencia ocupadas y libres, mas no se requiere efectuar una reconstrucción perfecta de la señal dispersa en la banda de interés. De acuerdo con el escenario de simulación, la mínima tasa de muestreo requerida en el sistema es $f_s = f_{\text{Nyq}} = 40\text{MHz}$ ya que se considera que la máxima frecuencia contenida en la banda a representar se aproxima a 20MHz, pero al representar la densidad espectral de potencia de la señal, se utiliza una transformada rápida de Fourier (FFT) de tamaño 512 (valor promedio que permite una representación espectral adecuada por carga computacional para la aplicación de sondeo de espectro). Esto implica que el espectro de un lado se encuentre representado de manera adecuada por 256 muestras espectrales, cantidad de muestras contenidas en las figuras 2, 3 y 4; por tanto, este es el valor que

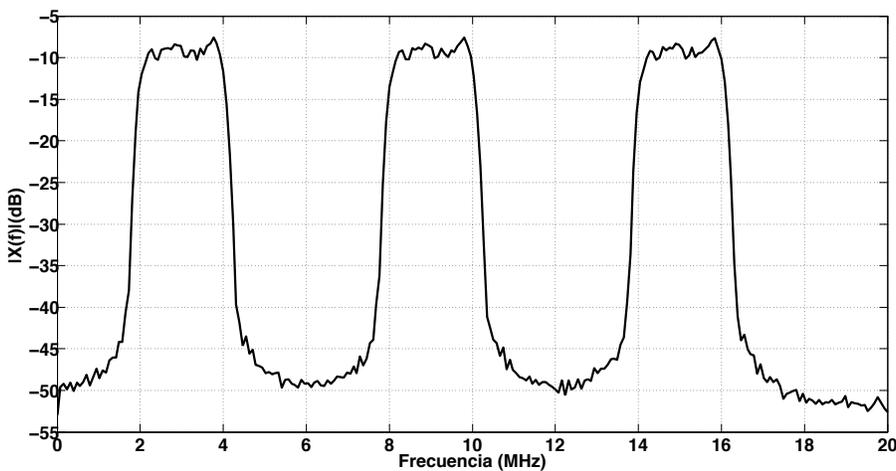


Figura 2. Densidad espectral de potencia de la señal presente en la banda primaria en el escenario de simulación planteado SNR=30dB

Fuente: elaboración propia.

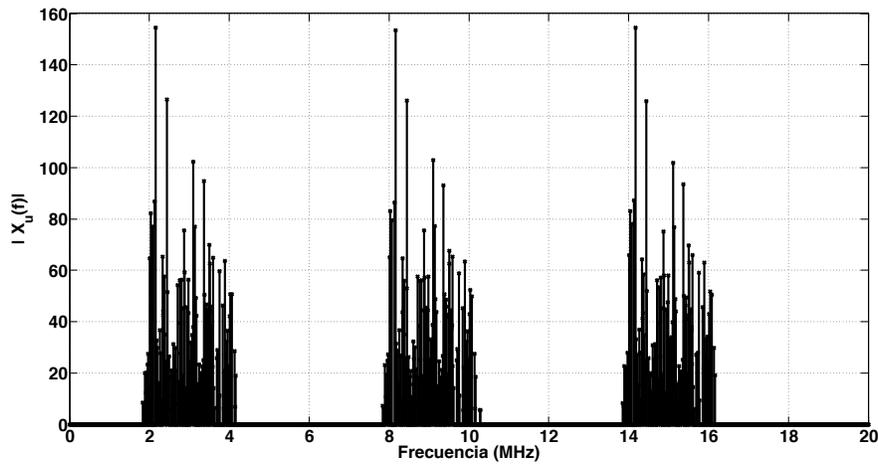


Figura 3. Señal umbralizada presente en la banda primaria, según ecuación (11) con $\gamma = -52\text{dBm}$.

Fuente: elaboración propia.

toma el parámetro n en la representación de la señal dispersa $x \in \mathbb{R}^n$.

La toma de medidas $y \in \mathbb{R}^m$ se realiza con el demodulador aleatorio presentado en el “Marco de referencia”, en donde la cantidad de medidas se calcula según $m = O(k^2) + c$ como se indica en la mencionada sección, para realizar el cálculo del valor m se tiene que, $k^2 = 6^2 = 36$, por tanto, $O(k^2) = 36$, sin embargo, el cociente n/m debe ser

entero; por esto, m solo puede tomar valores 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 o 256, lo cual implica en este caso que $m = 64$; identificado el valor de m , se procede a generar las matrices D y H . Adicionalmente, en el “Marco de referencia”, y dado que $n = 256$, $m = 64$ luego $n/m = 4$, la matriz H se estructura como se muestra en la ecuación (10), donde al realizar la operación de sondeo $y = Mx$ se obtienen las medidas ilustradas en la figura 4.

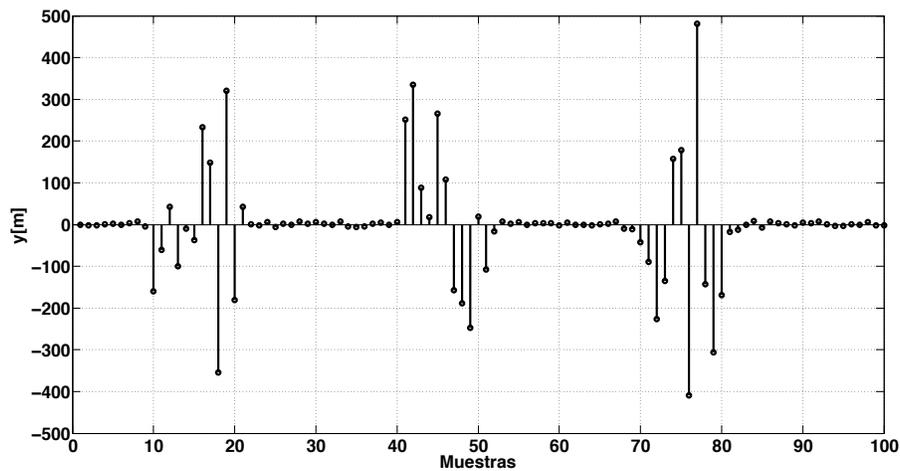


Figura 4. Medidas de la señal dispersa

Fuente: elaboración propia.

Al comparar, la cantidad de muestras presentes en la representación de la señal dispersa de la figura 3, con el número de muestras de las medidas tomadas en la figura 4, se evidencia la reducción de la tasa de muestreo requerida para realizar la operación de sondeo de espectro, la cual, en este caso, es de un factor de 4:1.

Finalmente, se realiza la detección de la señal mediante la solución del problema de optimización convexa de la ecuación (5), permitiendo

obtener la señal estimada (reconstruida) $\hat{x}[n]$ como se ilustra en la figura 5.

Para apreciar de mejor manera el proceso de detección planteado en la ecuación (14), se realiza un proceso de escalado y traslape de la señal reconstruida y la densidad espectral de potencia de la señal en la banda licenciada como se muestra en la figura 6, donde se evidencia, que al recuperar la señal dispersa de las m muestras tomadas con el demodulador aleatorio, se recuperan las

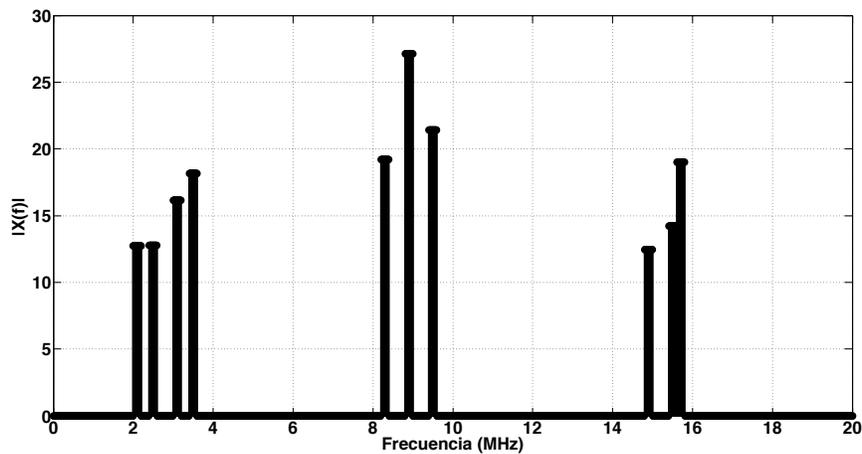


Figura 5. Señal reconstruida $\hat{x}[n]$.

Fuente: elaboración propia.

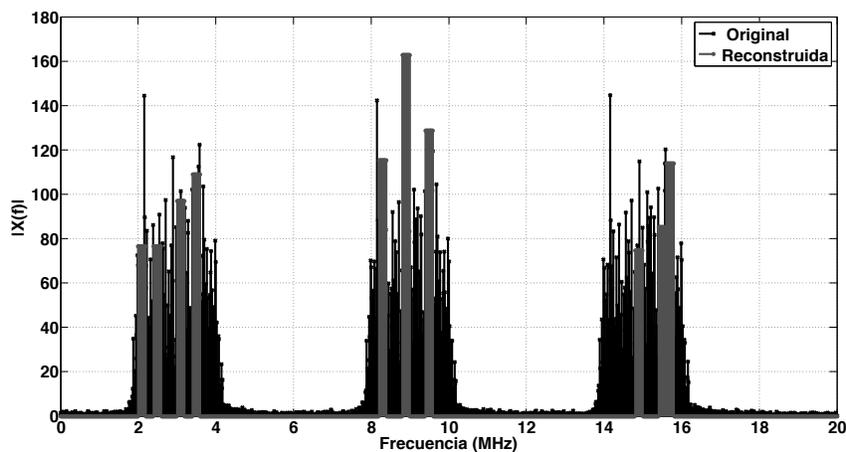


Figura 6. Escalamiento y traslape densidad espectral de la señal reconstruida $\hat{x}[n]$ y densidad espectral de la señal en la banda licenciada

Fuente: elaboración propia.

frecuencias a las cuales existe presencia de portadora, y al conocer el ancho de banda utilizado por cada portadora en el sistema, es posible identificar que canales del sistema licenciado están disponibles para transmisiones de usuarios cognitivos; en este caso particular, se observa la disponibilidad de las portadoras ubicadas en 6MHz, 12MHz y 18MHz, con lo cual, un usuario cognitivo que requiera un ancho de banda menor o igual a 3MHz puede realizar su transmisión sobre cualquiera de estas portadoras, y de requerir un mayor ancho de banda para realizar la transmisión, puede reconfigurar su esquema de transmisión en un modo multiportadora de tal forma que aproveche la cantidad necesaria de canales disponibles.

Para evaluar el desempeño del algoritmo de sondeo de espectro propuesto, se realizan 20 corridas de simulación con 1000 réplicas por corrida generando aleatoriamente una señal por réplica para la obtención de las métricas de evaluación del desempeño. Se utilizan como métricas la probabilidad de falsa alarma, la probabilidad de omisión de detección y la probabilidad de detección, las cuales son analizadas en función de la cantidad de componentes recuperadas en la señal estimada mediante el algoritmo de reconstrucción propuesto y en función de la relación señal a ruido de la multibanda generada, adicionalmente se hace uso de las curvas de la característica operacional del receptor (ROC), comparadas con las métricas obtenidas del algoritmo de detección de energía secuencial (Olabiyi y Annamalai, 2012a, 2012b), y los algoritmos basados en sondeo compresivo propuestos por Haque *et al.* (2015), Sun, Huang, Wang y Wang (2015) y Wang, Guo, Sun y Feng (2015).

En la figura 7 puede observarse que el número de componentes significativas a recuperar de la señal multibanda (iteraciones del algoritmo de estimación) en el escenario de simulación descrito es de cerca de 180 para garantizar una probabilidad de detección aproximadamente igual a 1, donde se evidencia que la señal multibanda es una señal que no puede considerarse exactamente dispersa,

ya que de ser dispersa, según la presunción bajo la cual se realiza el modelo de señal y del sistema, la cantidad de componentes significativas (iteraciones del algoritmo de estimación) que permitirían una recuperación cercana a la exacta de la señal sería de 6 componentes (iteraciones). En la figura 7 puede observarse que la probabilidad de falsa alarma permanece en cero, ya que las componentes recuperadas de la señal se encuentran en canales ocupados, pero no necesariamente en cada uno de ellos hay componentes recuperadas; por tanto, el algoritmo de sondeo propuesto siempre detectará de manera correcta los canales ocupados en los cuales el algoritmo detectó componente, pero aquellos ocupados en los cuales no se realizó detección de componente, el algoritmo propuesto lo estima como canal no ocupado, lo que deriva en una omisión de detección; de esta manera, en la medida que se ejecuta una mayor cantidad de iteraciones del algoritmo, mayor cantidad de componentes son recuperadas (una componente por iteración), y por consiguiente, mayor es la posibilidad de que en cada canal ocupado existan componentes recuperadas y con ello, mayor probabilidad de detección y menor probabilidad de omisión de detección.

La figura 8 presenta el desempeño que alcanza el algoritmo, en el cual la probabilidad de detección es aproximadamente 1, para valores de SNR superiores a 5dB, para valores de SNR por debajo de 5dB, la probabilidad de omisión de detección es aproximadamente igual a 0, lo cual implica que en el escenario de Radio Cognitivo, en general, su desempeño será adecuado, evitando que un usuario cognitivo tome una banda ocupada por un usuario primario en condiciones de baja SNR, a pesar de desaprovechar oportunidades espectrales dados los altos valores de la probabilidad de falsa alarma.

La figura 9 presenta, para el algoritmo propuesto, el desempeño en función de la probabilidad de detección contra el desempeño del detector de energía (Olabiyi y Annamalai, 2012a, 2012b) y contra el desempeño de los algoritmos basados

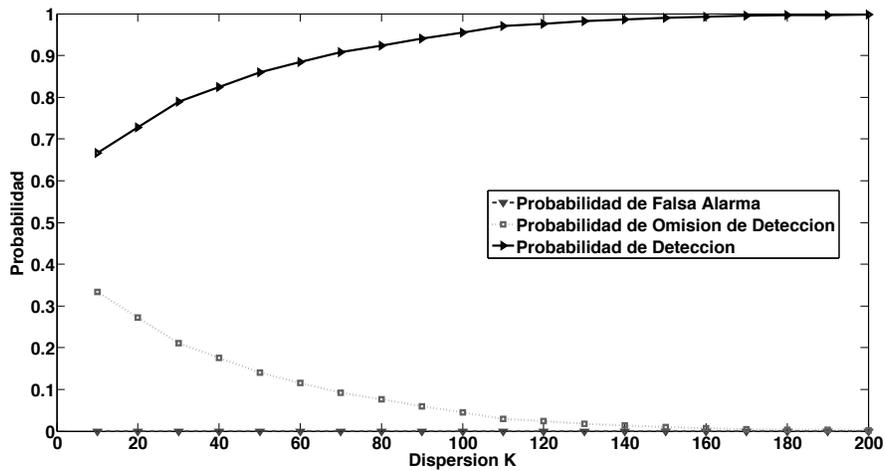


Figura 7. Probabilidades de detección, falsa alarma y omisión de detección en función del número de componentes recuperado para SNR=30dB

Fuente: elaboración propia.

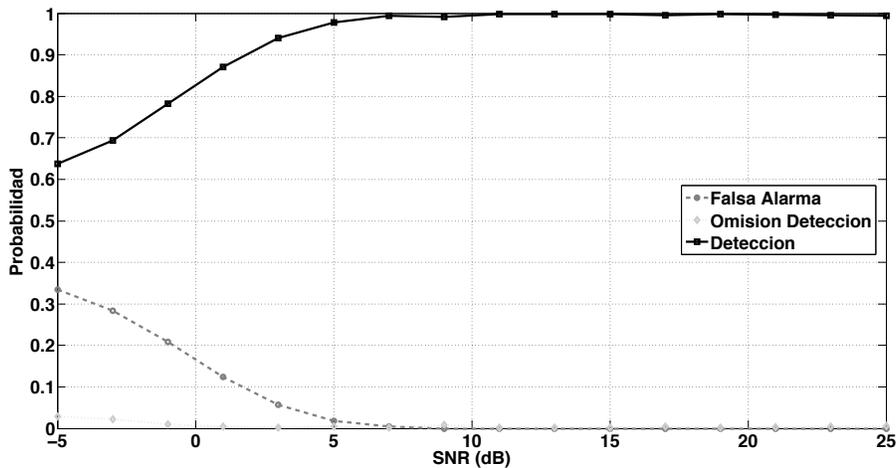


Figura 8. Probabilidades de detección, falsa alarma y omisión de detección en función de SNR para K=200

Fuente: elaboración propia.

en sondeo compresivo propuestos por Haque *et al.* (2015), Sun *et al.* (2015) y Wang *et al.* (2015); en la figura 9 también se puede apreciar las mejoras que el algoritmo propuesto induce sobre el desempeño de los otros algoritmos, sobre todo en condiciones de baja SNR (menores a 5dB) ya que la probabilidad de detección es mayor a la obtenida por los demás algoritmos con los cuales se hace el comparativo.

La figura 10, en términos de las curvas de ROC y en condiciones de baja SNR (1 dB), muestra que el mejor desempeño es para el algoritmo propuesto, ya que el área bajo la curva es la mayor, lo cual indica la capacidad de identificar acertadamente los WS. El algoritmo con peor desempeño es el propuesto por Sun [20], ya que la curva ROC indica una probabilidad de 0,5 de realizar una detección correcta de los WS.

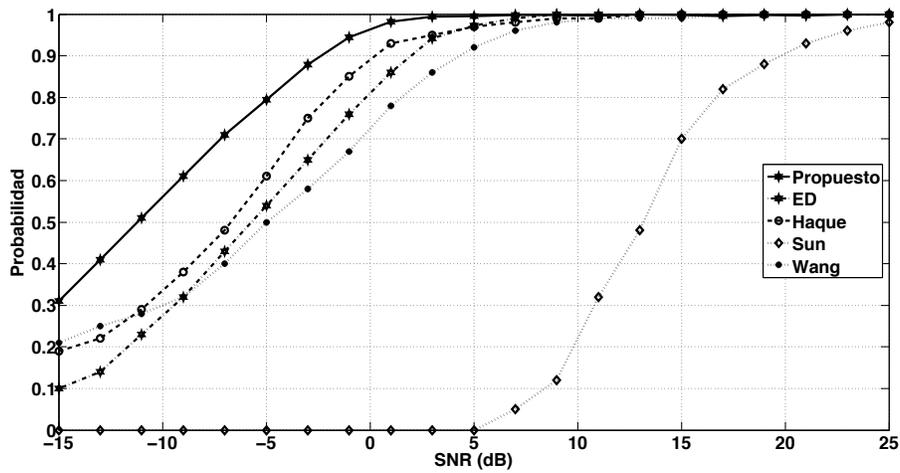


Figura 9. Probabilidad de detección para diferentes valores de SNR

Fuente: elaboración propia.

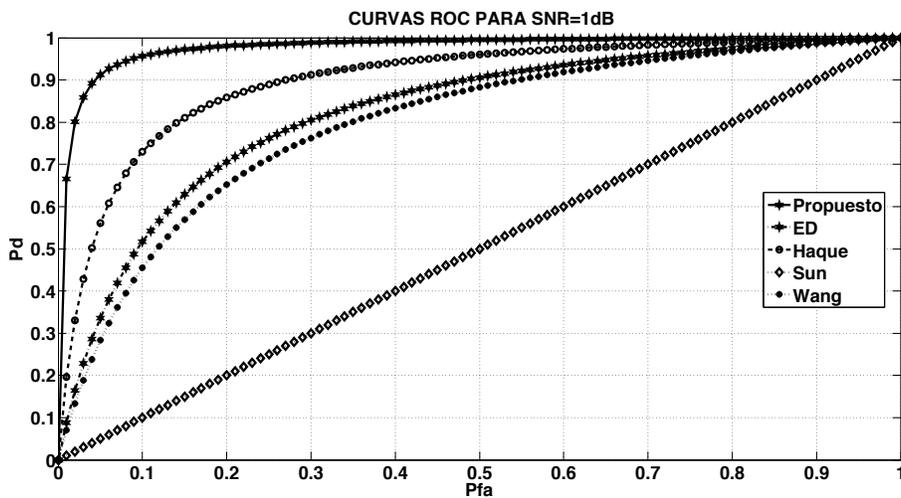


Figura 10. Curvas ROC para SNR = 1dB

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

En este artículo se presenta una validación de la metodología propuesta por Astaiza, Jojoa y Bermúdez (2015) para realizar el procesamiento de señales basado en sondeo compresivo, donde se evidencia la validez de la propuesta, aplicando la metodología al sondeo de espectro en sistemas de radio cognitivo.

De la misma manera, se evalúa el éxito del modelo propuesto basado en sondeo compresivo para el sondeo de espectro en sistemas de radio cognitivo, donde se pueden evidenciar que el modelo propuesto efectivamente permite realizar de manera exitosa la operación de sondeo de espectro, pero igualmente permite evidenciar como deficiencia presente en el mecanismo de muestreo compresivo denominado modulador aleatorio, la

restricción referente a que el cociente n/m debe ser entero, esto hace que la cantidad de muestras a tomar de la señal dispersa sea mucho mayor a la teórica estimada, que para el escenario de simulación propuesto sería de 36.

Se evidencia que mediante la utilización del algoritmo propuesto, se puede realizar el sondeo de espectro de banda ancha con una cantidad de muestras 20 veces menor a las obtenidas a la tasa de Nyquist, lo cual permite obtener un mayor desempeño en condiciones de baja SNR comparado con los desempeños obtenidos por algoritmos propuestos por Olabiyi y Annamalai (2012a, 2012b) los cuales operan a la tasa de Nyquist, y Haque *et al.* (2015), Sun *et al.* (2015) y Wang *et al.* (2015), los cuales se fundamentan en sondeo compresivo y por consiguiente operan a tasas inferiores a la tasa de Nyquist.

Por último, se evidencia que SC es una tecnología prometedora, la cual contribuirá al mejoramiento significativo de la forma en que actualmente se realiza el procesamiento de señales, reduciendo los costos computacionales y con ello optimizando la utilización de otros recursos, como energía; esto soportado en el hecho de que para el escenario de simulación planteado se alcanza una reducción en un factor de 4 en la cantidad de muestras requeridas para realizar la operación de sondeo de espectro, factor en el cual se espera reducir, al menos, la cantidad de recursos computacionales requeridos para el desempeño de la función, esto, comparado con sistemas tradicionales de sondeo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Astaiza, E.; Jojoa, P.E. y Bermúdez, H.F. (2015). Compressive sensing: A methodological approach to an efficient signal processing. *DYNA*, 82(192), 203-210.
- Candes, E.J. y Tao, T. (2005). Decoding by linear programming. *IEEE Transactions on Information Theory*, 51(12), 4203-4215. <https://doi.org/10.1109/TIT.2005.858979>
- Candes, E.J.; Romberg, J. y Tao, T. (2006). Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information. *IEEE Transactions on Information Theory*, 52(2), 489-509. <https://doi.org/10.1109/TIT.2005.862083>
- Donoho, D.L. (2006). Compressed sensing. *IEEE Transactions on Information Theory*, 52(4), 1289-1306. <https://doi.org/10.1109/TIT.2006.871582>
- Ghoozi, M.; Marx, F.; Dohler, M. y Palicot, J. (2006). Cyclostationarity-Based Test for Detection of Vacant Frequency Bands. *International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications*, IEEE (pp. 1-5). <https://doi.org/10.1109/CROWNCOM.2006.363454>
- Gribonval, R. y Nielsen, M. (2007). Highly sparse representations from dictionaries are unique and independent of the sparseness measure. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 22(3), 335-355. <https://doi.org/10.1016/j.acha.2006.09.003>
- Haque, T.; Yazicigil, R.T.; Pan, K.J.-L.; Wright, J. y Kinget, P.R. (2015). Theory and Design of a Quadrature Analog-to-Information Converter for Energy-Efficient Wideband Spectrum Sensing. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I. Regular Papers*, 62(2), 527-535. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2014.2360756>
- Hernández, C.; Martínez, L.F.P. y Sarmiento, F.H.M. (2016). Algoritmos para asignación de espectro en redes de radio cognitiva. *Revista Tecnura*, 20(48), 69-88. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.2.a05>
- Hur, Y.; Park, J.; Kim, K.; Lee, J.; Lim, K.; Lee, C.; ... Laskar, J. (2006). A Cognitive Radio (CR) Testbed System Employing a Wideband Multi-Resolution Spectrum Sensing (MRSS) Technique. *IEEE Vehicular Technology Conference*, IEEE (pp. 1-5). <https://doi.org/10.1109/VTCF.2006.260>
- Kumar, P.; Taluja, S. y Lal, R. (2012). Performance analysis of Energy detection, Matched filter detection & Cyclostationary feature detection Spectrum Sensing Techniques. *International Journal Of Computational Engineering Research, IJCER*, 2(5), 1296-1301.
- Lavanya, P.V.; Sindhu, R. y Saravanan, R. (2013). Wavelet and Energy Detection Based Spectrum Sensing Techniques in Cognitive Radio Technology.

- MIT International Journal of Electronics and Communication Engineering, 3(2), 53-58.
- Mishali, M. y Eldar, Y.C. (2011). Wideband Spectrum Sensing at Sub-Nyquist Rates [Applications Corner]. IEEE Signal Processing Magazine, 28(4), 102-135. <https://doi.org/10.1109/MSP.2011.941094>
- Natarajan, B.K. (2006). Sparse Approximate Solutions to Linear Systems. SIAM Journal on Computing, 24(2), 227-234. <https://doi.org/10.1137/S0097539792240406>
- Olabiyyi, O. y Annamalai, A. (2012a). Extending the capability of energy detector for sensing of heterogeneous wideband spectrum. IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), IEEE (pp. 454-458). <https://doi.org/10.1109/CCNC.2012.6181033>
- Olabiyyi, O. y Annamalai, A. (2012b). Parallel multi-channel detection: A practical solution to energy detection of heterogeneous wideband spectrum. Sarnoff Symposium (SARNOFF), 2012 35th IEEE, IEEE (pp. 1-5). <https://doi.org/10.1109/SARNOF.2012.6222719>
- Penagos, H.P.; Bohórquez, M.; Rodríguez, D.; Maldonado, D.; Sánchez, C. y Galarza, C. (2013). Tecnología radiocognitiva en la banda ultra high frequency (UHF). Revista Tecnura, 18(39), 138-151. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.1.a10>
- Sahai, A.; Hoven, N. y Tandra, R. (2004). Some Fundamental Limits on Cognitive Radio. University of California. Recuperado de: http://people.eecs.berkeley.edu/~sahai/Papers/cognitive_radio_preliminary.pdf
- Shobana, S.; Saravanan, R. y Muthaiah, R. (2013). Matched Filter Based Spectrum Sensing on Cognitive Radio for OFDM WLANs. International Journal of Engineering and Technology, 5(1), 142-146. Recuperado de: <http://www.enggjournals.com/ijet/docs/IJET13-05-01-077.pdf>
- Sun, W.; Huang, Z.; Wang, F. y Wang, X. (2015). Compressive wideband spectrum sensing based on single channel. Electronics Letters, 51(9), 693-695. <https://doi.org/10.1049/el.2014.4223>
- Sutton, P.D.; Nolan, K.E. y Doyle, L.E. (2008). Cyclostationary Signatures in Practical Cognitive Radio Applications. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 26(1), 13-24. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2008.080103>
- Tian, Z. y Giannakis, G.B. (2006). A Wavelet Approach to Wideband Spectrum Sensing for Cognitive Radios. International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, IEEE (pp. 1-5). <https://doi.org/10.1109/CROWNCOM.2006.363459>
- Tropp, J.A.; Laska, J.N.; Duarte, M.F.; Romberg, J.K. y Baraniuk, R.G. (2010). Beyond Nyquist: Efficient Sampling of Sparse Bandlimited Signals. IEEE Transactions on Information Theory, 56(1), 520-544. <https://doi.org/10.1109/TIT.2009.2034811>
- Urkowitz, H. (1967). Energy detection of unknown deterministic signals. Proceedings of the IEEE, 55(4), 523-531. <https://doi.org/10.1109/PROC.1967.5573>
- Wang, Y.; Guo, C.; Sun, X. y Feng, C. (2015). Time-Efficient Wideband Spectrum Sensing Based on Compressive Sampling. IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring), IEEE (pp. 1-5). <https://doi.org/10.1109/VTCspring.2015.7146135>





Fibras vegetales colombianas como refuerzo en compuestos de matriz polimérica

Colombian vegetal fibers as a reinforcement in polymeric matrix composites

José Luis Suarez Castañeda¹, José William Restrepo Montoya², Adriana Quinchía Figueroa³, Fredy Andrés Mercado Navarro⁴

Fecha de recepción: 21 de abril de 2016

Fecha de aceptación: 23 de noviembre de 2016

Cómo citar: Suarez C., J.L.; Restrepo M., J.W.; Quinchía F., A. y Mercado N., F.A. (2017). Fibras vegetales colombianas como refuerzo en compuestos de matriz polimérica. *Revista Tecnura*, 21(51), 57-66. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.1.a04

Resumen

Contexto: Se realizó una búsqueda local de tejidos de fibras vegetales para determinar la composición de los grupos funcionales y morfología de su superficie antes y después de un tratamiento alcalino con miras a su empleo como refuerzo en compuestos de matriz polimérica.

Método: La búsqueda se desarrolló dentro del área metropolitana del Valle de Aburrá, Colombia. Las fibras se trataron por inmersión en NaOH disuelto al 6 % w/v por 48 horas, seguida por una neutralización en ácido acético al 1 % v/v por una hora. Posteriormente fueron secadas a 60 °C por 24 horas. Las técnicas empleadas para los análisis fueron la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y la microscopía electrónica de barrido (SEM).

Resultados: Se seleccionaron tejidos de fique, yute, corteza de coco, lino y algodón. Los análisis FTIR muestran una tendencia a la disminución de ácidos grasos, hemicelulosas, ligninas y enlaces β en la superficie de las fibras, mientras que las imágenes

SEM demuestran la remoción de impurezas, la exposición de rugosidades y la creación de espacios interfibrilares.

Conclusiones: El tratamiento alcalino podría favorecer el mecanismo de anclaje del polímero termofijo a la superficie de las fibras y la creación de enlaces entre las moléculas polares de las fibras y el polímero termofijo, disminuyendo el deslizamiento relativo entre matriz y refuerzo durante la aplicación de cargas.

Palabras clave: alcalinización, compuestos poliméricos, FTIR, propiedades físicas, polímeros termofijos, SEM, tejidos vegetales.

Abstract

Context: This research focuses on determining the surface composition of different plant fibers in order to evaluate their possible use as reinforcement in polymer matrix composites. For this, a search was made for several types of fibers, as well as an analysis of their morphology before and after alkaline treatment.

- 1 Ingeniero mecánico, magíster en Ingeniería. Docente de la Universidad EIA, Envigado, Colombia. Contacto: jose.suarez@eia.edu.co
- 2 Ingeniero metalúrgico, doctor en Ingeniería. Docente de la Universidad EIA, Envigado, Colombia. Contacto: jose.restrepo15@eia.edu.co
- 3 Ingeniera agrícola, especialista en Ingeniería Ambiental, magíster en Ingeniería Ambiental, doctora en Ingeniería. Docente de la Universidad EIA, Envigado, Colombia. Contacto: adriana.quinchia@eia.edu.co
- 4 Ingeniero mecánico, magíster en Simulación Numérica y Control. Investigador y docente de cátedra de la Universidad EIA, Envigado, Colombia. Contacto: fredy.mercado@eia.edu.co

Method: The search was carried out within the metropolitan area of the Aburrá Valley, Colombia. For the treatment of the fibers, we performed, in first place, an immersion in dissolved NaOH at 6% w/v for 48 hours; secondly, a neutralization in 1% v/v acetic acid for one hour; and thirdly, they were dried at 60°C for 24 hours. Additionally, the techniques used for the analyzes were Fourier Transform Infra-red Spectroscopy (FTIR) and Scanning Electron Microscopy (SEM).

Results: Fique, Jute, Coconut husk, Flax and Cotton fiber fabrics were selected. FTIR analyzes show a trend towards the decrease of fatty acids, hemicellulose, lignins and β -bonds on the surface of the fibers,

whereas SEM images show the removal of impurities, the exposure of roughness, and the creation of interfibril spaces.

Conclusions: Alkaline treatment could favor both the anchoring mechanism of the thermosetting polymer to the surface of the fibers and the creation of bonds between the polar molecules of the fibers and the thermosetting polymer. This could reduce the relative slip between matrix and reinforcement during the application of loads.

Keywords: alkalization, polymeric composites, FTIR, physical properties, thermoset polymers, SEM, vegetal fabrics.

INTRODUCCIÓN

Los costos económicos y medioambientales de la producción de fibras sintéticas, la preocupación por la sostenibilidad y el cambio climático, y la necesidad de materiales de alto desempeño, están motivando la búsqueda de fibras alternativas para ser empleadas como refuerzo en materiales compuestos de matriz polimérica (Castaño, Robayo y Sánchez, 2013). En este estudio se buscan tejidos vegetales disponibles en el área metropolitana del Valle de Aburrá (Antioquia) y se estudian los grupos funcionales y los cambios morfológicos de los tejidos antes y después de un tratamiento químico de alcalinización (Shenouda, 1979). Este tratamiento favorece la adhesión entre las fibras vegetales (polares) y los polímeros termofijos (también polares) como las resinas insaturadas de poliéster, epóxicas y fenoles. Las fibras vegetales están compuestas de celulosa, hemicelulosa y lignina, y por otros componentes que se consideran impurezas de la superficie, como pectinas y ceras. El contenido de humedad también desempeña un rol importante en la composición de una fibra y sus propiedades (Lamus, Plazas y Luna, 2015), al igual que en la compatibilidad con la matriz. Por otro lado, un contenido alto de celulosa conlleva a

una rigidez más alta y, por consiguiente, a ser una característica preferible para usar una fibra vegetal como refuerzo (Mwaikambo, 2002).

El interés actual por los refuerzos de fibras vegetales en compuestos de matriz polimérica se refleja en varios estudios: Aziz y Ansell (2004) mencionan un material compuesto por fibras de cáñamo y poliéster; Siva, Sankar, Amico y Ravindran (2013) abordan el efecto de la fracción de fibras de refuerzo en un compuesto formado por láminas de fibras de corteza de coco en una matriz de poliéster; Gowda, Naidu y Chhaya (1999) analizan las propiedades mecánicas de un compuesto de matriz de poliéster reforzado con fibras de yute no tratadas; Hossain, Islam, Vuurea y Verpoest (2013) usan refuerzo de yute en una matriz epóxica; Amico, Angrizani y Drummond (2010) emplean fibras de vidrio y sisal como refuerzo de una matriz de poliéster, y Shah, Schubel y Clifford (2013) recurren a tejidos de lino para reforzar una matriz de poliéster y elaborar álabes para aerogeneradores.

En el ámbito colombiano se destacan estudios, como los de Moreno y Trujillo (2007), quienes analizan las características de haces de fibra de guadua angustifolia, para evaluar la factibilidad de usarlos como posible refuerzo en compuestos; Cuéllar y Muñoz (2010), quienes abordan

refuerzos de guadua en una matriz de poliéster, y Mejía (2010), quien procesa y caracteriza fibras de bambú para ser usadas con el mismo fin. Los resultados de este estudio sugieren que la alcalinización podría mejorar las propiedades del compuesto en comparación con compuestos de fibras no tratadas.

METODOLOGÍA

Los tejidos vegetales utilizados en este estudio fueron buscados en puntos de venta dentro del área metropolitana del Valle de Aburrá, Colombia. Una vez determinadas las fibras vegetales disponibles en el mercado como fibras tejidas o no tejidas, se seleccionaron cinco de ellas con base en la resistencia a la tensión reportada en fuentes como Ken-gkhetkit y Amornsakchai (2012), y Chand y Fahim (2008).

La literatura sobre el tratamiento químico de fibras vegetales es extensa, siendo el proceso de alcalinización el más utilizado para remover hemicelulosas, ligninas y demás ácidos grasos y monosacáridos de la superficie de las fibras vegetales. Por otro lado, el estudio realizado por Le-Troedec *et al.* (2011) sugiere que la alcalinización es más efectiva para aumentar la fuerza de adhesión con la matriz polimérica por encima de otros procesos de tratamiento que usan polietilenimina (PEI) o ácidos como el EDTA. El tratamiento químico de las fibras consistió en agitarlas por 48 horas en solución de hidróxido de sodio (NaOH) disuelto al 6 % w/v en agua destilada (pH cercano a 14) (Aziz y Ansell, 2004; Mwaikambo, 2002). Pasadas 48 horas, los tejidos se extrajeron de la solución de NaOH y se sometieron a neutralización del pH alcalino, sumergiendo las fibras en una solución de ácido acético al 1 % en volumen por una hora (Terpáková *et al.*, 2012). Tras este periodo, los tejidos fueron retirados y lavados con abundante agua desionizada hasta que el pH del baño fuera lo más neutro posible (Le-Troedec *et al.*, 2011). Seguidamente, los tejidos se secaron en un horno a 60 °C durante 24 horas, tras lo cual fueron empacados

en bolsas impermeables con cierre hermético (Ziploc®) y almacenados en un lugar fresco y seco (Sever *et al.*, 2012).

Los grupos funcionales presentes en la superficie de cada tipo de fibra antes y después del tratamiento se identificaron mediante espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR, por su sigla en inglés) usando un equipo Perkin Elmer Spectrometer 100. Se empleó una pequeña cantidad de fibras, las cuales fueron cortadas y apiladas en pequeños montículos y luego presionadas hasta alcanzar un espesor cercano a 1 mm.

Se obtuvieron también imágenes de las fibras antes y después del tratamiento usando microscopía electrónica de barrido (SEM, por su sigla en inglés) para dilucidar posibles cambios morfológicos en las fibras inducidos por el tratamiento químico. Para ello se utilizó un equipo JEOL JSM-6490LV. Antes de las observaciones, las muestras fueron recubiertas por una fina capa de oro mediante un equipo de deposición al vacío Denton Vacuum Desk IV.

RESULTADOS

Las fibras vegetales seleccionadas para este estudio fueron las de fique, yute, corteza de coco, lino y algodón. Los tejidos de fibra de fique fueron suministrados por la empresa Comercializadora de Empaques S y S S.A.S.; los de fibra de yute, por Agroempaques S.A. en forma de bolsas o costales; la lámina no tejida de fibras aglomeradas de corteza de coco fue adquirida en Textec de Colombia S.A.S., y los tejidos de fibras de lino y algodón (lona costeña) en Telas El Faisán S.A. Se encontró que la venta de tejidos de fibras vegetales autóctonas está focalizada en unos pocos negocios dentro de las centrales de abasto, en tiendas de artesanías, tiendas textiles, plazas de mercado, tiendas de productos ecológicos y a través de proyectos de emprendimiento como Textec de Colombia S.A.S e Hilco Fibras Naturales S.A. Las fibras vegetales de interés y dos de sus propiedades mecánicas están resumidas en la tabla 1.

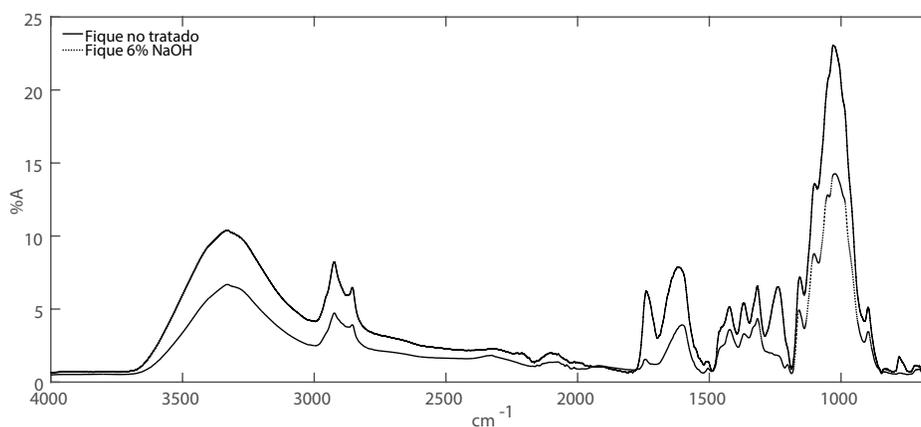
Tabla 1. Propiedades mecánicas de las fibras vegetales seleccionadas

Fibra vegetal	Resistencia a la tensión [MPa]	Módulo de Young [GPa]
Lino	450-1100	27,6
Algodón	287-800	5,5-12,6
Yute	393-773	13-26,5
Fique	511-635	9,4-22
Corteza de coco	131-175	4-6

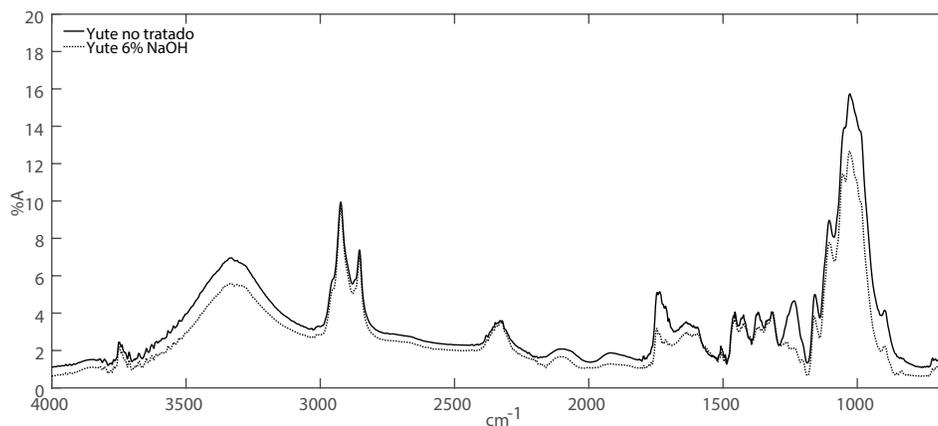
Fuente: Kengkhetkit y Amornsakchai (2012); Chand y Fahim (2008).

En las figuras 1 a 5 se aprecia el espectro infrarrojo de absorbancia de las muestras de fibras vegetales, donde una curva indica la fibra sin tratamiento químico y la restante la misma fibra tratada con la solución de NaOH al 6 % w/v. Las figuras 1, 2 y 3 corresponden a las fibras de fique, yute y corteza de coco.

La influencia del tratamiento químico es más notoria para el fique, el yute y el coco que en el caso del lino (figura 4) y el algodón (figura 5).

**Figura 1.** FTIR de fibras de fique con y sin tratamiento químico

Fuente: elaboración propia.

**Figura 2.** FTIR de fibras de yute con y sin tratamiento químico

Fuente: elaboración propia.

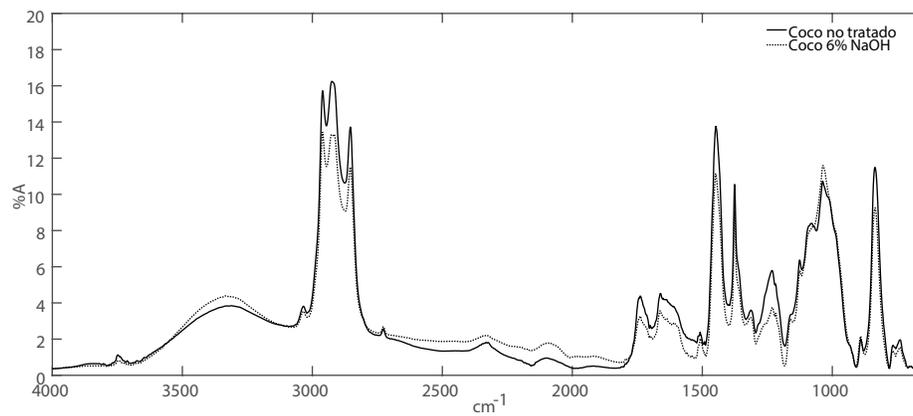


Figura 3. FTIR de fibras de corteza de coco con y sin tratamiento químico

Fuente: elaboración propia.

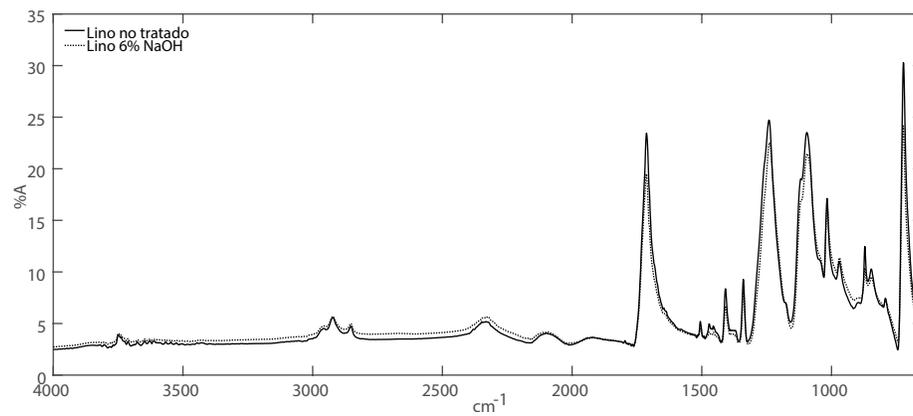


Figura 4. FTIR de fibras de lino con y sin tratamiento químico

Fuente: elaboración propia.

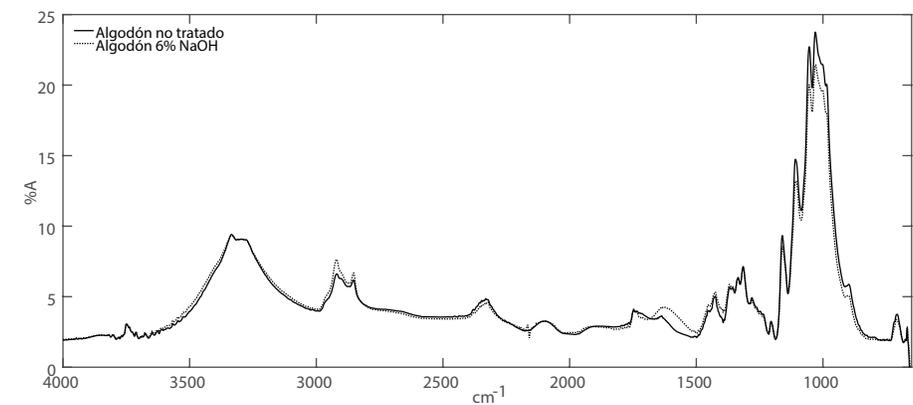


Figura 5. FTIR de fibras de algodón con y sin tratamiento químico

Fuente: elaboración propia.

La tabla 2 presenta una comparación entre las tendencias obtenidas para cada tipo de fibra al tratarlas químicamente, donde “Al, Y, L, F, C” corresponden con algodón, yute, lino, fique y corteza de coco, mientras que “A, =, D” indican que la concentración de los grupos funcionales correspondientes (absorbancia) aumenta, permanece igual y disminuye, respectivamente. Las figuras 6, 8, 9 y 10 presentan imágenes SEM de las fibras tratadas y no tratadas de algodón, corteza de coco, fique y yute, respectivamente.

Tabla 2. Comparación entre tendencias propuestas por (Mwaikambo, 2002) y estudio actual

Frecuencia [cm ⁻¹]	(Mwaikambo, 2002)	Al	Y	L	F	C
Ácidos grasos						
3200-3600	D	=	D	A	D	A
1736-1740	D	=	D	=	D	D
1596	D	A	D	D	D	D
Hemicelulosas						
1654	D	A	D	D	D	D
1000-1500	D	D	D	D	D	D
1245-1259	D	=	D	D	D	D
Ligninas						
1384	D	A	D	D	D	=
Enlaces β-glicosídicos						
898	D	D	D	A	D	=

Fuente: elaboración propia a partir de Mwaikambo (2002).

En la figura 6a se pretende mostrar el recubrimiento que envuelve a la fibra de algodón antes del tratamiento, mientras que en la figura 6b, la textura presente en la superficie.

En la figura 7 se aprecia una imagen SEM de fibras de lino no tratadas. Las fibras alcalinizadas presentan una apariencia muy similar y, por ello, no se presentan.

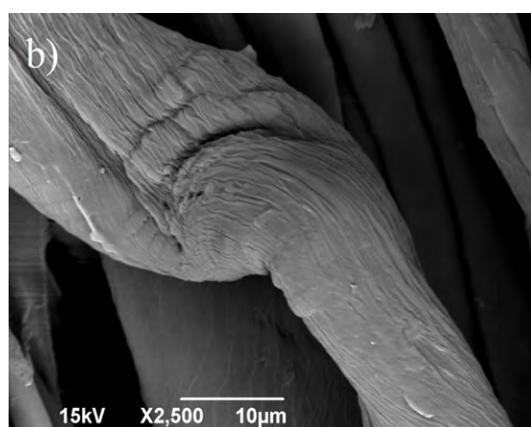
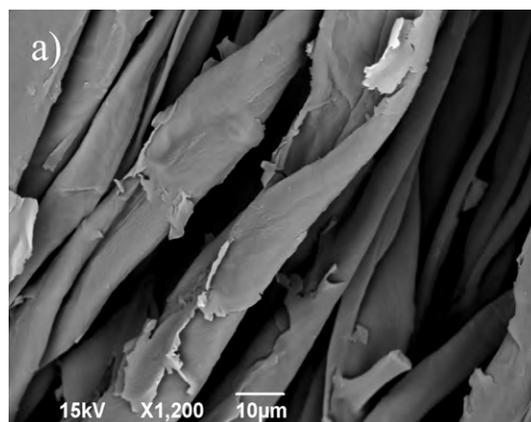


Figura 6. Imagen SEM de fibras de algodón: a) sin tratamiento y b) con tratamiento

Fuente: elaboración propia.

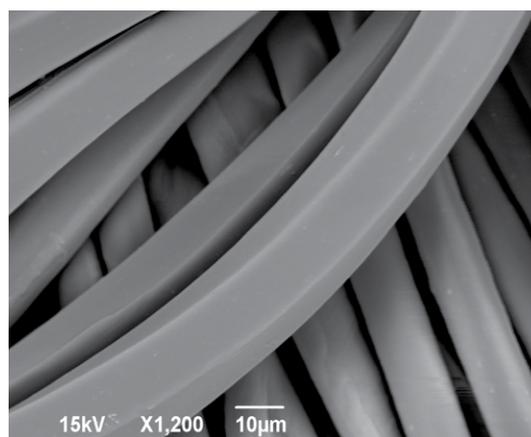


Figura 7. SEM de fibras de lino sin tratamiento

Fuente: elaboración propia.

En la figura 8a se aprecia una fibra de corteza de coco completamente cubierta por impurezas, mientras que en la figura 8b observamos una superficie limpia y con una textura rugosa.

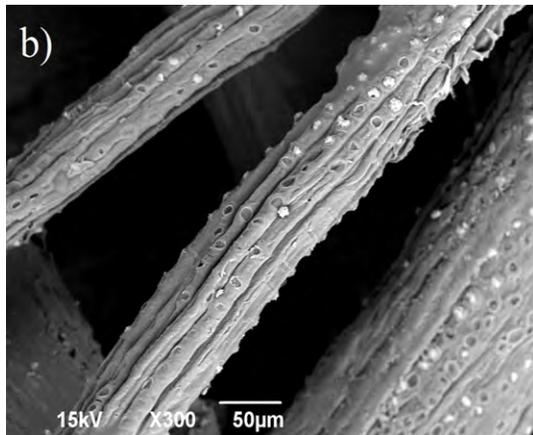
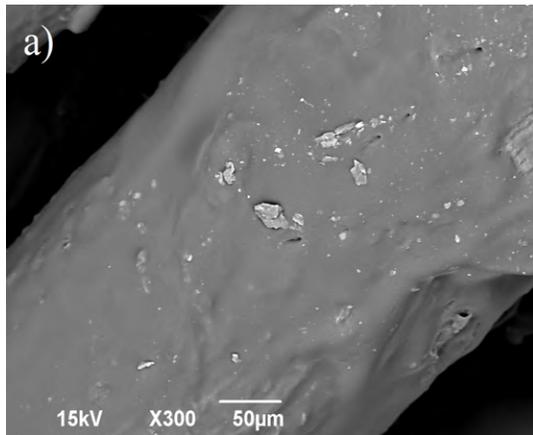


Figura 8. Imagen SEM de fibras de corteza de coco: a) sin tratamiento y b) con tratamiento

Fuente: elaboración propia.

En la figura 9 también podemos apreciar la remoción de impurezas y aumento en la textura de la superficie de la fibra de fique con el tratamiento alcalino.

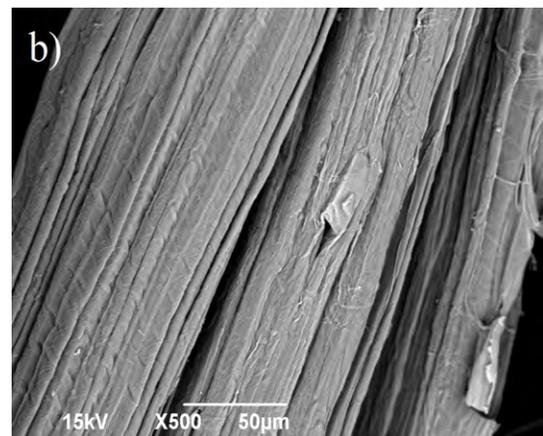
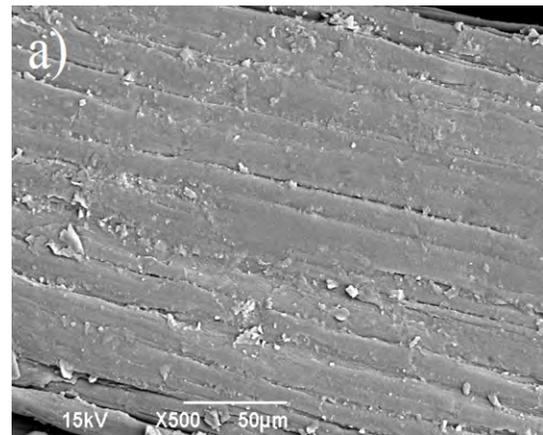


Figura 9. Imagen SEM de fibras de fique: a) sin tratamiento y b) con tratamiento

Fuente: elaboración propia.

El cambio en las fibras de yute se muestra en la figura 10. La limpieza de la superficie evidencia una subdivisión de cada fibra en otras fibras de menor diámetro y la creación de espacios interfibrilares.

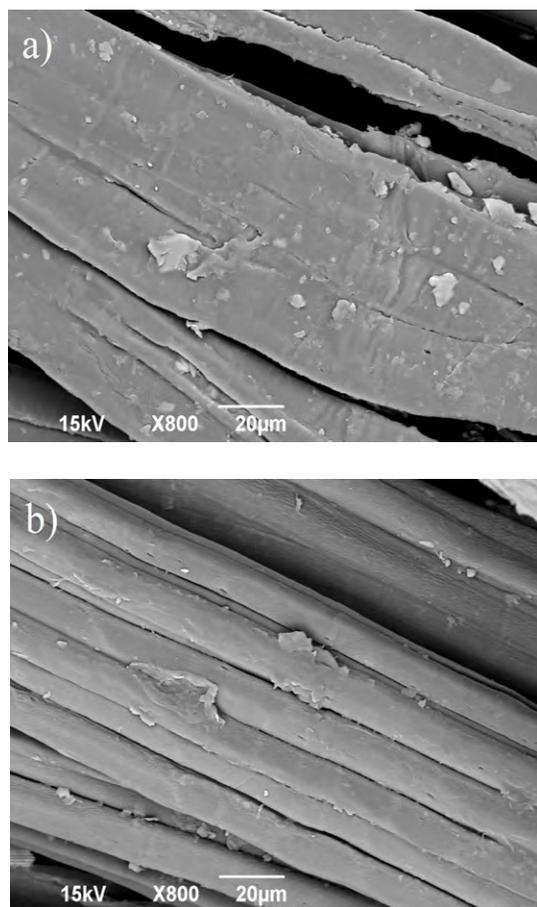


Figura 10. Imagen SEM de fibras de yute: a) sin tratamiento y b) con tratamiento

Fuente: elaboración propia.

Las imágenes SEM presentadas evidencian los cambios morfológicos de la superficie de las fibras. La remoción de impurezas es más evidente en las figuras 8, 9 y 10, que corresponden a las fibras de corteza de coco, fique y yute, es decir, aquellas adquiridas en forma de tejidos para costales o de láminas no tejidas con fibras orientadas aleatoriamente, como en el caso del coco.

CONCLUSIONES

La espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) permitió obtener los picos de absorbancia de interés para el estudio, que

corresponden a las frecuencias de los grupos hidroxilos (-OH), carboxilos, carbonilos, lignina y enlaces β -glicosídicos, los cuales han sido reportados en el estudio realizado por Mwaikambo (2002). Las tendencias con el tratamiento alcalino deberían ser las siguientes: reducción de grupos OH de las hemicelulosas debido a la reacción con el NaOH, que se evidencia a longitudes entre 1.000 y 1.500 cm^{-1} . Reducción de ácidos grasos por la disminución de los picos entre 3.200 y 3.600 cm^{-1} . Reducción de trazas de ácidos grasos (grupo carboxílico) por disminución de pico entre 1.736 y 1.740 cm^{-1} . Reducción de hemicelulosas por disminución del pico alrededor de 1.654 cm^{-1} (reducción de enlaces C=O). Reducción de ácidos grasos por disminución del pico en 1.596 cm^{-1} . Reducción de ligninas y hemicelulosas debido a la disminución de los picos en 1.384 y entre 1.245 y 1.259 cm^{-1} , respectivamente. Por último, la reducción de intensidad del pico en 898 cm^{-1} , el cual indica la presencia de enlaces β -glicosídicos entre monosacáridos (azúcares simples). Al observar los resultados, tenemos que las fibras de fique, yute y coco presentan una mayor afinidad con los reactivos, seguidas del algodón y el lino. La poca variación entre los espectros infrarrojos de estos dos tipos de fibra puede presentarse como una evidencia de la influencia que tienen los tratamientos de estas fibras previos a su comercialización. El uso de ácidos, álcalis (como el NaOH), sales y agentes oxidantes son químicos de uso común para el descrude, blanqueo y teñido de fibras vegetales (Locuán, 2012).

Las imágenes SEM de las fibras de corteza de coco, fique y yute (figuras 8-10) muestran que el tratamiento cambia significativamente la morfología de la superficie. Se evidencia que el tratamiento remueve impurezas, de manera efectiva, lo cual genera un aspecto más limpio, con interfaces de separación entre fibrillas individuales y con una superficie aserrada en el caso del algodón, el coco y el fique. Con respecto a las fibras de lino, es posible que los tratamientos previos, comentados en el párrafo anterior, hayan removido la mayoría de

las grasas y azúcares, lo que evidenció un cambio nulo entre la imagen sin tratamiento (figura 10) y con tratamiento alcalino (no mostrada).

Con el tratamiento alcalino en solución de NaOH al 6 % w/v se consiguió remover ligninas, pectinas, hemicelulosas y otras impurezas de la superficie de las fibras vegetales. Por un lado, el tratamiento promueve la formación de enlaces entre materiales polares como la celulosa y la mayoría de polímeros termofijos (Rothon, 2016), mientras que, por otro, la exposición de rugosidades y creación de espacios interfibras favorece el mecanismo de anclaje del polímero a las fibras, beneficiando la transferencia de carga entre matriz y refuerzo durante la aplicación de cargas. En este sentido, el tratamiento alcalino sobre fibras vegetales supone mejorar las propiedades mecánicas de un compuesto elaborado con refuerzo de fibras tratadas en comparación con uno de fibras no tratadas (Le-Troedec *et al.*, 2011; Avella *et al.*, 1998). Las propiedades mecánicas de un compuesto podrían aprovechar las propiedades de más de un tipo de fibra vegetal.

FINANCIAMIENTO

Los resultados presentados forman parte del proyecto “Estudio numérico y experimental para determinar los porcentajes de sustitución de fibras sintéticas por fibras vegetales autóctonas usadas como refuerzo de materiales compuestos empleados en la elaboración de aspas de aerogeneradores de eje vertical”. El proyecto ha sido financiado por la Universidad EIA.

AGRADECIMIENTOS

Se reconoce gratamente el apoyo del personal del Laboratorio de Caracterización de Materiales para las mediciones FTIR, a la Universidad de Antioquia por la prestación del servicio SEM, y los recursos brindados por la Universidad EIA para el desarrollo del proyecto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amico, S.C.; Angrizani, C.C. y Drummond, M.L. (2010). Influence of the stacking sequence on the mechanical properties of glass/sisal hybrid composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29(2), 179-189.
- Avella, M.; Casale, L.; Dell’erba, R.; Focher, B.; Martuscelli, E. y Marzetti, A. (1998). Broom fibers as reinforcing materials for polypropylene-based composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 1068-1077.
- Aziz, S.H. y Ansell, M.P. (2004). The effect of alkalization and fibre alignment on the mechanical and thermal properties of kenaf and hemp bast fibre composites: part 2—cashew nut shell liquid matrix. *Composites Science and Technology*, 64, 1231-1238.
- Castaño T., J.O.; Robayo N., E. y Sánchez C., E.H. (2013). Materiales de construcción sostenibles. Comportamiento mecánico y durabilidad de morteros con cenizas volantes activadas alcalinamente. *Revista Tecnura*, 17(2), 79-89.
- Chand, N. y Fahim, M. (2008). *Tribology of natural fiber polymer composites*. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd.
- Cuéllar, A. y Muñoz, I. (2010). Fibra de guadua como refuerzo de matrices poliméricas. *Dyna*, (162), 137-142.
- Gowda, T.M.; Naidu, A.C. y Chhaya, R. (1999). Some mechanical properties of untreated jute fabric-reinforced polyester composites. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 30(3), 277-284.
- Hossain, M.R.; Islam, M.A.; Vuurea, A.V. y Verpoest, I. (2013). Effect of fiber orientation on the tensile properties of jute epoxy laminated composite. *Journal of Scientific Research*, 5(1), 43-53.
- Kengkhetkit, N. y Amornsakchai, T. (2012). Utilisation of pineapple leaf waste for plastic reinforcement: 1. A novel extraction method for short pineapple leaf fiber. *Industrial Crops and Products*, 40, 55-61.
- Lamus B., F.A.; Plazas B., M.A. y Luna T., P. (2015). Resistencia de una conexión pernada solicitada a cizalladura doble paralela a la fibra para estructuras

- de guadua angustifolia. *Revista Tecnura*, 19(43), 52-62.
- Le-Troedec, M.; Rachini, A.; Peyratout, C.; Rossignol, S.; Max, E.; Kaftan, O.; ... Smith, A. (2011). Influence of chemical treatments on adhesion properties of hemp fibres. *Journal of Colloid and Interface Science*, 356, 303-310.
- Lockuán, F. (2012). Tintorería. En: F. Lockuán. *La industria textil y su control de calidad Versión 0.1*. Recuperado de: https://issuu.com/fidel_lockuan/docs/vii_la_industria_textil_y_su_control_de_calidad
- Mejía, M.E. (2010). *Extracción y caracterización mecánica de las fibras de bambú (guadua angustifolia) para su uso potencial como refuerzo de materiales compuestos*. Tesis de Maestría. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Moreno, L.E. y Trujillo, E.E. (2007). Estudio de las características físicas de haces de fibra de Guadua Angustifolia. *Scientia et Technica*, (34), 613-617.
- Mwaikambo, L.Y. (2002). Chemical modification of Hemp, Sisal, Jute, and Kapok fibers by alkalization. *Journal of Applied Polymer Science*, 84, 2222-2234.
- Rothon, R. (2016). Particulate fillers in thermoset plastics. En: S. Palsule (ed.). *Polymers and Polymeric Composites: A reference series* (pp. 1-15). Berlín: Springer.
- Sever, K.; Sarikanat, M.; Seki, Y.; Erkan, G.; Erdogan, U.H. y Erden, S. (2012). Surface treatments of jute fabric: The influence of surface characteristics on jute fabrics and mechanical properties of jute/polyester composites. *Industrial Crops and Products*, 35, 22-30.
- Shah, D.U.; Schubel, P.J. y Clifford, M.J. (2013). Can flax replace E-glass in structural composites? A small wind turbine blade case study. *Composites: Part B*, 52, 172-181.
- Shenouda, S.G. (1979). The structure of cotton cellulose. En: F. Happey (ed.). *Applied Fibre Science* (pp. 275-309). Vol. 3. Londres: Academic Press.
- Siva, W.; Sankar, I.; Amico, S.C. y Ravindran. (2013). Effect of fiber volume fraction on the mechanical properties of coconut sheath/USP composite. *Journal of Manufacturing Engineering*, 8(1), 60-63.
- Terpáková, E.; Kidalová, L.; Estoková, A.; Cigasová, J. y Stevulová, N. (2012). Chemical modification of hemp shives and their characterization. *Procedia Engineering*, 42, 931-941.





Efecto del gas en la velocidad de onda de corte de suelos arenosos densificados con explosivos

Effect of gas on shear wave velocity of sandy soils densified with explosives

Carlos Alberto Vega-Posada¹, Alfonso Mariano Ramos-Cañón², Edwin Fabián García Aristizábal³

Fecha de recepción: 10 de marzo de 2016

Fecha de aceptación: 23 de noviembre de 2016

Cómo citar: Vega-Posada, C.A.; Ramos-Cañón, A.M. y García-Aristizábal, E.F. (2017). Efecto del gas en la velocidad de onda de corte de suelos arenosos densificados con explosivos. *Revista Tecnura*, 21(51), 67-80. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.1.a05

Resumen

Contexto: Los ensayos de velocidad de onda de corte (V_s), son comúnmente utilizados para estimar el incremento en resistencia de suelos densificados con explosivos. En algunos casos históricos los ensayos de V_s realizados después del proceso de mejoramiento de suelo no muestran un incremento significativo en la resistencia del suelo, aun cuando la superficie del terreno se asienta más de 0,50 m. Se cree que esta respuesta se debe a la presencia de gas en la masa de suelo.

Método: En este trabajo se presentan los resultados de ensayos triaxiales monotónicos realizados en muestras de suelos arenosos gaseosos medianamente densos, para evaluar el efecto del gas ocluido en la respuesta a la velocidad de onda de corte en arenas densificadas con explosivos. Muestras de arena fueron recolectadas de un depósito de arena suelta localizado en Carolina del Sur, Estados Unidos, y el cual fue densificado *in situ* con explosivos. Las muestras fueron consolidadas a las condiciones de esfuerzo efectivo *in situ*, las cuales se consideran representativas de las condiciones de esfuerzo en el momento de realizar la densificación con explosivos.

Resultados: Los resultados de los ensayos triaxiales, realizados bajo condiciones no-drenadas globales, mostraron que, independientemente de la densidad de la muestra, el gas hace que los valores de velocidad de onda de corte obtenidos para las arenas gaseosas se aproximen a los valores de velocidad de onda de corte obtenidos en las muestras saturadas ensayadas bajo condiciones drenadas. Además, este comportamiento tiende a ser más pronunciado a medida que el suelo es más denso.

Conclusiones: Esta respuesta podría ofrecer algunas luces sobre porqué la velocidad de corte no se incrementa significativamente en suelos densificados con explosivos aun cuando la densidad se incrementa considerablemente.

Palabras clave: arenas sueltas, densificación con explosivos, licuación, mejoramiento de suelos, velocidad de onda de corte

Abstract

Context: Shear wave velocity tests (V_s) are commonly used to estimate the increase in resistance of explosive densified soils. In some historical cases, V_s tests performed after the soil improvement process

- 1 Ingeniero civil, doctor en Ingeniería Civil. Profesor asistente, Grupo de Investigación en Infraestructura (GII), Escuela Ambiental, Universidad de Antioquia, Calle 67 # 53-108. A. A. 1226, Medellín, Colombia. Contacto: carlosa.vega@udea.edu.co
- 2 Ingeniero civil, doctor en Ingeniería. Profesor asociado, Instituto Geofísico, Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana, Calle 67 # 53-108. A. A. 1226, Bogotá, Colombia. Contacto: a-ramos@javeriana.edu.co
- 3 Ingeniero civil, doctor en Ingeniería Civil. Profesor Asociado, grupo de Investigación en Infraestructura (GII), Escuela Ambiental, Universidad de Antioquia, Calle 67 # 53-108. A. A. 1226, Medellín, Colombia. Contacto: edwin.garcia@udea.edu.co

do not show a significant increase in soil resistance, even though the soil surface sits more than 0.50 m. It is believed that this response is due to the presence of gas on the soil mass.

Method: This paper presents the results of monotonic triaxial tests performed on samples of dense gaseous sandy soils to evaluate the effect of occluded gas on the response to the shear wave velocity in densified sands with explosives. For sand sampling, it was collected from a loose sand deposit located in South Carolina, USA. These samples were densified in-situ with explosives, and consolidated to the in-situ effective stress conditions, which are considered representative in the conditions of effort at the moment of the densification with explosives.

Results: Triaxial tests were performed under global non-drained conditions. The results of these tests show that gas causes the shear wave velocity values obtained for the gaseous sands to approximate the shear wave velocity values obtained in the saturated samples tested under drained conditions. In addition, behavior tends to be more pronounced as the soil is denser.

Conclusions: These response may offer some insights as to why the shear wave velocity does not increase significantly in densified soils with explosives, even though the density increases considerably.

Keywords: Loose sands, blast densification, liquefaction, soil improvement, shear wave velocity

INTRODUCCIÓN

La densificación con explosivos es una técnica común usada para densificar grandes áreas que poseen horizontes de suelos potencialmente licuables, con el objeto de prevenir o mitigar el efecto de licuación y flujo inducido por fuerzas sísmicas. La principal limitación de esta técnica es que el diseño es principalmente empírico y no existe un procedimiento teórico bien establecido y disponible para conducir el diseño de este tipo de densificación, y para determinar el número de series de explosiones necesarias para alcanzar la densidad objetivo (Gohl, Jefferies, Howie y Diggle, 2000; Ramos, 2015). La densificación con explosivos consiste en colocar cargas explosivas dentro de un horizonte de suelo que necesita ser densificado y detonarlas en múltiples intervalos para generar una carga cíclica. La onda de alta presión rompe cualquier vínculo entre las partículas ocasionado por procesos de cementación y adicionalmente genera exceso de presión de poros. A medida que el exceso de presión de poros se incrementa, el esfuerzo efectivo de confinamiento disminuye hasta cero y se logra la licuación del material. Después de darse la licuación y a medida que la presión de poros

se disipa, el suelo alcanza un estado más denso y el esfuerzo efectivo de confinamiento regresa a los valores previos al proceso de densificación. Dependiendo de la distribución granulométrica, la densidad inicial de la arena y del programa de densificación con explosivos, se pueden lograr deformaciones axiales verticales hasta de 4 % en una serie de detonación (Vega-Posada, 2012). Es posible alcanzar mayores niveles de compactación implementando series adicionales de detonaciones (Narsilio, 2006; Narsilio, Santamarina, Hebel y Bachus, 2009; Vega-Posada, 2012; Vega-Posada, Zapata-Medina y García-Aristizábal, 2014).

Las principales limitaciones de la técnica de densificación con explosivos consisten en que esta metodología de diseño es ampliamente empírica y la verificación de los niveles de densificación muestra resultados contradictorios en algunos casos de estudio. En estos últimos, inclusive, aunque el horizonte de suelo ha sido densificado y la superficie del suelo se asienta casi inmediatamente después de la explosión, las verificaciones realizadas con equipos de campo, como: ensayo de penetración de cono (*cone penetration test*, CPT), ensayo de penetración estándar (*standard penetration test*, SPT) y el ensayo de velocidad de onda

cortante (*shear wave velocity test*, V_s), sugieren que la masa de suelo no se ha mejorado. Estos resultados traen como consecuencia algunas inquietudes acerca del comportamiento posterior del suelo y genera dudas sobre si la arena suelta ha sido mejorada hasta el punto de evitarse la licuación o no.

Debido a que se producen y liberan grandes cantidades de gas durante el proceso de densificación, y una parte de este gas permanece atrapado en el suelo por muchos años (Finno, Gallant y Sabatini, 2016; Okamura, Ishihara y Tamura, 2006; Okamura *et al.*, 2011; Vega-Posada, 2012; Yegian, Eseller-Bayat, Alshawabkeh y Ali, 2007), los depósitos de arena densificados con explosivos pueden ser clasificados como suelos gaseosos (Ramos, Felipe y Vega-Posada, 2016; Vega-Posada, Finno y Zapata-Medina, 2014). Los suelos gaseosos son un tipo especial de suelo donde el gas (i.e., aire) existe en una condición ocluida y esta fase gaseosa no está conectada con la atmósfera (Nageswaran, 1983). En este artículo se presentan los resultados experimentales de un programa de laboratorio conducido con el objeto de evaluar el efecto del gas ocluido en la velocidad de onda de corte en arenas densificadas con explosivos. Para este propósito, se realizaron un total de 20 ensayos triaxiales monotónicos en muestras de arena alteradas medianamente densas. Los resultados mostraron que, inclusive, una pequeña cantidad de gas modifica la respuesta de la muestra. Se encontró que debido a la presencia de gas, la velocidad de onda de corte V_s no se incrementa considerablemente a medida que la densidad de la muestra se incrementa, lo que podría explicar resultados obtenidos en depósitos de arena mejoradas con explosivos.

METODOLOGIA

Se preparó un programa experimental de laboratorio, consistente en una serie de ensayos triaxiales, con el propósito de evaluar el efecto de las burbujas de gas ocluidas en el comportamiento mecánico y en la velocidad de onda de corte de arenas densificadas con explosivos. Las muestras de arena

fueron recolectadas de un depósito donde se construye un relleno sanitario, y fueron consolidadas anisotrópicamente a niveles de esfuerzos *in situ* y relaciones de vacío representativas del horizonte de suelo en estudio. Para cada relación de vacíos, se prepararon muestras saturadas y gaseosas con grados de saturación entre 83,5 y 98 % para cuantificar el efecto del gas en la respuesta de V_s posterior a la densificación. Debido a que el propósito del programa experimental es evaluar la respuesta de V_s en arenas a medida que estas se densifican por medio del uso de los explosivos, se consideraron solo muestras con relaciones de vacío por debajo de la línea de estado crítico (más denso que la densidad crítica). Tanto el montaje experimental como la técnica utilizada para la preparación de las muestras gaseosas (i.e., sedimentación en agua) limitaron el programa experimental de las muestras de arena medianamente densas debido a que no era posible obtener muestras de mayores relaciones de vacíos con esta técnica. Adicionalmente, el programa experimental incluyó una serie de ensayos triaxiales a compresión en muestras menos densas que la densidad crítica de la arena para determinar la línea de estado crítico (LEC). Esta última se usó para evaluar la respuesta de los ensayos triaxiales monotónicos desde el punto de vista conceptual del estado crítico de suelos.

Aunque el nitrógeno es el gas atrapado que predomina y permanece por más tiempo en el suelo después del proceso densificación con explosivos, este no es fácil de disolver en agua y requiere de altas presiones para poder alcanzar un grado deseado de saturación, esto hace que el nitrógeno sea impráctico para este tipo de trabajos de laboratorio. Por tanto, en lugar de nitrógeno, se utilizó agua carbonatada para preparar las muestras de arena gaseosa. El agua carbonatada (agua saturada con dióxido de carbono) es fácilmente obtenida en el laboratorio, no es corrosiva, no es inflamable y requiere de presiones muy bajas para alcanzar un grado de saturación deseado en las muestras de suelo. En éste tipo de muestras, la resistencia al cortante no drenada en condiciones saturadas es un poco

menor (i.e., un poco más conservativa) que las resistencias obtenidas con muestras saturadas con nitrógeno (Grozic, Imam, Robertson y Morgenstern, 2005). Sin embargo, la tendencia general de los resultados con muestras que contienen gas es la misma, independiente de que el proceso de saturación se haga con dióxido de carbono o nitrógeno.

Descripción del material

Las muestras de arena se recolectaron de un horizonte de suelo sobre el cual existe un relleno sanitario. La zona de estudio está localizada cerca de la ciudad de Charleston (Carolina del Sur, Estados Unidos). El horizonte de suelo se encuentra a unas profundidades entre 7,5 y 13 m y en él se realizó un proceso de densificación con explosivos con el objeto de incrementar la resistencia del suelo a la licuación y flujo (véase Vega-Posada *et al.*, 2014). Las muestras fueron tomadas a una profundidad aproximada de 10 metros. La figura 1 presenta la curva granulométrica de la arena. El porcentaje de finos que pasa la malla No. 200 para granulometría seca y húmeda fue de 1,5 y 7 %, respectivamente. El coeficiente de uniformidad (C_u) y de curvatura (C_c) fueron 1,72 y 1,06, respectivamente. Las relaciones

de vacíos mínima (e_{min}) y máxima (e_{max}) fueron 0,62 y 1,05, respectivamente; la gravedad específica (G_s) fue de 2,66. De acuerdo con el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS), el material se clasifica como una arena pobremente gradada (SP).

Equipo para ensayos

La figura 2 muestra un esquema del aparato triaxial utilizado para la realización de los ensayos. Estos se ejecutaron en un sistema de ensayo triaxial dinámico avanzado (*Advanced Dynamic Triaxial Testing System, DYNNTTS*) desarrollado por GDS Instruments. Este sistema combina una celda triaxial de 2 MPa con un pistón dinámico capaz de aplicar fuerzas axiales hasta de 10 kN o deformaciones axiales hasta de 100 mm con frecuencias hasta de 2 Hz. El sistema consiste de un controlador de presión de poros o de volumen y un controlador de la presión de cámara o de volumen con rangos de presión entre 0 y 200 kPa y capacidad volumétrica de 200 cm³. Los controladores pueden aplicar cambios de presiones y volúmenes de 0,2 kPa y 1 mm³, respectivamente. La presión de poros se mide por medio de un transductor de presión de poros localizado en la base de la muestra.

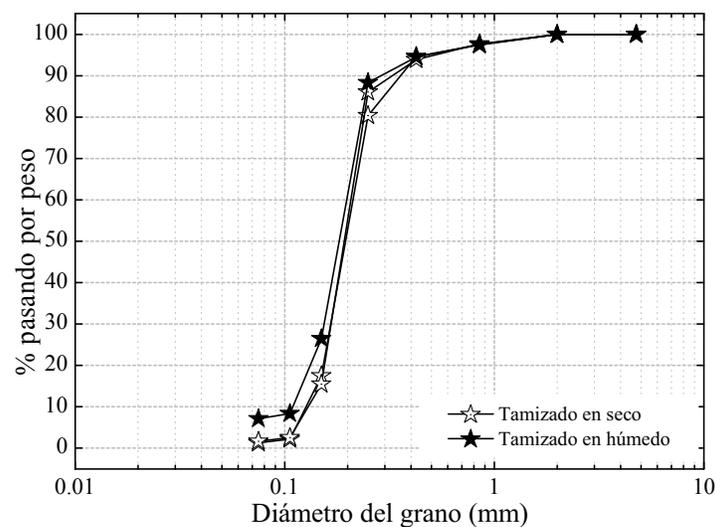


Figura 1. Curva de distribución granulométrica típica de la arena

Fuente: elaboración propia.

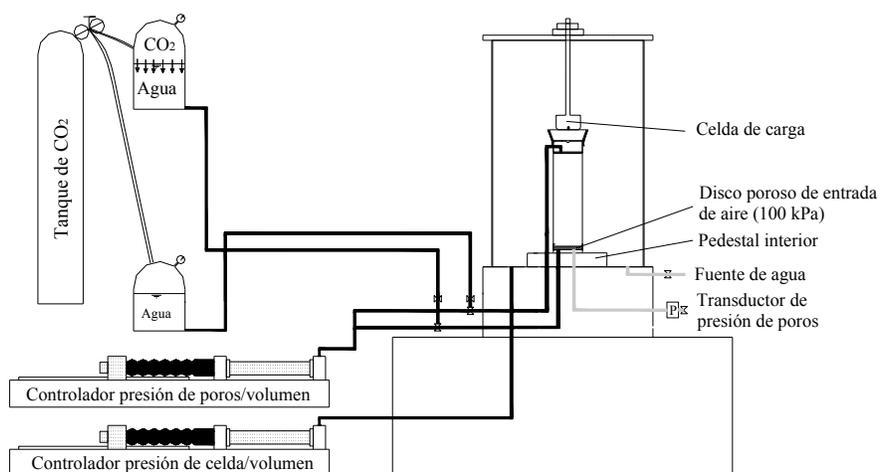


Figura 2. Diagrama esquemático del aparato triaxial

Fuente: elaboración propia.

Preparación de la muestra

En el programa de ensayos planeado, las muestras de arena gaseosas y las muestras de arena saturadas de control usadas para los ensayos triaxiales monotónicos se prepararon usando la técnica de sedimentación en agua. Se considera que esta técnica de preparación del suelo da como resultado muestras uniformes que reproducen acertadamente la respuesta de muestras inalteradas tomadas de depósitos de suelos marinos (Ghionna y Porcino, 2006; Vaid y Sivathayalan, 2000; Vaid, Sivathayalan y Stedman, 1999). Las muestras de suelo utilizadas para determinar la línea de estado crítico fueron preparadas mediante la técnica de compactación húmeda, debido a que no es posible obtener muestras con relaciones de vacíos mayores por medio de la técnica de sedimentación en agua; además, es necesario tener muestras de arenas sueltas con el propósito de obtener una línea de estado crítico confiable. Para la preparación de las muestras se siguieron los procedimientos propuestos por Chaney y Mulilis (1978) y Ladd (1978); adicionalmente, se tiene en cuenta que, aunque la ruta de esfuerzos efectiva y la respuesta esfuerzo-deformación es altamente influenciada por la preparación de la muestra (Vaid y Sivathayalan,

2000; Vaid *et al.*, 1999), la respuesta en un estado permanente a altos niveles de esfuerzo no se ve influenciada por este proceso. Las muestras preparadas bajo diferentes técnicas convergen en la misma curva del espacio $e-q-p'$, mientras la respuesta del suelo sea contractiva (Been, Jefferies y Hachey, 1991; Castro, Seed, Keller y Seed, 1992; Poulos, Castro y France, 1985; Verdugo e Ishihara, 1996). Been, Jefferies y Hachey (1991) concluyeron que las muestras de suelo preparadas por la metodología sedimentación en agua y compactación húmeda convergen en la misma línea de estado crítico.

Las dimensiones de las muestras utilizadas fueron aproximadamente de 50 mm de diámetro y 100 mm de altura. El procedimiento para la preparación de las muestras fue similar al presentado previamente por Chern (1981; 1985). En la preparación de la muestra, un molde compuesto por tres partes y una membrana se colocaron en el pedestal inferior del triaxial. Posteriormente, se generó un vacío de 20 kPa en el molde para hacer que la membrana se adhiriera internamente a este durante la preparación de la muestra. El molde se llenó con agua de-aireada y luego se depositó la arena bajo condiciones saturadas.

La arena fue depositada en la parte baja del molde (cerámica porosa) por medio de un embudo,

el cual se levantaba lentamente a medida que se llenaba el molde para permitir la sedimentación de las partículas de arena. Durante este procedimiento se mantuvo la boquilla del embudo aproximadamente 10 mm por encima de las partículas previamente sedimentadas. Después de alcanzar la altura objetivo de la muestra, se instaló el tope superior dejando la línea de drenaje abierta, de tal manera que se permitiera la salida del aire atrapado y se evitaran excesos de presión de poros sobre la muestra por la instalación de este elemento. Para la preparación de las muestras más densas se siguió el mismo procedimiento pero aplicando una pequeña vibración al molde. La ventaja que ofrece esta técnica de preparación es que se puede realizar el proceso en condiciones saturadas (sin contacto con el aire), resultando generalmente en muestras con valores B mayores que 0,96. Después de terminada la preparación de la muestra, se aplica un vacío de 20 kPa a través de las caras superior e inferior para remover el molde y colocar la cámara triaxial para ser llenada con agua de-saturada. Una vez se coloca la cámara triaxial, se aplica una presión de confinamiento de 20 kPa para remover el vacío aplicado a la muestra.

Para la preparación de las muestras de arenas gaseosas, la presión de poros se incrementó gradualmente hasta valores entre 300 y 450 kPa, mientras se mantenía el esfuerzo efectivo de confinamiento ($\sigma'_c = 20$ kPa). Una vez se alcanzaba un valor de B mayor a 0,96, se consolidaba la muestra a los niveles de esfuerzo efectivo *in situ* y se reemplazaba el fluido con agua saturada con dióxido de carbono. El reemplazo del fluido se hizo por medio de un sistema de circulación similar al presentado por Amaratunga y Grozic (2009). La figura 2 presenta un esquema del sistema de circulación el cual consiste en dos contenedores llenados parcialmente con agua de-aireada; el primer contenedor está colocado a una altura de 0,8 m por encima de la cámara triaxial, el segundo contenedor está colocado a una altura de 0,8 m por debajo de la cámara triaxial, generando así una diferencia en la cabeza de altura de 1,6 m. Los contenedores superior e inferior fueron

conectados a las líneas de drenaje superior e inferior, respectivamente, para crear un flujo ascendente del agua durante el reemplazo del fluido. Para producir el agua saturada con dióxido de carbono, los contenedores se presurizaron con un tanque de dióxido de carbono y la presión se mantuvo por 24 horas, tiempo que se considera suficiente para saturar completamente el agua con dióxido de carbono (Knai, 2011). Adicionalmente, los contenedores fueron presurizados a la misma presión de poros aplicada a la muestra para mantener el esfuerzo efectivo constante durante el reemplazo del fluido. Para asegurar un buen reemplazo del fluido por el agua saturada con dióxido de carbono, se pasó un volumen de este fluido a través de la muestra aproximadamente igual a tres veces el volumen de los poros. Este proceso tomó de 3 a 4 días y fue realizado bajo un esfuerzo efectivo principal normal de 100 kPa. Una vez se reemplazó el fluido la presión de poros se redujo gradualmente hasta igualar las presiones de poro *in situ*, mientras se aplicaba un esfuerzo efectivo constante y haciendo que el dióxido de carbono saliera de la solución en forma de burbujas ocluidas, reduciendo así el grado de saturación de la muestra. Para alcanzar diferentes grados de saturación se ajustó la presión a aquella a la cual el dióxido de carbono se disuelve en agua.

Aunque el pedestal inferior del aparato triaxial contiene una cerámica porosa con un valor de entrada de aire de 100 kPa para prevenir que el dióxido de carbono salga de la solución, la línea de drenaje inferior fue lavada con agua de-aireada para remover cualquier contenido de agua saturada con dióxido de carbono o burbujas de gas que existiesen bajo la cerámica porosa. Este procedimiento se realizó previo a la desaturación y antes de las cargas cíclicas para asegurar que las lecturas de la presión de poros en los pasos siguientes fueran precisas y confiables.

Finalmente, las muestras fueron ensayadas en condiciones no drenadas. La velocidad de corte, tanto para las muestras saturadas como para las muestras gaseosas, fue de 0,2 mm/min, lo que corresponde a una deformación unitaria de 0,22 %/min.

Programa experimental de ensayos triaxiales

La tabla 1 muestra el listado de los ensayos que forman parte del programa experimental. Se realizaron un total de 20 ensayos triaxiales sobre muestras alteradas de arena de densidad media saturada y gaseosa. De estos ensayos, quince (15) fueron en condiciones no drenadas bajo carga axial monotónica para cuantificar la respuesta del suelo en función de la relación de vacíos (e), y el grado de saturación (S). Los otros cinco (5) ensayos fueron realizados para determinar la posición de la línea de estado crítico.

Las muestras, excepto aquellas utilizadas para la localización de la línea de estado crítico, fueron consolidadas anisotrópicamente a esfuerzos efectivos promedio normales de 100 kPa ($\sigma'_{3c} = 82$ kPa, $\sigma'_{1c} = 136$ kPa, and $k_o = 0,6$); esfuerzos que son representativos de las condiciones de esfuerzos del horizonte de arena suelta a la profundidad

de muestreo (aproximadamente 10 m). Los ensayos triaxiales se dividieron en tres grupos para cuantificar la respuesta monotónica del suelo en función de la relación de vacíos y el grado de saturación. Tanto las relaciones de vacío usadas como los grados de saturación son representativos de las condiciones de la arena donde se realizó la densificación con explosivos. Las muestras preparadas por la técnica de compactación húmeda se usaron para definir la línea de estado crítico y para comparar los resultados obtenidos con las muestras preparadas con la técnica de sedimentación en agua. En la tabla 1 se presenta el número del ensayo, el tipo de ensayo (saturado o gaseoso), la relación de vacíos después de la consolidación, el esfuerzo efectivo medio normal después de la consolidación, las condiciones de carga (D: drenada o U: no drenada), el grado de saturación después de la carga y el propósito del ensayo.

Tabla 1. Listado de los ensayos que componen el programa de laboratorio

Muestra	Tipo de ensayo	$e_{cons.} = e_{sh.}$	p' (kPa)	Drenaje	S (%)	Propósito
MT-01	Saturado	0.972	84	CAU	100	CSL
MT-02	Saturado	0.845	502	CAU	100	CSL
MT-03	Saturado	0.785	1526	CAU	100	CSL
MT-04	Saturado	0.993	100	CAU	100	CSL
MT-05	Saturado	0.826	697	CAU	100	CSL
WP-06	Saturado	0.817	100	CAD	100	Resistencia al cortante $e_{aver.} = 0.83$
WP-07	Gaseoso	0.820	100	CAU	94	
WP-08	Gaseoso	0.836	100	CAU	83	
WP-09	Saturado	0.841	100	CAU	100	Resistencia al cortante $e_{aver.} = 0.78$
WP-10	Saturado	0.782	100	CAD	100	
WP-11	Gaseoso	0.797	100	CAU	95	
WP-12	Gaseoso	0.785	100	CAU	91	Resistencia al cortante $e_{aver.} = 0.71$
WP-13	Gaseoso	0.798	100	CAU	82	
WP-14	Saturado	0.775	100	CAU	100	
WP-15	Saturado	0.715	100	CAD	100	Resistencia al cortante $e_{aver.} = 0.71$
WP-16	Saturado	0.703	100	CAD	100	
WP-17	Gaseoso	0.716	100	CAU	98	
WP-18	Gaseoso	0.706	100	CAU	91	
WP-19	Gaseoso	0.692	100	CAU	75	
WP-20	Saturado	0.706	100	CAU	100	

CAU: consolidado anisotrópicamente – No-drenado.

CAU: consolidado anisotrópicamente – Drenado.

Fuente: elaboración propia.

RESULTADOS

Línea de estado crítico

Para la determinación de la línea de estado crítico, las muestras se consolidaron a esfuerzos más altos que los de estado crítico para una determinada relación de vacíos, asegurando que la respuesta del suelo fuera totalmente contractiva y de esta forma determinar la posición de la línea de estado crítico de manera confiable. La figura 3 presenta la localización de la línea de estado crítico y su posición con respecto a la relación de vacíos promedio de las muestras ensayadas.

Durante la ejecución de los ensayos, se midieron velocidades de onda de corte en varias etapas. En trabajos previamente realizados, Knai (2011) hizo mediciones con elementos bender en muestras alteradas preparadas con arena tomada del mismo sitio durante los años 2003 y 2004. En su trabajo, Knai encontró que los resultados obtenidos con elementos bender usando el método de pico-a-pico tuvieron una variación entre menos del 1,2 % de los resultados obtenidos a través de los métodos de correlación cruzada y de dominio de frecuencia. En lo que compete al trabajo presentado en esta investigación, los valores de velocidad de onda de corte que se reportan

fueron determinados por medio de la metodología pico-a-pico.

La figura 4 presenta los valores calculados y normalizados del módulo elástico de corte (G_{BE}) vs. el esfuerzo efectivo normal promedio. Estas mediciones fueron tomadas durante el proceso de consolidación usado para determinar la resistencia al cortante del suelo. En este programa de ensayos todas las muestra fueron consolidadas en condiciones saturadas. Como se esperaba, el G_{BE} se incrementa a medida que se incrementa el esfuerzo efectivo normal promedio (Jung, Cho y Finno, 2007). El módulo elástico de corte se calculó de la siguiente manera:

$$G_{BE} = \rho V_{BE}^2 \quad (1)$$

Donde, ρ es la densidad total del suelo en el momento en que se midió la velocidad de onda de corte (V_{BE}).

Para tener en cuenta la variación de la densidad del suelo durante el proceso de consolidación, los valores normalizados del módulo elástico de corte presentados en la figura 4 fueron correlacionados con las relaciones de vacíos de las muestras siguiendo el procedimiento presentado por Jung, Cho y Finno (2007). El resultado de esta correlación se expresa con la siguiente ecuación:

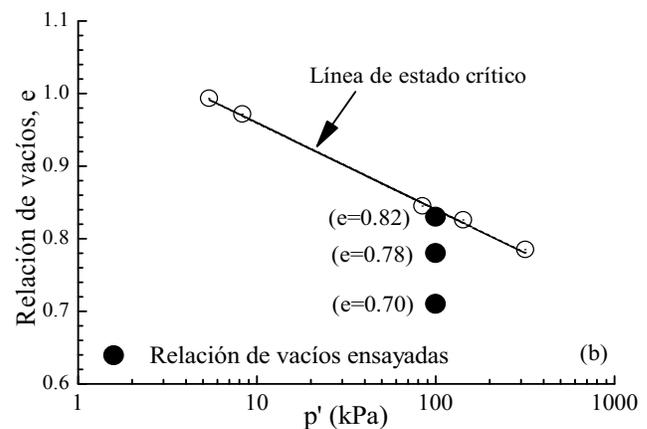
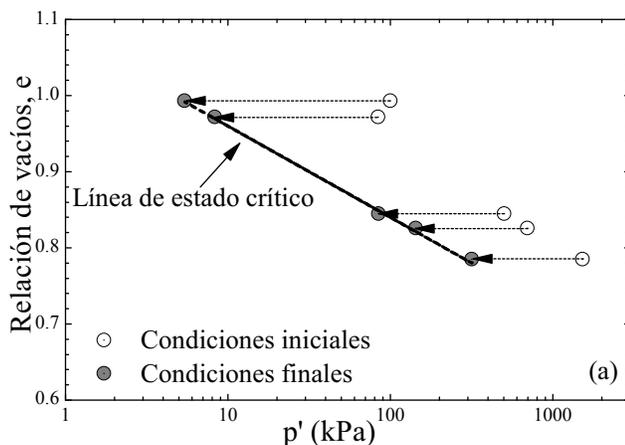


Figura 3. a) Línea de estado crítico (LEC) y b) posición de la relación de vacíos ensayada con respecto a la LEC.

Fuente: elaboración propia.

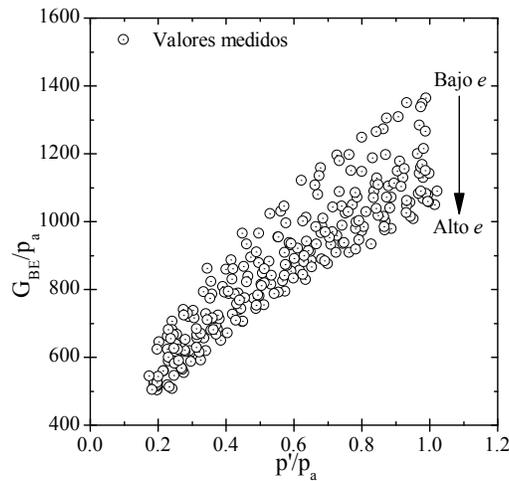


Figura 4. Resultados de las mediciones realizadas con elementos bender durante el proceso de consolidación de las muestras.

Fuente: elaboración propia.

$$\frac{G_{BE}}{P_a} = Af(e) \left(\frac{p'}{p_a} \right)^n \quad (2)$$

Donde, p_a = presión atmosférica (101,3 kPa); $f(e)$ = función de relación de vacíos; y A y n = constantes del material. La figura 5a compara los valores calculados de $Af(e)$ basándose en las expresiones previamente publicadas de las mediciones de los

valores de $Af(e)$ durante consolidación. Como se puede observar, los valores medidos de $Af(e)$ se encuentran dentro de las funciones de relación de vacíos propuestas por varios autores. La tabla 2 reúne las funciones de relación de vacíos, el promedio del valor A y el coeficiente de determinación (R^2) obtenido para siete (7) expresiones diferentes. Como se observa, el coeficiente de determinación

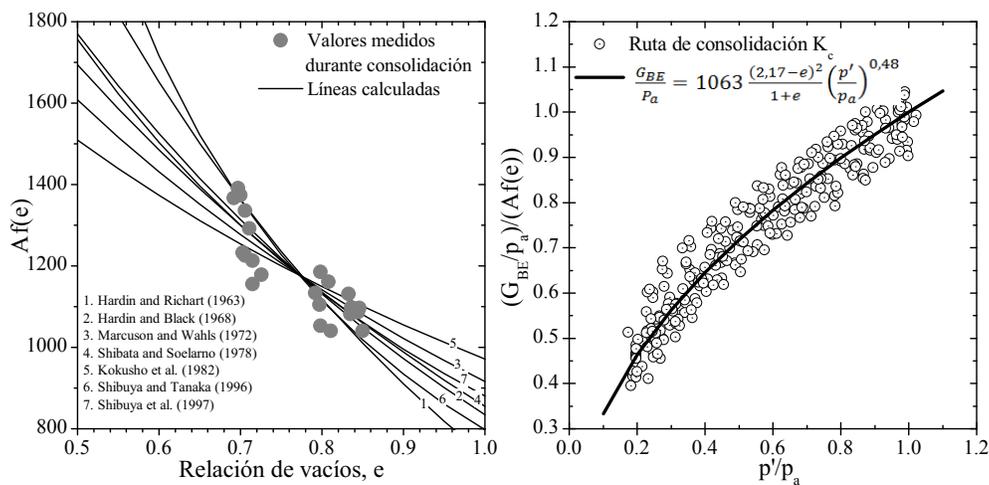


Figura 5. (a) Determinación de la función de relación de vacíos y (b) mejor función de ajuste de relación de vacíos

Fuente: elaboración propia.

varía muy poco entre las expresiones empíricas presentadas; por tanto, se escogió la función $f(e)$ propuesta por Hardin y Richart (1963) para los cálculos realizados en este trabajo, considerando principalmente que esta expresión fue desarrollada para suelos granulares. Igualmente, la figura 5b compara los resultados medidos por medio de los

elementos bender durante el proceso de consolidación con aquellos calculados por Hardin y Richart (1963). La expresión final obtenida para el módulo elástico de corte normalizado es:

$$\frac{G_{BE}}{P_a} = 1063 \frac{(2,17 - e)^2}{1 + e} \left(\frac{p'}{p_a} \right)^{0,48} \quad (3)$$

Tabla 2. Expresiones previamente publicadas de $Af(e)$

#	Referencia	$f(e)$	Valor promedio de A	Coefficiente de correlación. (R^2)
1	Hardin y Richart (1963)	$(2,17-e)^2/(1+e)$	1063,1	0,746
21	Hardin y Richart (1963)	$(2,91-e)^2/(1+e)$	454,4	0,745
3	Marcuson y Wahls (1972)	$(4,4-e)^2/(1+e)$	157,9	0,744
44	Shibata, T. y Soelarno (1978)	$0,67-e/(1+e)$	5005,5	0,743
5	Kokusho, Yoshida y Esashi (1982)	$(7,32-e)^2/(1+e)$	48,5	0,743
6	Shibuya y Tanaka (1996)	$e^{-1,5}$	790,9	0,757
7	Shibuya, Hwang y Mitachi (1997)	$(1+e)^{-2,4}$	4621,5	0,748

Las figuras 6 a 8 presentan las velocidades normalizadas de onda de corte durante el proceso de consolidación, repteo, desaturación y corte para las muestras ensayadas monótonicamente y con un promedio de relación de vacíos consolidada de 0,82, 0,78 y 0,71, respectivamente. Los valores de V_s calculados por medio de elementos bender se normalizaron con respecto al valor de V_s al final de la consolidación.

Los valores de V_s durante la etapa de desaturación fluctúan muy poco a medida que el dióxido de carbono disuelto en el fluido es forzado a salir de la solución. En general, la velocidad de onda de corte de las muestras de suelo gaseoso al final del proceso de desaturación, cuando las presiones del agua y del aire en la muestra son estables, varían en un rango de $\pm 5\%$ con respecto a los valores después del repteo. Este pequeño cambio en V_s indica que la estructura inicial de la muestra no fue alterada significativamente durante el proceso de exsolución del gas. Estos resultados son

consistentes con lo esperado, toda vez que los dos factores que influyen principalmente en la velocidad de onda de corte, relación de vacíos y esfuerzo promedio efectivo normal, no varían mucho durante el proceso de exsolución del gas.

La velocidad de onda de corte de las muestras ensayadas en condiciones no drenadas inicialmente disminuyó y posteriormente se incrementó mientras el proceso de corte continuaba. Este efecto se ve más pronunciado en las muestras más densas. En las muestras saturadas, la disminución inicial en V_s es el resultado de la generación de presiones de poros positivas al inicio del ensayo. El efecto del gas en la respuesta del suelo en condiciones drenadas y no-drenadas fue confirmado con las mediciones de velocidades de onda de corte. El gas hace que las velocidades de onda de corte obtenidas en condiciones no drenadas se acerquen a los valores de velocidades de onda de corte en condiciones drenadas.

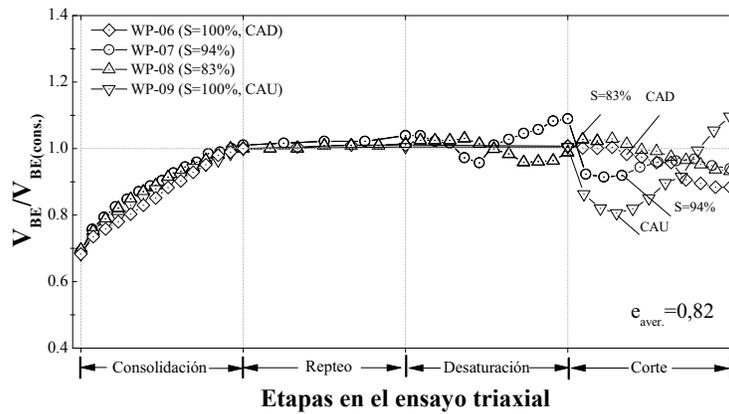


Figura 6. Velocidad de onda de corte normalizada durante el ensayo triaxial (Grupo 1, $e_{aver.}=0,82$)

Fuente: elaboración propia.

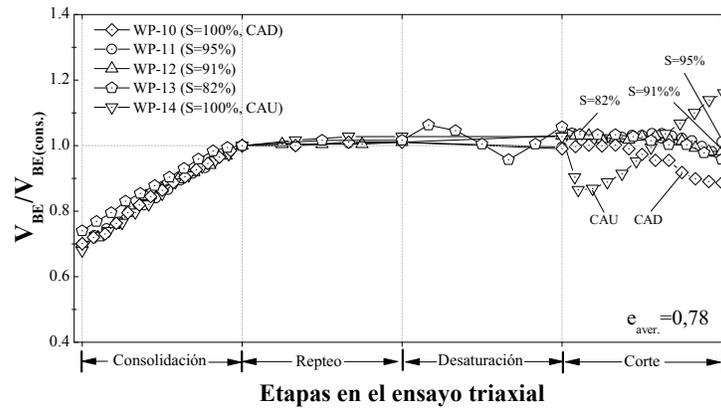


Figura 7. Velocidad de onda de corte normalizada durante el ensayo triaxial (Grupo 2, $e_{aver.}=0,78$)

Fuente: elaboración propia.

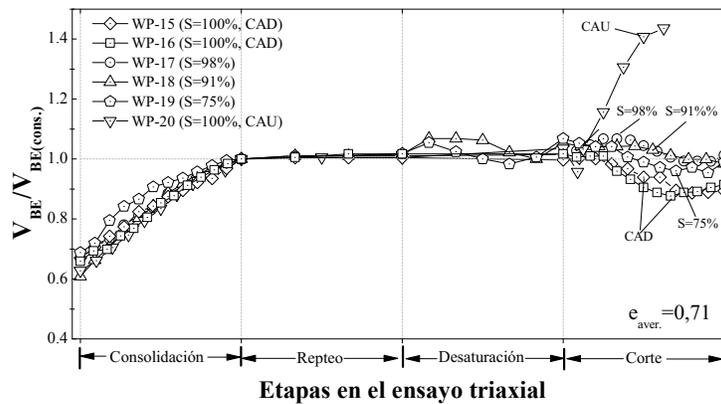


Figura 8. Velocidad de onda de corte normalizada durante el ensayo triaxial (Grupo 3, $e_{aver.}=0,71$)

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

Los valores de velocidad de onda de corte obtenidos de los ensayos con elementos bender durante la etapa de consolidación están acorde a los resultados esperados; estos valores de velocidad se incrementan a medida que se incrementan los esfuerzos efectivos normales promedio, y difieren muy poco de las correlaciones de $Af(e)$ reportadas en la literatura técnica.

La velocidad de onda de corte medida durante el proceso de desaturación de la muestra, cuando se forza el dióxido de carbono disuelto en el fluido para que salga de la solución en forma de un gas ocluido, fluctúa muy poco durante esta etapa, indicando que las burbujas ocluidas desplazaron el fluido sin alterar la estructura interna de la muestra. Este resultado está acorde a lo esperado, ya que los dos factores principales afectando la velocidad de onda de corte son la relación de vacíos y el esfuerzo efectivo normal promedio. Adicionalmente, se puede concluir que el procedimiento propuesto es eficaz para remplazar el fluido por gas ocluido y de esta forma generar arenas gaseosas.

En general se puede observar que la presencia de gas, aún en muy pequeñas cantidades, afecta la respuesta de la velocidad de onda de corte cuando la muestra se ensaya bajo condiciones globales no drenadas (líneas cerradas). La velocidad de onda de corte de las muestras completamente saturadas inicialmente disminuye y luego incrementa a medida que el proceso de corte continúa, debido a que durante la primera fase del proceso de corte se desarrollan presiones de poro positivas y, por ende, se reducen los esfuerzos efectivos. El gas en forma ocluido tiene el efecto de cambiar la respuesta del suelo de condiciones no drenadas a condiciones drenadas, siendo más pronunciada la respuesta a medida que el suelo es más denso.

El gas tiene el efecto de inhibir el desarrollo de presiones de poros, tanto positivas como negativas, por tanto el incremento en la velocidad de onda de corte que se generan en las muestras densas debido al desarrollo de presiones de poros

negativas se ve significativamente reducida por la presencia del gas; aún en pequeñas cantidades como es el caso de la muestra con $e_{aver.} = 0,71$ y $S = 98$ %. Este comportamiento podría proveer una explicación del porque los valores de velocidad de onda de corte medidos en arenas densificadas con explosivos no incrementan significativamente con respecto a los valores medidos inicialmente.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo experimental fue llevado a cabo en Northwestern University mientras el primer autor era un asistente de investigación en el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. El primer autor agradece al profesor Richard Finno, profesor de Northwestern University, por sus valiosos comentarios y motivación durante el desarrollo de los ensayos. Ayuda financiera fue proveída por el Instituto de Infraestructura y Tecnología de Northwestern University y de la Fundación Nacional de Ciencias (National Science Foundation).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amaratunga, A. y Grozic, J.L.H. (2009). On the undrained unloading behaviour of gassy sands. *Canadian Geotechnical Journal*, 46, 1267-1276.
- Been, K.; Jefferies, M.G. y Hachey, J. (1991). The critical state of sands. *Géotechnique*, 41(3), 365-381.
- Castro, G.; Seed, R.B.; Keller, T.O. y Seed, H.B. (1992). Steady-state strength analysis of lower San Fernando Dam slide. *Journal of Geotechnical Engineering*, 118(3), 406-427.
- Chaney, R. y Mulilis, J.P. (1978). Suggested method for soil specimen remolding by wet-raining. *Geotechnical Testing Journal*, 1(2), 107-108.
- Chern, J.C. (1981). *Effect of static shear on resistance to liquefaction*. Tesis M.A.Sc. Vancouver, Canadá: The University of British Columbia.
- Chern, J.C. (1985). *Undrained response of saturated sands with emphasis on liquefaction and cyclic mobility*. Tesis de doctorado. Vancouver, Canadá: The University of British Columbia.

- Finno, R.J.; Gallant, A.P. y Sabatini, P.J. (2016). Evaluating Ground Improvement after Blast Densification: Performance at the Oakridge Landfill. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(1), 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001365, 04015054.
- Ghionna, V. y Porcino, D. (2006). Liquefaction Resistance of Undisturbed and Reconstituted Samples of a Natural Coarse Sand from Undrained Cyclic Triaxial Tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(2), 194-202. DOI:10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:2(194)
- Gohl, W.B.; Jefferies, M.G.; Howie, J.A. y Diggle, D. (2000). Explosive compaction: design, implementation and effectiveness. *Géotechnique*, 50(6), 657-665.
- Grozic, J.L.H.; Imam, S.M.R.; Robertson, P.K. y Morgenstern, N.R. (2005). Constitutive modeling of gassy sand behaviour. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(3), 812-829.
- Hardin, B.O. y Black, W.L. (1968). Vibration modulus of normally consolidated clay. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 94(2), 353-370.
- Hardin, B.O. y Richart, F.E.J. (1963). Elastic wave velocities in granular soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 89(1), 33-65.
- Jung, Y.H., Cho, W. y Finno, R.J. (2007). Defining yield from bender element measurements in triaxial stress probe experiments. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(7), 841-849.
- Knai, H.B. (2011). *Measuring the effect of occluded gas bubbles on stress-strain response of a loose to medium sand*. Tesis de maestría. Evanston, IL: Northwestern University.
- Kokusho, T.; Yoshida, Y. y Esashi, Y. (1982). Dynamic properties of soft clay for wide strain range. *Soils Found.*, 22(4), 1-18.
- Ladd, R.S. (1978). Preparing test specimens using undercompaction. *Geotech Test J, GTJODJ.*, 1(1), 16-23.
- Marcuson, W.F. y Wahls, H.E. (1972). Time effects on dynamic shear modulus of clays. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 98(12), 1359-1373.
- Nageswaran, S. (1983). *Effect of gas bubbles on the sea bed behaviour*. Tesis de doctorado. Oxford University.
- Narsilio, G.A. (2006). *Spatial variability and terminal density: Implication in soil behavior*. Tesis de doctorado. Atlanta, GA: Georgia Institute of Technology.
- Narsilio, G.A.; Santamarina, J.C.; Hebler, T. y Bachus, R. (2009). Blast Densification: Multi-Instrumented Case History. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(6), 723-734.
- Okamura, M.; Ishihara, M. y Tamura, K. (2006). Degree of saturation and liquefaction resistances of sand improved with sand compaction pile. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(2), 258-264.
- Okamura, M.; Takebayashi, M.; Nishida, K.; Fujii, N.; Jinguji, M.; Imasato, T.; ...; Nakagawa, E. (2011). In-Situ Desaturation Test by Air Injection and Its Evaluation through Field Monitoring and Multiphase Flow Simulation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(7), 643-652. DOI: 10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000483
- Poulos, S.J.; Castro, G. y France, J.W. (1985). Liquefaction evaluation procedure. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(6), 772-792.
- Ramos C., A.M. (2015). Influence of the void ratio and the confining on the static liquefaction in slopes in changi sand. *Revista Tecnura*, 19(43), 63-73.
- Ramos C., A.M.; Felipe, P.-S.L. y Vega-Posada, C.A. (2016). Análisis de elementos finitos con un continuo elástico lineal tipo Cosserat. *Revista Tecnura*, 20(50), 43-54.
- Shibata, T. y Soelarno, D.S. (1978). *Stress-strain characteristics of clays under cyclic loading*. Paper presented at the Proc., Japanese Society of Civil Engineering.
- Shibuya, S.; Hwang, S.C. y Mitachi, T. (1997). Elastic shear modulus of soft clays from shear wave velocity measurement. *Géotechnique*, 47(3), 593-601.
- Shibuya, S. y Tanaka, H. (1996). Estimate of elastic shear modulus in Holocene soil deposits. *Journal of the Japanese Geotechnical Society : soils and foundation*, 36(4), 45-55.

- Tomita, Y., Shima, A., & Ohno, T. (1984). Collapse of multiple gas bubbles by a shock wave and induced impulsive pressure. *Journal of Applied Physics*, 56(1), 125-131.
- Vaid, Y.P y Sivathayalan, S. (2000). Fundamental factors affecting liquefaction susceptibility of sands. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(3), 592–606.
- Vaid, Y.P.; Sivathayalan, S. y Stedman, D. (1999). Influence of specimen-reconstituting method on the undrained response of sand. *Geotechnical Testing Journal*, 22(3), 187-195.
- Vega-Posada, C.A. (2012). *Evaluation of liquefaction susceptibility of clean sands after blast densification*. Tesis de doctorado. Evanston, IL: Northwestern Univ.
- Vega-Posada, C.A.; Finno, R.J. y Zapata-Medina, D.G. (2014). Effect of Gas on the Mechanical Behavior of Medium-Dense Sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(11), [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001163](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001163), 04014063. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001163
- Vega-Posada, C.A.; Zapata-Medina, D.G. y García-Aristizábal, E.F. (2014). Ground surface settlement of loose sands densified with explosives. *Revista Facultad de Ingeniería*, (70), 9-17.
- Verdugo, R. e Ishihara, K. (1996). The steady state of sandy soils. *Soils and Foundation*, 36(2), 81-91.
- Yegian, M.K.; Eseller-Bayat, E.; Alshwabkeh, A. y Ali, S. (2007). Induced-Partial Saturation for Liquefaction Mitigation: Experimental Investigation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(4), 372-380. doi: 10.1061/(asce)1090-0241(2007)133:4(372)





E2CAV, Pavement layer thickness estimation system based on image texture operators

E2CAV, sistema para la estimación del espesor de la capa de pavimento basándose en operadores de textura en imágenes

Brayan Barrios Arcila¹, Bladimir Bacca Cortes², Sandra Nope Rodríguez³

Fecha de recepción: 10 de febrero de 2016

Fecha de aceptación: 23 de noviembre de 2016

Cómo citar: Barrios A., B.; Bacca C., B. y Nope R., S. (2017). E2CAV, sistema para la estimación del espesor de la capa de pavimento basándose en operadores de textura en imágenes. *Revista Tecnura*, 21(51), 81-95. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.1.a06

Resumen

Contexto: Las carreteras públicas son esenciales para el progreso económico de cualquier país, ya que son fundamentales para el incremento en la eficiencia del transporte de bienes, y son una excelente fuente de empleo. Sin embargo, Colombia tiene pocas estadísticas sobre la condición de sus carreteras. e acuerdo con Inviás, el estado de las vías pavimentadas colombianas puede resumirse así: 21,1 % son clasificadas como "Muy buenas"; 34,7 %, como "Buenas", y 43,46 %, como "Regulares" o "Malas". Entonces, desde el punto de vista de rehabilitación de pavimentos, vale la pena asegurar la calidad de aquellas carreteras clasificadas como "Regulares" o "Malas".

Objetivo: En este trabajo se propone un sistema para estimar el espesor de la capa de pavimento usando métodos de segmentación de texturas en imágenes. Actualmente, el espesor del pavimento es estimado usando radares de penetración terrestre, extracción de núcleos o realizando apiques; además, éste forma parte de los parámetros estructurales de los sistemas de evaluación de pavimentos.

Método: El sistema propuesto está compuesto por una unidad de control de movimiento vertical, la cual introduce un videoscopio en un pequeño agujero en el pavimento, entonces las imágenes son obtenidas y unificadas en un computador portátil. Finalmente este mosaico es procesado a través de operadores de textura para estimar el espesor del pavimento. Los usuarios pueden seleccionar entre el método de Otsu y los filtros de Gabor para procesar los datos de imagen.

Resultado: Los resultados reportados en este trabajo incluyen pruebas en laboratorio y en campo; estas pruebas muestran errores de 5,03 % y 11,3 %, respectivamente, en la medida del espesor del pavimento.

Conclusión: El sistema propuesto es una opción atractiva para la estimación local del espesor del pavimento, con mínimos daños estructurales y menor impacto en la movilidad y la cantidad de operarios.

Palabras clave: capa de pavimento, estimación de espesor, filtros Gabor, operadores de textura, Otsu.

1 Electronic Engineer, graduate Student, Universidad del Valle. Cali, Colombia. Contact: brayanbarrios3744@gmail.com

2 Electronic Engineer, master of Science on Automation, Doctor in Technology. Associated Professor at the Universidad del Valle. Cali, Colombia. Contact: bladimir.bacca@correounivalle.edu.co

3 Electronic Engineer, management Project Specialist, Doctor in Engineering. Assistant Professor at the Universidad del Valle. Cali, Colombia. Contact: sandra.nope@correounivalle.edu.co

Abstract

Context: Public roads are an essential part of economic progress in any country; they are fundamental for increasing the efficiency on transportation of goods and are a remarkable source of employment. For its part, Colombia has few statistics on the condition of its roads; according with INVIAS the state of the roads in Colombia can be classified as “Very Good” (21.1%), “Good” (34.7%), and “Regular” or “Bad” (43.46%). Thus, from the point of view of pavement rehabilitation, it is worth securing the quality of those roads classified as “Regular” or “Bad”.

Objective: In this paper we propose a system to estimate the thickness of the pavement layer using image segmentation methods. The pavement thickness is currently estimated using radars of terrestrial penetration, extraction of cores or making pips; and it is part of structural parameters in the systems of evaluation of pavement.

Method: The proposed system is composed of a vertical movement control unit, which introduces a video scope into a small hole in the pavement, then the images are obtained and unified in a laptop. Finally, this mosaic is processed through texture operators to estimate the thickness of the pavement. Users can select between the Otsu method and Gabor filters to process the image data.

Results: The results include laboratory and field tests; these tests show errors of 5.03% and 11.3%, respectively, in the thickness of the pavement.

Conclusion: The proposed system is an attractive option for local estimation of pavement thickness, with minimal structural damage and less impact on mobility and number of operators.

Keywords: Pavement layer, thickness estimation, Gabor filters, texture operators, Otsu

INTRODUCTION

Countries development relies most on transport infrastructure; and public roads are an essential part of economic progress in any country, not only for increasing the efficiency of transportation of goods, but the employments generated by building and maintaining them (Sanchez et al., 2008) (Salman, Mathavan, Kamal, & Rahman, 2013). Additionally, the improvement and maintenance of transport infrastructure requires a proper diagnosis of the roads. On its part, Colombia has few statistics on road conditions, and the existing statistics are considered unreliable and inconsistent. Table 1 shows the current state of Colombian roads in accordance with a technical study performed in 2014. It can be observed that 21.1% of Colombian paved roads are classified as “Very Good”, 34.7% are classified as “Good” and 43.46% are classified as “Regular” or “Bad”.

As observed in Table 1, subjective classifications such as “Good”, “Regular” or “Bad” says little

about the real state of roads, and this classification method cannot offer a reference for pavement quality. According to (Sanchez et al., 2008) quality assurance and rehabilitation of paved roads are performed through integral pavement evaluation, which includes studies such as quantification and classification of surface distress, computing the IFI (International Friction Index), the IRI (International Roughness Index), and performing geotechnical and deflectometrical studies.

This work focuses on computing the thickness of the pavement, which is a structural requirement of pavement evaluation. According to the Colombian Transport Ministry, there are two kind of techniques used to estimate pavement thickness:

Invasive methods: core extraction (Figure 1a) and pavement holes (Figure 1b). The implementation of these methods is easy; according to (Sanchez et al., 2008), it is normal to do the core extraction and digging holes before and after of pavement rehabilitation, the first to evaluate the pavement state, and the second for quality assurance purposes.

Table 1. Colombian roads current state

Total of National Network	Paved Roads					
	VB	B	R	G	VG	Total
Length (Km)	1.837,16	3.020,66	2.530,24	1.253,04	63,97	8.705,07
Percentage	21,1%	34,7%	29,07%	14,39%	0,73%	75,98%
Total of National Network	Not Paved Roads					
	VB	B	R	G	VG	Total
Length (Km)	90,82	376,66	988,21	1.003,43	159,74	2.618,86
Percentage	3,47%	14,38%	37,73	38,32%	6,1%	22,86%

Source: (INVIAS, 2014).

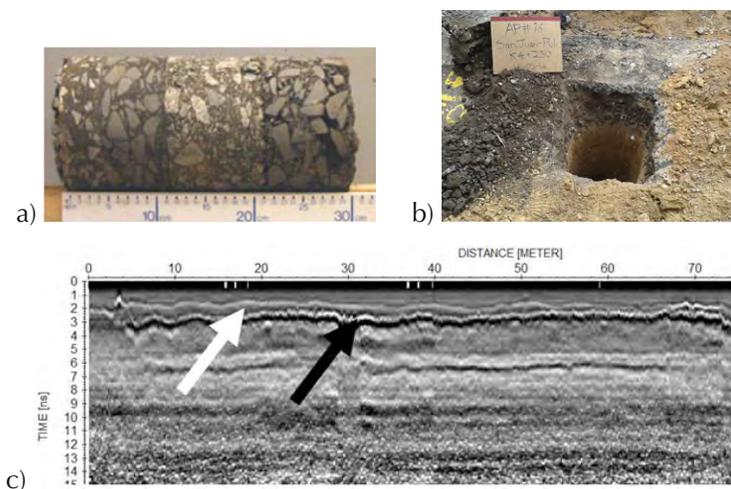


Figure 1. a) Example of pavement core (Sanchez et al., 2008). b) Digging hole (Sanchez et al., 2008). c) Typical GPR output (Hugenschmidt & Fürholz, 2012).

Source: (Sanchez et al., 2008) and (Hugenschmidt & Fürholz, 2012)

However, the structural pavement integrity is affected, and they do not show a continuous profile of pavement thickness.

Non-invasive methods: using a GPR (Geo Penetrating Radar) involves some advantages since it is a non-invasive technique and offers a continuous thickness profile of the road and real-time access to data as it can be observed in Figure 1c (Evans, Frost, Stonecliffe-Jones, & Dixon, 2008) (Pajewski et al., 2013). However, GPR equipment is expensive (approximately US\$ 60.000 each (GSSI, 2013b)), and it requires trained Engineers to interpret data (Pajewski et al., 2013). Additionally, a GPR system requires different type of antennas at

different bandwidth in order to reach diverse depths (GSSI, 2013a), which increases the costs.

Non-invasive methods as GPR are not economically feasible options in most road rehabilitation projects in Colombia. For this reason, this work proposes an alternative for local estimation of the thickness of pavement and base layers by image-processing techniques. The proposed method improves the core extraction method in the following aspects: In first place, it requires a small hole of 1 inch diameter, and up 90 cm in length to insert a video-scope, reducing the damage of the asphalt layers; second, the road mobility is barely affected, since machinery involved has small

dimensions; and it does not require an specialized engineer to interpret the information acquired.

The remainder of this paper consist of: Section 1 makes a brief description of the related works on image-processing methods for texture segmentation. The section 2 presents the system E2CAV to estimate the thickness of the pavement; and it includes the texture-segmentation image-processing algorithm, the movement control unit, and the software tool developed to consolidate data. Section 3 shows the tests and results. And Section 4 shows the conclusions of the research.

RELATED WORKS

Textured region in an image shows constant, periodically changing, or gradually changing image properties. Figure 1a shows an example of pavement core, and it can be observed that different textures are involved in each layer. The human eye can easily identify these textures and their interfaces, but it is difficult to define an accurate mathematical model to implement a texture-segmentation task. Texture-segmentation is a challenging problem because textures can consist of complex patterns or sub-patterns where brightness, color, shape, and

size properties change simultaneously. Another challenging aspect of our approach is the poor illumination; since the video-scope inserted in the hole has power limitations, it increases the complexity in the process.

Table 2 shows different methods for texture-segmentation and some of their properties (number of kernels used, signal-to-noise ratio, need of classifier, and if the method is able to describe the full image). The following five approaches of texture segmentation methods can be found in literature: statistical- or transform-based, edges or contour methods, threshold-based methods, clustering- and graph-based methods.

Computing edges or contours is the most straightforward approach to segment images with textures, and the most common methods are derivative filter, Kirsch filters (Senthilkumaran & Rajesh, 2009), and geodesic active contours (Caselles et al., 1997). However, these methods have moderate behaviour of signal-to-noise ratio due to illumination sensitivity.

Threshold-based approach is another example. It is usually computed with histograms, pixel clustering, object properties or attributes, morphological operators, or local methods (Sezgin & Sankur,

Table 2. Summary of common texture segmentation methods

Class	Ref.	# Kernels	S. N. R.	Classifier	Full Image
Statistical-Transform	(Sandler & Lindenbaum, 2006)	N kernels	Good	Yes	Yes
	(Brox, Weickert, Burgeth, & Mrázek, 2006)	1	Good	Yes	Yes
Edges	(Malik, 2000)	1	Regular	No	No
	(Caselles, Kimmel, & Sapiro, 1997)	1	Regular	No	No
	(Senthilkumaran & Rajesh, 2009)	1	Regular	No	No
Threshold	(Brox et al., 2006)	No	Regular	Yes	No
	(Greensted, 2010)	No	Good	No	No
Clustering	(Brox et al., 2006)	1	Regular	Yes	Yes
	(Charlampidis, 2011)	1	Good	Yes	Yes
Graph	(Little & Jones, 2011)	No	Good	Yes	Yes

Source: own work.

2004). In particular, the Otsu method (Otsu, 1979) shows good signal-to-noise ratio despite the fact this method do not use kernels nor describe the full image. In fact, the Otsu approach is useful when global operators are required (Socorras, Gomez, & Obregon, 2014) due to the iterative process to find the threshold value (Otsu, 1979). On the other hand, using methods based on transformations or statistics works for detecting textures on images. For instance, a popular and accurate technique is Gabor filters (Sandler & Lindenbaum, 2006). These filters use different kernels tuned by specific parameters, corresponding to specific applications (Aldana, Orozco, & Barreto, 2014). Gabor filters or structure tensor (Brox et al., 2006) are designed to give high response at edges or regions where there is a change of texture.

Texture-segmentation methods focus on finding or modelling patterns on images without considering color properties. Clustering methods such as (Charlampidis, 2011) and (Little & Jones, 2011) use modified k-means and mean-shift algorithms to segment images. Normally these methods search nodes or local maximums in feature space (color, gradients, moments, etc.); therefore, the entire image can be segmented and classified. However,

the results of these methods vary depending on the window size selected, and they depend on feature space size. Another implementation is modelling the images as graphs (Malik, 2000), where nodes are pixels related by affinity weights as edges. In this case, affinity weights define a relationship of similarity. This implementation groups the pixels according to similarity or dissimilarity measures, so they do not require a data model, and time complexity is usually high.

Texture-segmentation techniques perform tests on artificial images, and some have complex patterns; additionally, these images show good illumination conditions and are noise-free. However, in this work, the proposed pipeline process can deal with real world images acquired in non-structured environments, in presence of regular illumination conditions and noise, so this work considers different methods in stages such as image acquisition, pre-processing and thickness estimation.

METHODOLOGY

Figure 2a shows the setup of the system, and describes the main components of the E2CAV system. A hole of 1 inch diameter and up 90 cm length is

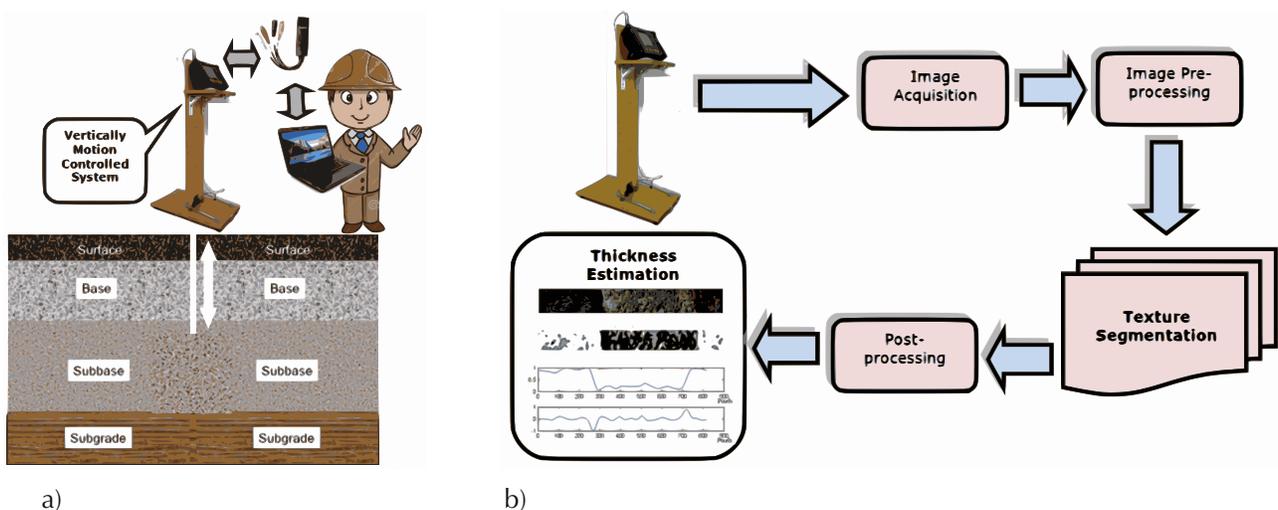


Figure 2. a) System setup. b) Process block diagram to estimate pavement layers thickness using texture segmentation.

Source: own work

drilled; a vertical movement control unit introduces the video-scope probe into the hole at configured steps of depth; the software tool runs in a laptop and is in charge of handling the vertical movement control unit and obtaining the images through the EasyCap USB video capture device. Once these images are obtained (with a size 640x480 pixels), the software tool starts the image-analysis process. The video-scope is an Extech HDV620 that has a PAL/NTSC analogue video output; and the vertical motion control unit is a custom design that uses an Arduino™ UNO development board and an electronically interface to handle the descending and ascending movement of the video-scope probe. All the process is detailed in the following sub-sections.

Estimation of the thickness of the pavement using image texture operators

Figure 2b shows the block diagram of the proposed system E2CAV to estimate the thickness of the pavement. The first stage is responsible for the image acquisition using a video-scope and a custom control movement unit, so K sequential images are obtained. The second stage, image pre-processing, sets up a mosaic using these K images and improves the mosaic for further processing. The third stage is responsible of the texture-segmentation using either Otsu (1979) or Gabor filters (Sandler & Lindenbaum, 2006). The fourth stage processes the results of the third stage and computes the thickness of the pavement.

Data Acquisition and Pre-processing

There are three important parts involved in the data acquisition process: the laptop, the vertical movement control system, and the Extech HDV620 video-scope. The laptop runs the software responsible of managing the vertical movement control system and capturing the images from the Extech HDV620 video-scope through an EasyCap USB video capture device. In the next sections of this paper there are more details on the software. The vertical movement control system is programmed to perform discrete motions into a hole of 1". Each motion step was computed considering equation (1).

$$G = B \frac{g}{f-1} \quad (1)$$

Where g is the distance to the object (25mm), f stands for the calibrated focal length (15mm) and B denotes the sensor size (1/3"), so G is the current object size (15.11mm). At each G -step one image of 640 by 480 pixels is obtained from the HDV620 video-scope. In order to correct the camera distortion, the video-scope camera was previously calibrated using (Bouguet, 2013). Another calibration parameter worth considering is the pixel to distance ratio (Gonzales & Woods, 2007).

Each image is joined with the next one to build a mosaic of 1321x160 pixels, and it is converted to gray scale (an example of this kind of image is shown in Figure 3). Most pavement-layers images are very noisy with high frequency components present, so a mean filter (with a slip window 5x20 pixels) is used on the mosaic image to smooth its appearance.



Figure 3. Original mosaic image

Source: own work.

Texture Segmentation

In this work, the segmentation of textures was developed with the Otsu threshold method and Gabor filters. The following are the basic steps for the implemented Otsu algorithm: the mosaic image histogram is computed using L gray levels; for each gray level, the equations (2) to (5) help to compute the weight, mean and variance of the background and foreground, and the within class.

$$\omega_{k[b,f]} = \sum_{i=0}^k \frac{h_i}{NM} \quad (2)$$

$$\mu_{k[b,f]} = \frac{\sum_i^k h_i g_i}{\sum_i^k h_i} \quad (3)$$

$$\sigma_{k[b,f]}^2 = \frac{\sum_i^k (h_i (g_i - \mu_k)^2)}{\sum_i^k h_i} \quad (4)$$

$$\sigma_{w,k}^2 = \omega_{kb} \sigma_{kb}^2 + \omega_{kf} \sigma_{kf}^2 \quad (5)$$

Where h_i is the histogram bin value, N denotes the image number of rows, M stands for the image number of columns, g_i denotes the gray level and $[b, f]$ stands for background and foreground. The threshold with the lowest sum of weighted inter-class variances is selected. In case of being interested in more than one threshold, they are selected in turn according to the computed inter-class variances. In this particular case, the number of thresholds to compute is 2. Figure 4 shows the result of applying the Otsu method in the mosaic of Figure 3 to obtain a segmented texture.

The second method available in the software tool for texture segmentation is Gabor filters. These filters are special cases of band pass filters, so they are commonly used in edge detection, stereo images disparity estimation and feature extraction (Zhang, Tan, & Ma, 2002). In this work, the Gabor filter used is defined in equation (6).

$$g(x, y, \gamma, \sigma, \lambda, \phi) = e^{\left(-\frac{x^2 + \gamma^2 y^2}{2\sigma^2} + \frac{2\pi x}{\lambda + \phi} i\right)} \quad (6)$$

Where x and y stand for the pixel coordinates, γ denotes the spatial aspect ratio, σ denotes the standard deviation of the Gaussian function, λ stands for the wavelength of the sinusoidal factor and ϕ denotes the phase offset. Gabor filters are parameterized using 4 variables namely γ , σ , λ and ϕ . According with (Salman et al., 2013) and (Zhang et al., 2002) the phase offset ϕ is divided in six different angles between 0 and π as depicted in equation (7).

$$\phi = \{\phi_i \in \mathbb{R} | 0 \leq \phi_i \leq \pi \text{ and } \phi_i = i\pi/6\} \quad (7)$$

The wavelength of the sinusoidal factor λ depends on the image number of columns (Zhang et al., 2002) since it has a direct relationship with the frequency domain. Then, different cut-off frequencies are selected according to equation (8).

$$f_k = \frac{2^{(k-0.5)}}{M} \quad (8)$$

Where M is the image number of columns and $k = \log_2(M/8)$.



Figure 4. Example of segmented texture using Otsu method

Source: own work.

The frequencies described in equation (8) are used to define a range of frequencies described in equation (9).

$$F = [0.25 - f_k \text{ to } 0.25 + f_k] \quad (9)$$

With the range of frequencies, the wavelength values are defined as the inverse of each frequency value of equation (9). That is, $\lambda = 1/F_k$. In (Sandler & Lindenbaum, 2006) and (Zhang et al., 2002), the authors propose a relationship between σ and λ which is described in equation (10).

$$\sigma = \frac{3\lambda(2^B+1)\sqrt{\log(2)/2}}{\pi(2^B-1)} \quad (10)$$

Where B denotes the spatial-frequency bandwidth and is specified in octaves and its current value is 1. Therefore, considering all the plausible values of γ , σ , λ and ϕ , and the image specifications at the end, the resulting number of Gabor filters is 96. The kernel size depends on the σ parameter (Gonzalez & Woods, 2007); in this work it varies between 9x9 and 3x3. Figure 5 shows an example of the segmented texture obtained by applying the Gabor filter in the mosaic shown in Figure 3.

Post-processing and Thickness Estimation

Once the texture segmentation stage ends, the results using Gabor filters require one further processing step. The K-means clustering (MacQueen, 1967) is applied to all resulting pixels of the segmented textures. A well-known disadvantage of k-means clustering is related to the number of clusters, which must be known in advance. However, in this application the number of clusters is known: all tests were performed using 2 clusters (pavement layer and base layer) because those are the only layers available when working at 90cm depth. The clustered pixels are painted using different gray levels in order to start the process of estimating the thickness.

Henceforth, the vertical histogram of mean pixel values is computed to obtain the resulting images from both segmentation methods (Otsu and Gabor filter). It results in a 1D signal where peaks or inflection points are putative locations of pavement layers interfaces (Figure 6a). In order to identify the location of these interfaces of pavement layers, a first-order derivate is taken of the vertical histogram of mean pixel values. Afterwards, the peak values of this signal show the position of the



Figure 5. Example of segmented texture using Gabor filters

Source: Own work.

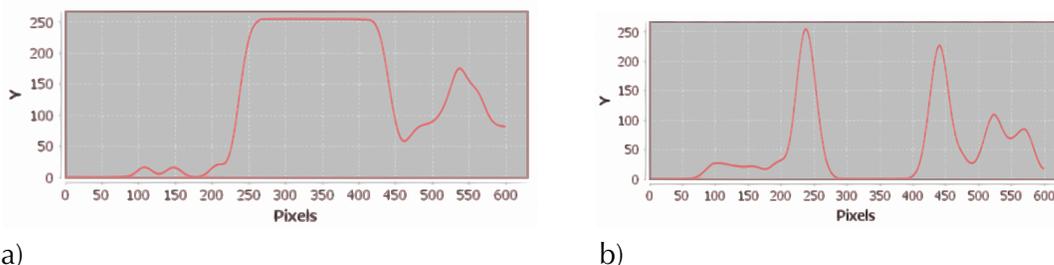


Figure 6. a) Example of the vertical histogram of mean pixel values. b) Example of the first-order derivate of the vertical histogram of mean pixel values.

Source: Own work.

interfaces (shown in Figure 6b). The position of the interfaces of pavement layer is given in pixels. Finally, to transform this information to metric values, the motion step given in equation (1) and the pixel to distance ratio were used to finally estimate the thickness of the pavement layers.

Vertical movement control unit

Figure 7 shows the vertical movement unit, which is used in the E2CAV system to descend the video-scope probe through a hole of 1-inch diameter. This unit is composed of the mechanical structure, the Arduino™ board, and a custom motion board to drive the DC motor. The mechanical structure was designed to facilitate transport, and it was built to support a descending/ascending tube, the video-scope, and the control electronic elements. A geared DC motor with torque of 18Kg cm, and 80 RPMs performs the descending/ascending motion. This DC motor supports 2 incremental encoders in quadrature of 520 ticks per revolution. Finally, the Arduino and the motion boards control the descending/ascending movement considering the following requirements: setting the descending/ascending distance and speed, moving the video-scope probe to its initial position (top), starting the descending motion, pausing the

descending motion, resuming the descending motion, and handshaking any motion/configuration command sent by the laptop GUI.

Software tool

The texture-based estimation process of the thickness of pavement layers proposed in this work was automated using a graphical user interface. The Rational Unified Process (RUP) methodology (Kruchten, 2003) was used to develop this software. This methodology involves 4 stages for software development: inception, elaboration, construction and transition. The results of these 4 stages include functional and non-functional requirements, a diagram of concept, real use cases, sequential diagrams, design-class diagrams, source code, and functional/integration tests. However, due to space requirements, in this work only the functional and non-functional requirements, the diagram of concept and the GUI description were included.

Design Requirements and Diagram of Concept

The proposed system is composed of two main parts: a software tool to manage and perform the digital image processing, and a vertical movement control system. The first implements the block diagram shown in Figure 2b and runs into a Laptop.

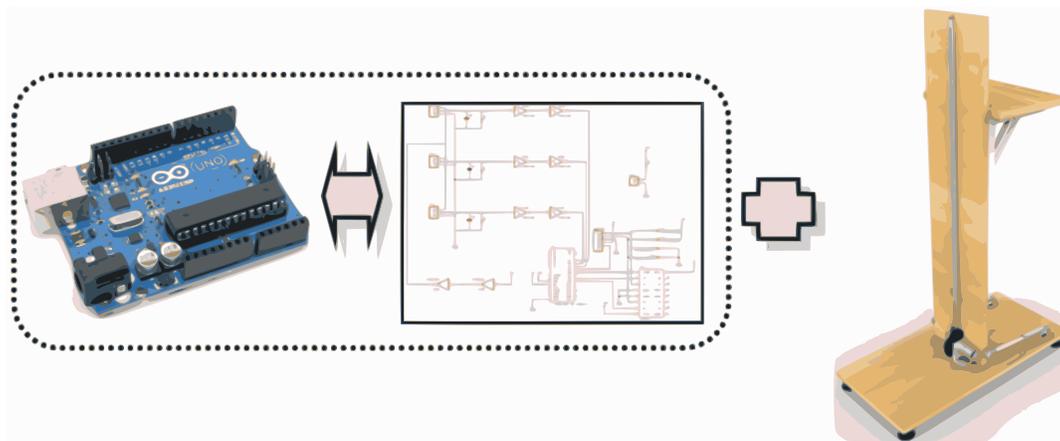


Figure 7. Vertical motion unit: mechanical structure, Arduino board and motion custom board.

Source: Own work.

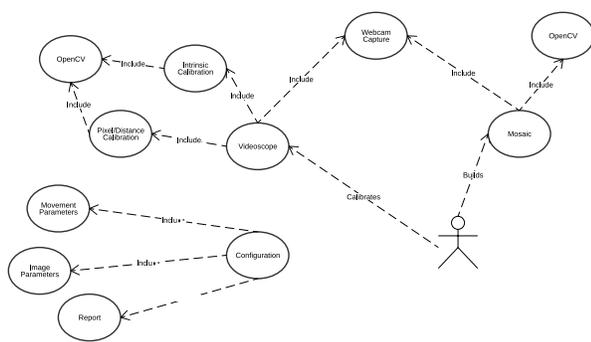
The second manage the structure shown in Figure 2a. The following are the functional and non-functional requirements of the E2CAV system software proposed in this work:

Functional Requirements–Calibration module: To allow the video-scope camera calibration; to allow the video-scope camera pixel/distance ratio calibration; to save and restore the calibration results. *Configuration Module:* to allow the configuration of the number of images at each step of the video-scope probe desclining; to allow the configuration of the desclining distance; to allow the configuration of the image parameters; to allow the configuration of the Otsu and Gabor filter parameters; to send the configuration parameters to the vertical movement control system. *Image Acquisition and Processing:* to control the vertically motion controlled system hardware; to perform the

image acquisition process; to build the image mosaic and perform the pre-processing tasks; to apply the texture methods and estimate the thickness of the pavement layers. *Report Module:* to generate a report in PDF format including the calibration parameters, the configuration parameters, the image mosaic, and the results of the estimation of the thickness of pavement layers.

Non-functional Requirements: Java 1.7, serial port access, minimum memory available of 90Mbytes.

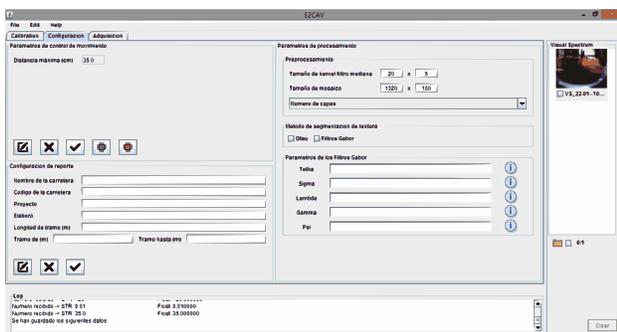
The Figure 8a shows the concept diagram of the E2CAV system. Two main actors are identified: the user and the vertical movement control system hardware. Users are able to calibrates/configure the video-scope for image acquisition; to control the vertical motion controlled system; to build the image mosaic, which implicitly implies the



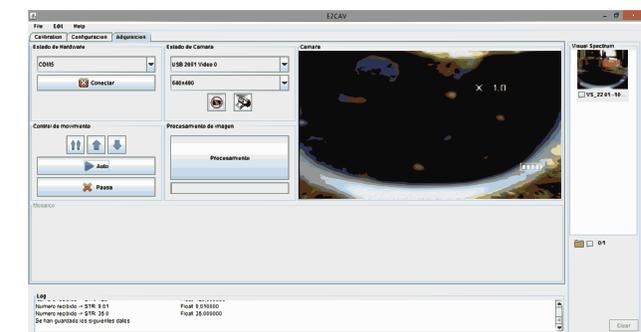
a)



b)



c)



d)

Figure 8. a) Diagram of concept. b) Calibration module GUI. c) Configuration module GUI. d) Acquisition and processing module.

Source: Own work.

acquisition of various frames from the video-scope camera; and the estimation of the thickness of pavement layers using the Otsu and Gabor filter methods. The vertical movement control system was designed to operate using configuration, commands and feedback responses. The calibration/configuration of video-scope camera was implemented using standard OpenCV (OpenCV, 2014) libraries.

Graphical User Interface Description

Figures 8b, 8c and 8d show the user interface of the E2CAV system software, which satisfies the requirements described above. These figures correspond to the calibration, configuration and image acquisition/processing modules, respectively. The order in which these modules are presented is the order in which a normal operation of the E2CAV system software must be operated.

The calibration module shown in Figure 8b includes the following user tools: a visualization panel where the video-scope camera projects its image. A control panel placed at the bottom-left part of the GUI in order to take individual pictures, starting the calibration process, and to rectify the pictures taken using the calibration parameters. These calibration parameters are shown in the text panel at right of the visualization panel. The right side of this interface shows the image workspace, where users can store all images taken up to date.

Figure 8c shows the configuration panel. Four panels can be observed: The motion control parameters are in the upper-left panel, where users can define the descending distance of the vertical motion system, as well as the control buttons to edit, send and clear this parameter from the vertical motion system hardware. The image processing parameters are in the right panel, where the user can select the window size for median filter, the image mosaic size, and the texture methods parameters. The report configuration panel is in the bottom-left part, where there are parameters for inspecting data such as road name, road code,

project name, user name, and road length. At the bottom, the user interface uses a text panel to show the E2CAV system software state.

Finally, the Figure 8d shows the acquisition module, which is accessed once the previous modules have been configured. This module of the interface shows seven panels. At the left, two panels are responsible of handling the vertical movement control system; the upper-left panel deals with the hardware connection through a serial port; and the middle-left panel controls functions such as start, stop and pause motion. At the right, three panels cope with the image acquisition, implementing functions such as selecting the video source, configuring the image size, controlling the image trigger, starting the image processing, and observing the current data image. Finally, under these panels, the image mosaic is shown, as well as the resulting thickness of the pavement layers in the log panel.

RESULTS

The developed E2CAV software supports two texture segmentation methods: the Otsu threshold and the Gabor filter. Users can select which one they want to use to process the data. For this reason, the tests performed are divided in two groups: the lab tests, which are oriented to find the level of precision of both texture segmentation methods; and the field tests that focus on testing the E2CAV system software tool in real conditions. The experimental setup is shown in Figure 2a, it was employed in both tests using the following experimental process: first, the E2CAV software tool is connected with the vertical movement control unit, and the Exttech video-scope; second, if the camera video-scope or the pixel/distance ratio are not calibrated, users can do so using the E2CAV software; third, the vertical motion unit is programmed, then the image acquisition process starts and all images are sent to the laptop using the EasyCap video converter; fourth, the E2CAV software processes all the images and it gives the resulting thickness of the layer.

Lab tests

The experimental process was repeated twenty four times using cores extracted from pavements. It is worth noting that both calibration procedures are required once, and the results of them are stored for further use. In order to compute the measurement error of the estimated thickness of the pavement layers, the assumed ground truth was the metric measure of those layers performed on the pavement cores.

Figures 9a and 9b show the absolute errors for the pavement and base layers. Both figures consider the Otsu (sloping lines) and Gabor filter

(horizontal lines) methods. In average, the results show an error of pavement layer thickness estimation of $6.405\% \pm 5.03$, and $5.07\% \pm 3$ for the Otsu and Gabor filter, respectively; an error of base layer thickness estimation of $5.88\% \pm 3.5$, and $4.13\% \pm 2.7$ for the Otsu and Gabor filter, respectively. The less the better, so Gabor filters outperforms the Otsu method. However, both methods are prone to errors when illumination changes; even though, Gabor filters were found more robust since they are able to be tuned using different orientations, time and space wavelengths. The Otsu method performed surprisingly well; an explanation of this behaviour could be that it resolves the segmentation

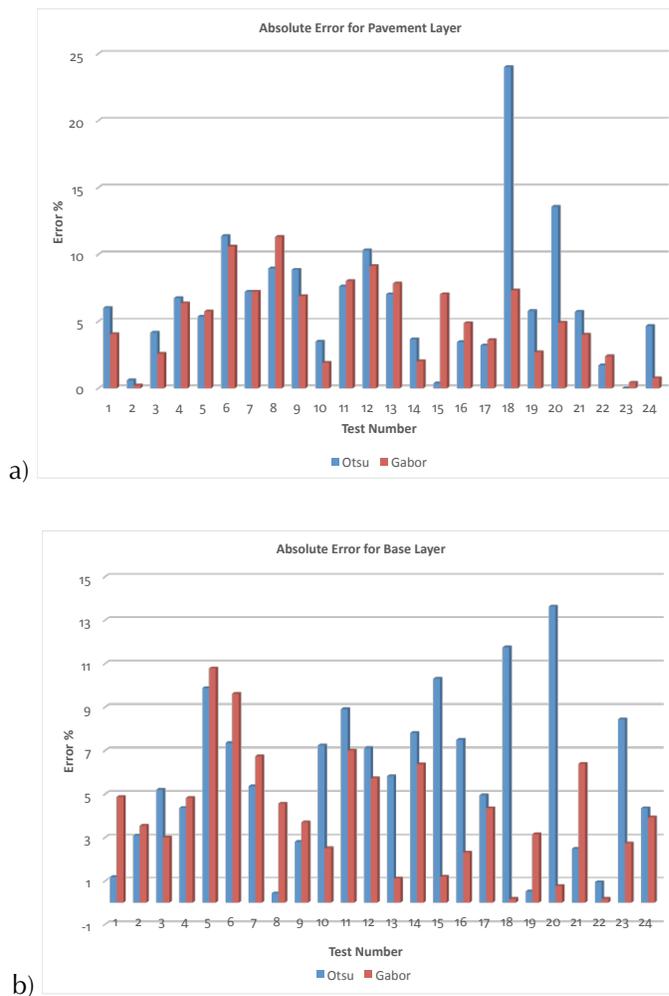


Figure 9. Absolute error results. a) Pavement layer thickness estimation. b) Base layer thickness estimation.

Source: Own work.

problem globally. Another reason why the Gabor filter outperforms the Otsu method is that the latter uses brute force to compute the best threshold, without considering the local relationship in the image textures. On the contrary, the Gabor filter considers not only the local morphology in the image texture, but also their relationship in the frequency domain.

Field tests

Field tests were performed using 5 holes drilled on a 7.5m segment of paved way into the Universidad del Valle. In order to obtain good results from these

tests there were need for three additional considerations: first, the drilled hole must be cleaned before the inspection; second, most of the earth and dust were extracted using pressurized air; third, the drill only could achieved the first paved layer. Figure 10 shows the absolute error results for the thickness of the pavement for the 5 holes drilled; at each hole there were 5 different measures. In average the percentage of thickness error estimation was of 11.3% using Gabor filters. Figure 11 shows images of the intermediate steps of thickness estimation, which were very challenging, that is part of the reason why the Otsu method did not give any successful result in these tests.

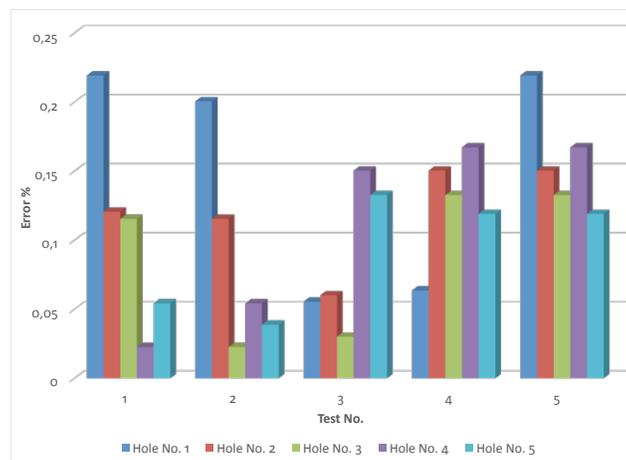


Figure 10. Absolute error results for the pavement layer thickness estimation in five field tests.

Source: Own work.

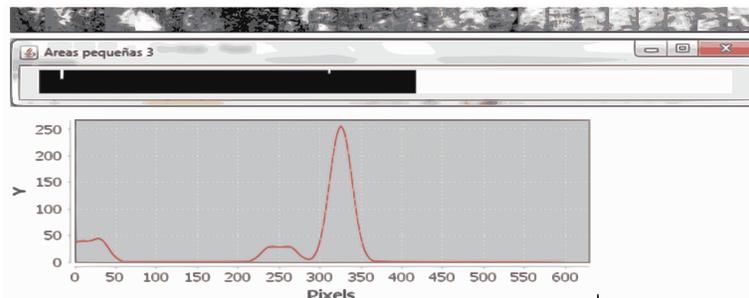


Figure 11. Example of a field test. The original mosaic, the resulting textures segmentation using Gabor filters, and the first-order derivate of the vertical histogram of mean pixel values.

Source: Own work.

CONCLUSIONS

This work presented the E2CAV system to estimate the thickness of the pavement layers using texture-segmentation in images. The proposed method employs the Otsu threshold and Gabor filter approaches. Both approaches were integrated into the E2CAV software, and it was implemented with four main modules: calibration, configuration, image-processing, and report-generation. The aim of the calibration module is computing the intrinsic camera parameters and the pixel/distance ratio; the configuration module sets up the image processing, and the vertical movement unit parameters; the image-processing module is in charge of performing the data acquisition process as well as the estimation of the thickness of the pavement layers; and the report-generation module consolidates the information for documentation purposes. In the E2CAV software, the estimation of the pavement layers can be performed using both the Otsu and the Gabor filters. The Otsu method requires knowing the number of layers present in the image mosaic prior to compute the right thresholds. The Gabor filters were parameterized considering the requirements of this application and the insights proposed in (Salman et al., 2013) and (Zhang et al., 2002). Laboratory and field tests were performed and gave errors of 5.07%, and 11.3% in the estimation of thickness, respectively. Finally, future works focus on improving the mosaic image computation and including pre-processing tools such as bilateral or homomorphic filter.

ACKNOWLEDGEMENTS

E2CAV research project (*Estimación Local del Espesor de las Capas Asfáltica y Base usando Visión Artificial*, Ref: 2796) of the *Universidad del Valle* was the founding resource for this work.

REFERENCES

- Aldana, C., Orozco, N., & Barreto, S. (2014). Identification of multiple sclerosis brain lesions in magnetic resonance imaging using texture analysis. *Tecnura*, 18, 89–101. doi:<http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.SE1.a07>
- Bouguet, J.-Y. (2013). Camera Calibration Toolbox for Matlab. *California Institute of Technology*. Retrieved from http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/
- Brox, T., Weickert, J., Burgeth, B., & Mrázek, P. (2006). Nonlinear structure tensors. *Image and Vision Computing*, 24(1), 41–55. doi:10.1016/j.imavis.2005.09.010
- Caselles, V., Kimmel, R., & Sapiro, G. (1997). Geodesic Active Contours. *International Journal of Computer Vision*, 22(1), 61–79.
- Charlampidis, D. (2011). *Texture Segmentation Using Iterative K-means*. New Orleans: Department of Electrical Engineering, University of New Orleans.
- Evans, R., Frost, M., Stonecliffe-Jones, M., & Dixon, N. (2008). A Review of Pavement Assessment Using Ground Penetrating Radar (GPR). In *12th International Conference on Ground Penetrating Radar* (pp. 2–11). Birmingham, UK.
- Gonzales, R., & Woods, R. (2007). *Digital Image Processing* (3rd Ed.). Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ, USA.
- Greensted, A. (2010). Otsu-Thresholding. *The Lab Book Pages*. Retrieved from <http://www.labbookpages.co.uk/software/imgProc/otsuThreshold.html>
- GSSI. (2013a). Ground Penetrating Radar Antennas. Retrieved from <http://www.geophysical.com/antennas.htm>
- GSSI. (2013b). GPR Data Acquisition Unit-SIR30. Retrieved from <http://www.geophysical.com/sir30.htm>
- Hugenschmidt, J., & Fürholz, P. (2012). ATRAS – An automated GPR system for data acquisition and storage for roads and bridges. In *14th International*

- Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)* (pp. 448–453). Shanghai, China. doi:10.1109/ICGPR.2012.6254907
- INVIAS. (2014). *Estado de la Red Vial*. Instituto Nacional de Vías. Retrieved June 9, 2015, from <http://www.invias.gov.co/index.php/red-vial-nacional/2-uncategorised/57-estado-de-la-red-vial>
- Kruchten, P. (2003). *The Rational Unified Process: An Introduction* (3rd ed.). Addison-Wesley Professional. Boston, MA, USA.
- Little, M. A., & Jones, N. S. (2011). Generalized methods and solvers for noise removal from piecewise constant signals. I. Background theory. *Proceedings. Mathematical, Physical, and Engineering Sciences / the Royal Society*, 467(2135), 3088–3114. doi:10.1098/rspa.2010.0671
- MacQueen, J. (1967). Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Volume 1: Statistics*. The Regents of the University of California.
- Malik, J. (2000). Normalized cuts and image segmentation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(8), 888–905. doi:10.1109/34.868688
- OpenCV. (2014). OpenCV documentation. *OpenCV ORG*. Retrieved June 1, 2015, from <http://docs.opencv.org/>
- Otsu, N. (1979). A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1), 62–66. doi:10.1109/TSMC.1979.4310076
- Pajewski, L., Benedetto, A., Derobert, X., Giannopoulos, A., Loizos, A., Manacorda, G., ... Trinks, I. (2013). Applications of Ground Penetrating Radar in civil engineering — COST action TU1208. *2013 7th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar*, 1–6. doi:10.1109/IWAGPR.2013.6601528
- Salman, M., Mathavan, S., Kamal, K., & Rahman, M. (2013). Pavement crack detection using the Gabor filter. In *16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013)* (pp. 2039–2044). IEEE. doi:10.1109/ITSC.2013.6728529
- Sanchez, F., Posso, H., Lederman, P., Fernandez, H., Estrada, F., Leguizamo, P., ... Posso, H. (2008). *Guía Metodológica para el Diseño de Obras de Rehabilitación de Pavimentos Asfálticos de Carreteras*. (M. de Transporte, Ed.) (Segunda.). Bogotá, Colombia: Instituto Nacional de Vías.
- Sandler, R., & Lindenbaum, M. (2006). Gabor Filter Analysis for Texture Segmentation. In *2006 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop (CVPRW'06)* (pp. 178–178). IEEE. doi:10.1109/CVPRW.2006.86
- Senthilkumaran, N., & Rajesh, R. (2009). Edge Detection Techniques for Image Segmentation – A Survey of Soft Computing Approaches. *International Journal of Recent Trends in Engineering (IJRTE)*, 1(2), 250–254.
- Sezgin, M., & Sankur, B. (2004). Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation. *Journal of Electronic Imaging*, 13, 146–168. Retrieved from http://www.researchgate.net/publication/202972407_Survey_over_image_thresholding_techniques_and_quantitative_performance_evaluation
- Socorras, V., Gomez, E., & Obregon, N. (2014). Calibración de imágenes de radares meteorológicos. *Tecnura*, 18(41), 12–26. Retrieved from <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/article/view/7019/8691>
- Zhang, J., Tan, T., & Ma, L. (2002). Invariant texture segmentation via circular Gabor filters. In *Object recognition supported by user interaction for service robots* (Vol. 2, pp. 901–904). IEEE Comput. Soc. doi:10.1109/ICPR.2002.1048450





OpenRRArch: una arquitectura abierta, robusta y confiable para el control de robots autónomos

OpenRRArch: An open, robust and reliable architecture for controlling autonomous robots

Fredy Hernán Martínez Sarmiento¹, Diego Armando Giral Ramírez²

Fecha de recepción: 16 de febrero de 2016

Fecha de aceptación: 23 de noviembre de 2016

Cómo citar: Martínez S., F.H. y Giral R. D.A. (2017). OpenRRArch: una arquitectura abierta, robusta y confiable para el control de robots autónomos. *Revista Tecnura*, 21(51), 96-104. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.1.a07

Resumen

Contexto: Los sistemas de control y navegación de robots autónomos constituyen un dinámico campo de investigación en robótica. Los esquemas y estrategias propuestos como posible solución a problemas se evalúan siempre sobre prototipos de laboratorio a fin de determinar su desempeño real. Se propone en este artículo una arquitectura para el diseño y desarrollo de sistemas robóticos, particularmente sistemas autónomos multirrobot, que facilite el trabajo en laboratorio gracias a una arquitectura abierta con características de robustez y confiabilidad.

Método: La arquitectura se soporta en herramientas *hardware* y *software open source*. La estrategia de operación y comunicación se caracteriza por un bajo consumo de recursos, tanto en procesamiento como en comunicación, y operación en tiempo real. Se utiliza Linux como plataforma de desarrollo y sistema operativo, en particular para el esquema de comunicación, y los sistemas embebidos sobre un procesador de 32 bits con set de instrucciones de 16 bit (no es ARM, pero con arquitectura Harvard) corriendo a 80 MHz (el LX106 de Tensilica Xtensa) para la implementación de los agentes. Dadas

las herramientas utilizadas, la solución también demuestra ser eficiente y económica.

Resultados: La arquitectura ha sido aplicada exitosamente en la implementación de una estrategia de navegación para un conjunto de pequeños robots autónomos. A un conjunto de robots se les proporciona capacidad de comunicación WiFi, capacidad mínima de localización del ambiente (detección de obstáculos) y un algoritmo de navegación basado en tamaños poblacionales (imitando el Quorum Sensing Bacterial). El sistema se implementa con gran facilidad, demostrando no sólo la viabilidad de la estrategia de navegación, sino también la versatilidad, robustez y escalabilidad de la arquitectura OpenRRArch.

Conclusiones: La arquitectura propuesta constituye una solución para la construcción de sistemas de control distribuidos, en particular sistemas robóticos multiagente. Ésta permite una rápida implementación (a bajo costo y con alto desempeño) de sistemas con capacidad de cooperación y comunicación en tiempo real. La arquitectura permite la integración de agentes con diferentes capacidades de procesamiento, lo cual permite adaptación a las necesidades de la tarea. Las funciones de cada uno de los agentes

1 Ingeniero electricista, especialista en Gestión de Proyectos de Ingeniería, candidato a doctor en Ingeniería – Sistemas y Computación. Docente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: fhmartinezs@udistrital.edu.co

2 Ingeniero eléctrico, magíster en Ingeniería Eléctrica. Docente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: dagiral@correo.udistrital.edu.co

pueden reducirse o aumentarse a partir de su código, o seleccionando otro *hardware* embebido.

Palabras clave: control, Linux, Open-source, robots, sistemas embebidos.

Abstract

Context: The control and navigation systems of autonomous robots constitute a dynamic field of research in robotics. The possible solutions to problems are often evaluated with laboratory prototypes in order to determine their real performance. We propose in this paper an architecture for the design and development of robotic systems (particularly autonomous multi-robot Systems) that facilitate the work in laboratory due to an open robust and reliable architecture.

Method: The architecture is supported in open source hardware and software. The operation and communication strategy is characterized by a low consumption of resources, both in processing and communication, and real-time operation. As development platform and Operating System, we used Linux: the communication scheme and the embedded systems run on a 32-bit processor, with a 16-bit instruction set (not ARM, but with Harvard architecture), at 80 MHz (Tensilica Xtensa LX106) for the

implementation of the agents. The tools used allow the solution to be both efficient and inexpensive.

Results: The architecture has been successfully applied in the implementation of a strategy of navigation for a set of small autonomous robots. A set of robots were provided with wireless communication capability, minimum capacity of environmental sensing (obstacle detection) and a navigation algorithm based on population sizes (mimicking the bacterial Quorum Sensing). The system is implemented with great ease, demonstrating both the viability of the navigation strategy and the versatility, robustness and scalability of the OpenRRArch architecture.

Conclusions: The proposed architecture constitutes a solution for the construction of distributed control systems, in particular multi-agent robotic systems. It enables the rapid, low-cost and high-performance implementation of systems with real-time cooperation and communication capabilities. The architecture allows the integration of agents with different processing capabilities, which allows adaptation to the needs of the task. The functions of each agent can be reduced or increased from their code, and/or by selecting other embedded hardware.

Keywords: Control, Embedded Systems, Linux, Open-source, Robots.

INTRODUCCIÓN

El problema de encontrar una ruta de navegación para un robot móvil autónomo (o varios robots móviles autónomos en el caso de enjambres de robots) consiste en hacer que el agente (un objeto real con dimensiones físicas) encuentre y siga un camino que le permita moverse desde un punto de origen hasta un punto de destino (configuración deseada) respetando las restricciones impuestas por la tarea o por el ambiente (obstáculos, espacio libre para movimientos, puntos intermedios a visitar, y costos máximos a incurrir en la tarea) (Teatro, Eklund, y Milman, 2014). Este sigue siendo un problema abierto de investigación en

robótica (Jacinto, Giral y Martínez, 2016; Oral y Polat, 2016).

En este artículo se presenta la propuesta de diseño de sistemas colectivos basados en OpenRRArch (arquitectura abierta, robusta y confiable para el control de agentes autónomos), esquema que encarna los principios de los sistemas multiagentes distribuidos (robustez mediante alta redundancia), abierta (*hardware* y *software open-source*), minimalista y de fácil integración (agentes simples e idénticos). El propósito de dicha arquitectura es el de permitir, entre otras funciones, el control de movimiento a bordo de pequeños robots autónomos, y la planificación de trayectorias a partir de lecturas locales con capacidad de comunicación *peer-to-peer*

(P2P). Esta arquitectura, sin embargo, puede ser utilizada en otro tipo de sistemas con configuraciones similares, como es el caso de las redes inalámbricas de sensores (*Wireless Sensor Networks*) (Kiwoong *et al.*, 2012; Lee, Cho y Lee, 2013).

Para la correcta navegación, en un esquema autónomo reactivo como el que se busca en esta investigación, cada agente (robot) debe localizar la información pertinente del medio (lo cual incluye, además de obstáculos y otras restricciones del ambiente, procesos de comunicación con agentes cercanos), realizar cálculos de su posición estimada respecto al destino, trazar una respuesta de movimiento, ejecutarla y verificar los resultados. Esta estrategia de navegación es fuertemente dependiente de la cantidad y calidad de información procesada y comunicada, razón por la cual se complementa con esquemas de filtrado de información inspirados en los procesos de atención de los seres vivos (Luna, Silva y Costa, 2016). El sistema (conformado por el agente, o los agentes en el caso general de sistemas colectivos) debe tener una estrategia de atención que le permita ejecutar diferentes algoritmos de acuerdo con el objetivo de la tarea. Este principio de diseño se utiliza mucho en los esquemas híbridos, y permite el desarrollo de sistemas adaptables y con alta velocidad de respuesta.

Otras características importantes incorporadas a la arquitectura propuesta incluyen alto desempeño tanto en *hardware* y *software*. En *hardware*, se pone especial cuidado en cuanto al consumo de energía (Elwahab, Nouali, Moussaoui y Derder, 2015), al esquema de comunicación IP-WSN (protocolo para la interconexión entre redes IP (*Internet Protocol*) y redes inalámbricas de sensores (*Wireless Sensor Networks*)) (Kiwoong *et al.*, 2012), y los recursos disponibles en los agentes (Kouicem *et al.*, 2014). En cuanto a *software*, se busca facilitar la construcción de colecciones de datos (Elwahab *et al.*, 2015), el uso de agentes específicos para la recolección de información (Carlson y Schrader, 2012), la fácil interacción entre agentes (Wenfeng, Junrong y Weiming, 2011), y simplificar al máximo la arquitectura misma de comunicación (Sirin,

Parsia, y Hendler, 2005; Tari *et al.*, 2010; Yachir, Amirat, Chibani y Badache, 2012).

El grupo de investigación ARMOS ha trabajado por varios años en estos problemas. En cuanto a estrategias de planeación para robots móviles, ha evaluado el desempeño de diferentes estrategias geométricas (Contreras, Martínez y Martínez, 2015; Martínez, Jacinto y Martínez, 2014), ha planteado algoritmos de movimiento para sistemas reactivos (Espinosa, Castañeda y Martínez, 2015; Martínez y Delgado, 2010), ha desarrollado un amplio número de prototipos embebidos con diferentes capacidades de localización, comunicación y capacidad de procesamiento (Espinosa, Castañeda y Martínez, 2015; Montiel, Valderrama y Martínez, 2016), y ha formulado arquitecturas para la coordinación colectiva de robots autónomos. Este trabajo presenta la evolución actual de todos estos sistemas, estructurados alrededor de una única arquitectura que permite el desarrollo y la evaluación sistematizada de estrategias de control de movimiento para robots. La arquitectura como tal presenta una estructura modular diseñada por capas, lo que permite aislar problemas específicos durante la etapa de diseño.

El artículo se encuentra organizado de la siguiente forma. Primero, se formula el problema estudiado y se presentan algunos conceptos preliminares, el perfil funcional y algunas otras consideraciones de diseño. En "Metodología" se detalla completamente el diseño del sistema, incluyendo los criterios de selección y las especificaciones finales adoptadas. En "Resultados" se presenta la evaluación del desempeño observado en laboratorio del prototipo. Por último, se plantean las conclusiones.

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La evaluación de estrategias de control distribuidas requiere de una plataforma soportada en agentes embebidos, con estructura modular y por capas, que permita una implementación transparente. La estructura por capas debe permitir separar e implementar diferentes funciones a diferentes niveles

de acuerdo con el nivel de desempeño requerido. Además, el sistema de comunicación debe ser eficiente, respaldado por un protocolo fácil de implementar, pero confiable. Los elementos a integrar en dicha arquitectura son:

1. Un enlace de comunicación P2P entre todos los agentes bajo algún protocolo estándar. Dicho protocolo debe ser fácil de implementar a nivel de *hardware* sobre cualquier dispositivo embebido (microcontroladores, CPLDs, FPGAs, DSPs, procesadores ARM y x86) mediante enlaces inalámbricos. Estas características son las esperadas en aplicaciones en donde se transmiten mensajes cortos durante cortos periodos de tiempo.
2. Fácil conexión a este esquema de comunicación por parte de todos los módulos embebidos del sistema multiagente. Cada módulo del sistema es, además de un elemento de comunicación, un nodo de control con capacidad de localización, procesamiento y actuación. Estos conforman la capa más baja a nivel de control, y de hecho ejecutan algoritmos directos de control. Dado que la capacidad de procesamiento es limitada, se espera que el esquema de comunicación no consuma sus recursos.
3. Una capa de control superior soportada en la convergencia del algoritmo de control, y que se ve reflejada en el comportamiento del sistema (de todos los módulos como un todo). Si bien en términos generales no se espera que exista una unidad de control central dada la naturaleza del sistema multiagente, la arquitectura sí debe permitir la inclusión de módulos embebidos de mayor capacidad de procesamiento para coordinar la comunicación. Estos módulos también deben desempeñar el papel de constructores de colecciones de datos (y, por tanto, integrarse fácilmente en un entorno IoT, *Internet of Things*), y localización/procesamiento de información del alto nivel (sensores inteligentes a partir de procesamiento de imágenes o sonido, por ejemplo). También pueden tener un algoritmo de operación más complejo que afecte el comportamiento global del sistema.

METODOLOGÍA

La arquitectura distribuida propuesta para el control de sistemas multiagentes autónomos (OpenRRArch) se muestra en la figura 1. El sistema permite una gran cantidad de módulos tanto en el nivel de bajo control como en el de alto control (por simplicidad solo se ilustra uno en cada caso). Sin embargo, lo normal es tener un solo módulo bróker en este último nivel (y, de hecho, debe existir por lo menos uno). Si se incluyen más módulos de nivel alto de control, estos se conectan al sistema como clientes MQTT (*MQ Telemetry Transport*). Los únicos elementos que son opcionales en la arquitectura son los terminales, los cuales se utilizan para visualizar por parte del usuario las variables del sistema.

En cuanto a funcionalidad, la arquitectura distingue dos capas: la de comunicación y la de aplicación. La primera se soporta en el estándar MQTT. Este es un estándar ISO (ISO/IEC PRF 20922) soportado en un protocolo de mensajería muy ligero que opera con métodos de suscripción-publicación. Está diseñado para aplicaciones de control en redes TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) que requieren un código de implementación pequeño, como es el caso del *hardware* embebido. El protocolo requiere un bróker, el cual distribuye los mensajes en la red, y que en el caso de la figura 1 se implementa en un OS Linux Debian sobre una plataforma H3 Quad-core Cortex-A7 con GPU Mali400MP2. A este bróker suscriben y publican todos los demás módulos del sistema como clientes. El esquema de comunicación utilizado es *peer-to-peer*, con lo que cada módulo se puede comunicar directamente con cualquier otro módulo del sistema (siempre y cuando estén dentro del alcance del *router*).

La capa de aplicación incluye al conjunto de sensores y actuadores conectados a los diferentes módulos del sistema. En la prueba de navegación documentada en este artículo, el bróker cuenta con un sensor óptico (cámara digital) que se utiliza para identificar *landmarks* geométricos de colores en el

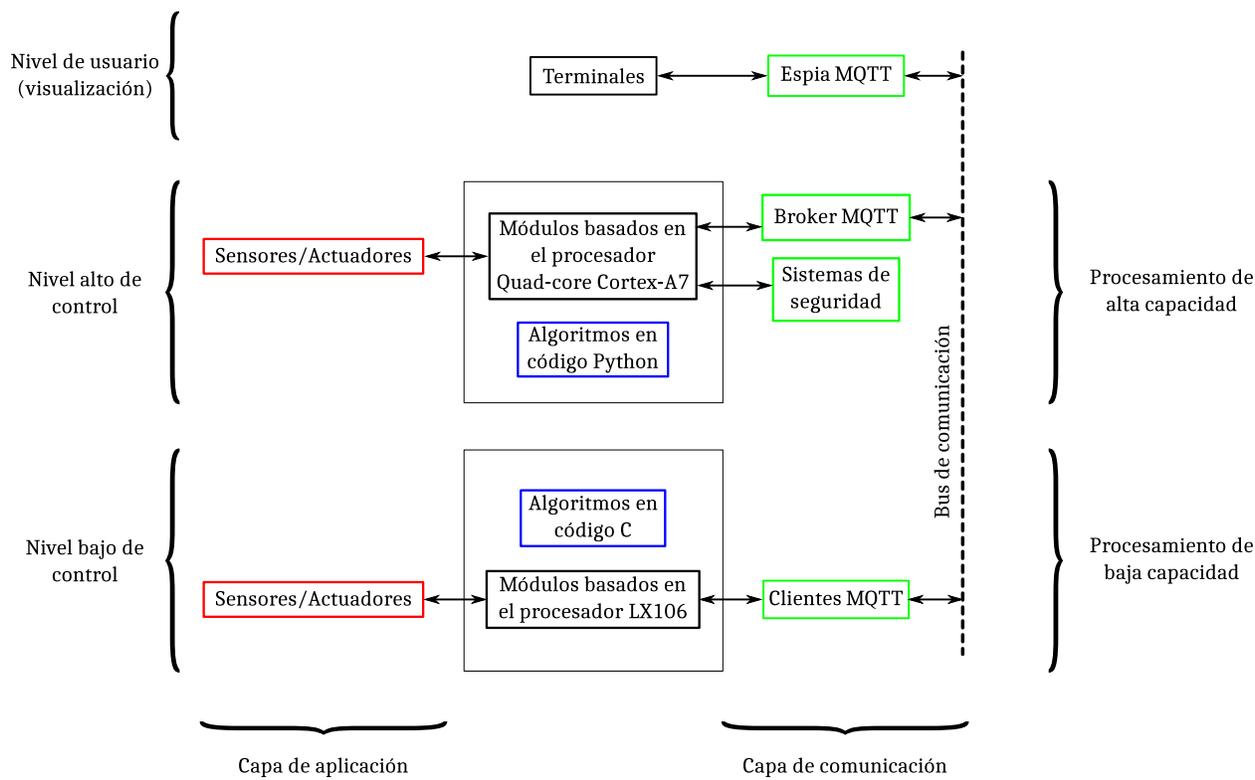


Figura 1. Diagrama general de la arquitectura del sistema

Fuente: elaboración propia.

ambiente. El código de procesamiento de las imágenes se escribió en Python con apoyo de OpenCV. También se implementaron otros dos módulos sobre plataformas microcontroladas (con el microcontrolador LX106), estos módulos se dotaron solamente con sensores de impacto. Los tres módulos poseen, cada uno, dos actuadores, dos servomotores que realizan el desplazamiento de los módulos en el ambiente. Todos los módulos poseen antenas y capacidad de conexión a la red WiFi.

La implementación de los algoritmos en ambos tipos de módulos es bastante sencilla. El microcontrolador LX106 ejecuta los códigos mucho más rápido que la plataforma Cortex-A7 (menos de 2 μ s frente a unos 70 ms). Python es interpretado, y la captura y procesamiento de imágenes es mucho más lenta que la lectura del pulsador digital. Sin embargo, esto no resulta de importancia en

la aplicación debido al retardo en la acción de los actuadores (servomotores), que para desplazar al robot toman tiempos cercanos al segundo. No hay control de velocidad en los motores, el desplazamiento se logra haciéndolos rotar en un sentido u otro (A o B) o pararlos completamente, con lo cual se tienen siete estados de movimiento en el robot:

- Avanza (motor izquierdo en sentido A, y motor derecho en sentido B).
- Retrocede (motor izquierdo en sentido B, y motor derecho en sentido A).
- Gira a la derecha avanzando (motor izquierdo en sentido A, y motor derecho sin movimiento).
- Gira a la izquierda avanzando (motor izquierdo sin movimiento, y motor derecho en sentido A).
- Gira a la derecha retrocediendo (motor izquierdo sin movimiento, y motor derecho en sentido B).

- Gira a la izquierda retrocediendo (motor izquierdo en sentido B, y motor derecho sin movimiento).
- No se mueve (motor izquierdo sin movimiento, y motor derecho sin movimiento).

Esto es bastante útil para simular a nivel de estados discretos el comportamiento de los algoritmos de navegación (modelo híbrido del sistema).

RESULTADOS

En esta sección se presenta el análisis de desempeño de la arquitectura con una tarea de navegación real. La evaluación general pretende probar tres hipótesis: (1) que la efectividad de la estrategia de navegación puede analizarse independiente de la estrategia de implementación; (2) que la arquitectura OpenRRArch no altera el diseño del sistema; y finalmente (3) que el rendimiento del algoritmo de navegación se ve modificado por el *hardware* de la capa física, pero que estas variaciones no alteran

su convergencia. Si estas tres hipótesis son correctas, entonces OpenRRArch es de hecho una excelente herramienta para estudiar el desempeño de estrategias de navegación.

La tarea de navegación utilizada para la evaluación de la arquitectura es bastante simple. Los módulos microcontrolados con solo sensores de impacto deben navegar el ambiente evitando obstáculos. Es decir, cuando uno de estos dos robots se estrella con un obstáculo (o un límite del ambiente), la orden de control indica que el robot debe girar a la derecha o izquierda (sentido elegido aleatoriamente) un ángulo aleatorio. La única excepción a este comportamiento es si otro robot reporta que encontró un obstáculo al mismo tiempo. En este caso los robots se deben poner de acuerdo para verificar si se han encontrado entre sí, caso en el que deben permanecer quietos. Si no se han encontrado, deben regresar a la navegación aleatoria.

El módulo con procesador Cortex-A7, bróker y con cámara digital (figura 2), debe buscar los

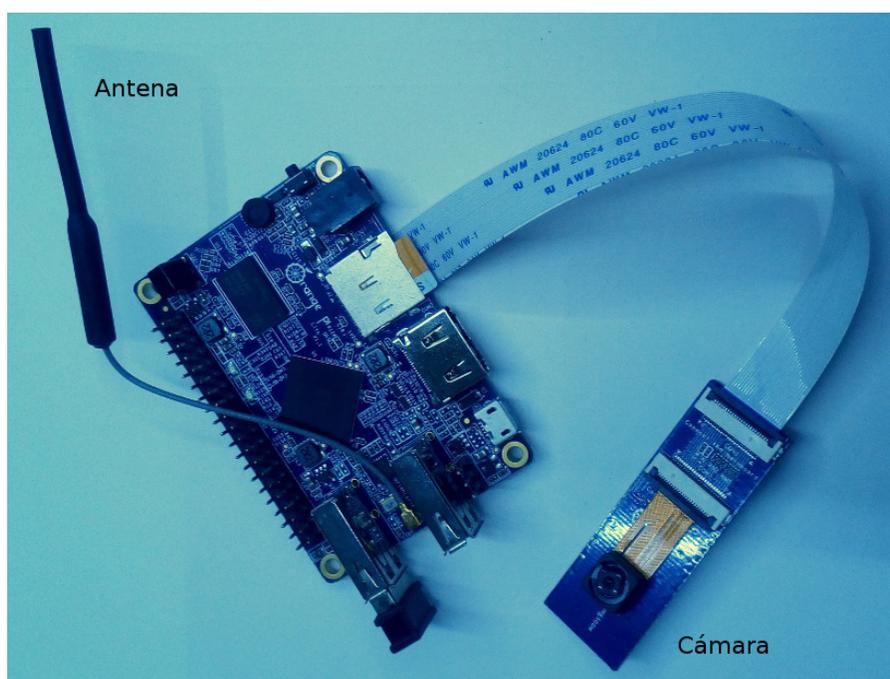


Figura 2. Detalle de la plataforma H3 Quad-core Cortex-A7 utilizada en el módulo bróker

Fuente: elaboración propia.

círculos rojos colocados en el cuerpo de los otros robots. Si no los ve luego de un proceso de exploración girando sobre su eje, se debe desplazar en el espacio libre de forma aleatoria un par de segundos, y explorar de nuevo. Si localiza el *landmark*, debe navegar hacia él.

Estos algoritmos de comportamiento definen la funcionalidad del sistema, y están diseñados para que los robots se agrupen en alguna parte del ambiente. El punto de agrupación en esta tarea puede condicionarse a características específicas del ambiente. Por ejemplo, que los robots solo se detengan si el nivel de luz es alto (en un área de carga por paneles solares, por ejemplo), pero si está por debajo de algún umbral, que continúen la navegación aleatoria. Este comportamiento de agrupación puede hacer que los robots se agrupen en ciertas áreas luego de desarrollar alguna tarea (limpieza, búsqueda, ...).

Se realizaron cerca de 50 experimentos para diferentes tamaños y configuraciones del ambiente

de navegación. El ambiente de navegación se mantuvo siempre con forma cuadrada, pero su tamaño se varió entre 30 cm × 30 cm y 2,4 m × 2,4 m. A fin de analizar la independencia de comportamiento con respecto a la arquitectura OpenRRArch, se desarrolló un modelo ideal de comportamiento considerando los tiempos del prototipo real (retardo de motores, sensores y tiempos de espera asignados en los algoritmos), para su simulación por computador. La simulación se realizó en Python mediante Pygame. Los resultados se resumen en la figura 3.

Estos resultados muestran coherencia en los tiempos promedios de convergencia sin importar si se trata de plataforma real o simulación (estadísticamente se puede demostrar que son iguales). También se observa que las variaciones en el tiempo dependen del tamaño del ambiente, y que de hecho hay una relación de proporcionalidad. Estos resultados validan las hipótesis de desempeño de la arquitectura.

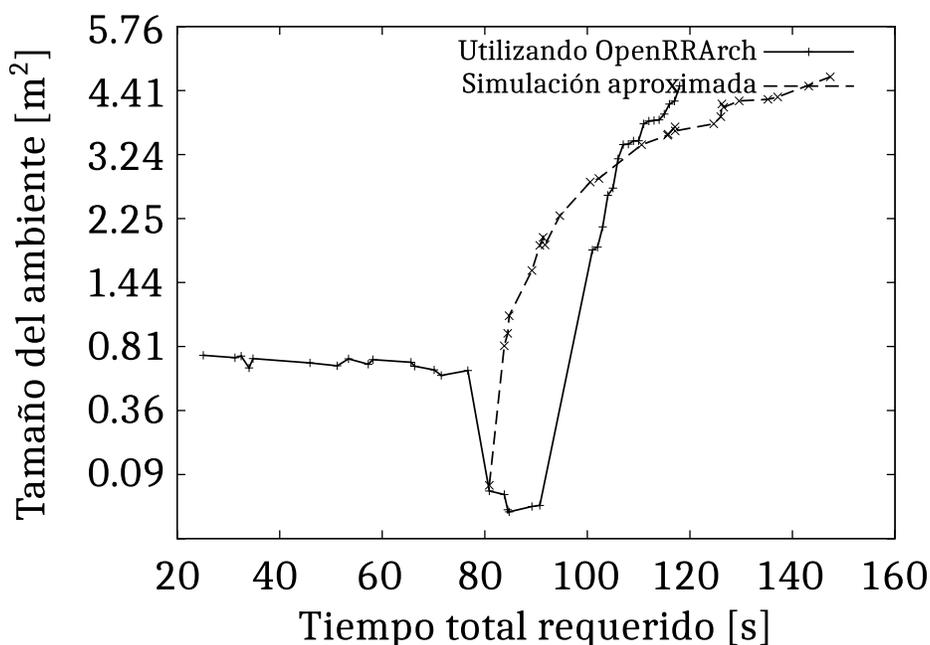


Figura 3. Resultados de tiempo de convergencia del algoritmo para diferentes tamaños de ambiente frente a simulación del caso ideal

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

El artículo propone una arquitectura distribuida para la implementación de sistemas multiagente denominada OpenRRArch. Dicha arquitectura se pretende utilizar para analizar el desempeño de esquemas de navegación de pequeños robots autónomos con control reactivo. Como criterios de diseño se considera el uso de herramientas *hardware* y *software open source*, así como características de robustez, escalabilidad y confiabilidad. OpenRRArch permite la rápida implementación, a bajo costo, y con alto desempeño, de sistemas con capacidad de cooperación y comunicación en tiempo real. La arquitectura permite la integración de agentes con diferentes capacidades de procesamiento, lo que permite adaptación a las necesidades de la tarea. Las funciones de cada uno de los agentes pueden reducirse o aumentarse a partir de su código, o seleccionando otro *hardware* embebido. Mediante pruebas de laboratorio se pudo determinar que para una básica tarea de agrupamiento la arquitectura no altera el funcionamiento del algoritmo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Carlson, D. y Schrader, A. (2012). Dynamix: An open plug-and-play context framework for android. En *3rd International Conference on the Internet of Things (IOT 2012)* (pp. 1-8).
- Contreras, J.; Martínez, F. y Martínez, F. (2015). Path planning for mobile robots based on visibility graphs and A* algorithm. *Proceedings of Spie*, 9631, 1-5.
- Elwahab, A.; Nouali, O.; Moussaoui, S. y Derder, A. (2015). A BLE-based data collection system for iot. En *First International Conference on New Technologies of Information and Communication (NTIC 2015)* (pp. 1-5).
- Espinosa, O.; Castañeda, L. y Martínez, F. (2015). Minimalist artificial eye for autonomous robots and path planning. *Lecture Notes In Computer Science*. *Intelligent Data Engineering and Automated Learning*, 9375, 232-238.
- Jacinto, E.; Giral, M. y Martínez, F. (2016). Modelo de navegación colectiva multiagente basado en el quorum sensing bacterial. *Revista Tecnura*, 20(47), 29-38.
- Kiwoong, K.; Minkeun, H.; Taehong, K.; Seong, H. y Daeyoung, K. (2012). The stateless point to point routing protocol based on shortcut tree routing algorithm for IP-WSN. En *3rd International Conference on the Internet of Things (IOT 2012)* (pp. 1-8).
- Kouicem, A.; Chibani, A.; Tari, A.; Amirat, Y. y Tari, Z. (2014). Dynamic services selection approach for the composition of complex services in the web of objects. En *IEEE World Forum on Internet of Things (WF-IOT 2014)* (pp. 298-303).
- Lee, H.; Cho, Y. y Lee, B. (2013). Robot-controlled fusion. *Electronics Letters*, 49(15), 912-912.
- Luna, E.; Silva, A. y Costa, C. (2016). An attentional model for autonomous mobile robots. *IEEE Systems Journal*, 99, 1-12.
- Martínez, F., y Delgado, A. (2010). Hardware emulation of bacterial quorum sensing. *Advanced Intelligent Computing Theories and Applications, Lecture Notes in Computer Science*, 6215, 329-336.
- Martínez, F.; Jacinto, E. y Martínez, F. (2014). Using the delaunay triangulation and voronoi diagrams for navigation in observable environments. *Revista Tecnura*, 18, 81-87.
- Montiel, H.; Valderrama, H. y Martínez, F. (2016). Using embedded robotic platform and problem-based learning for engineering education. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 59, 435-445.
- Oral, T. y Polat, F. (2016). MOD* Lite: an incremental path planning algorithm taking care of multiple objectives. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 46(1), 245-257.
- Sirin, E.; Parsia, B. y Hendler, J. (2005). Template-based composition of semantic web services. En *AAAI Fall Symposium on Agents and the Semantic Web* (pp. 85-92).
- Tari, K.; Amirat, Y.; Chibani, A.; Yachir, A. y Mellouk, A. (2010). Context-aware dynamic service

composition in ubiquitous environment. En *IEEE International Conference on Communications (ICC 2010)* (p. 1-6).

Teatro, T.; Eklund, M. y Milman, R. (2014). Nonlinear model predictive control for omnidirectional robot motion planning and tracking with avoidance of moving obstacles. *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, 37(3), 151-156.

Wenfeng, L.; Junrong, B. y Weiming, S. (2011). Collaborative wireless sensor networks: A survey. En *IEEE*

International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC 2011) (pp. 2614-2619).

Yachir, A.; Amirat, Y.; Chibani, A. y Badache, N. (2012). Towards an event-aware approach for ubiquitous computing based on automatic service composition and selection. *Annales des Télécommunications*, 67(7), 341-353.





Global navigation approach for assistant robot

Enfoque de navegación global para un robot asistente

Fernando Martínez Santa¹, Santiago Orjuela Rivera², Mario Arbulú Saavedra³

Fecha de recepción: 12 de marzo de 2016

Fecha de aceptación: 23 de noviembre de 2016

Cómo citar: Martínez S., F.; Orjuela R., S. y Arbulú S., M. (2017). Global navigation approach for assistant robot. *Revista Tecnura*, 21(51), 105-117. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.1.a08

Abstract

Context: This work shows a novel navigation approach based on images for an assistant hybrid robot composed by a humanoid and an omnidirectional platform.

Method: This approach introduces a complex space analysis, using Zeros and Poles attraction-repulsion principle. In order to perform the algorithm, an integrated system is developed; this system includes: an external camera to take a global navigation surface view, the assistant robot, and communication devices. Navigation is supported by some digital image processing algorithms and performed using the root location technique.

Results: An integrated system of global navigation with external sensors was successfully implemented for the proposed hybrid robot.

Conclusions: Some simulation and experimental tests will be discussed in order to validate this proposal and the whole system. Additionally, some suggestions for future research are proposed.

Keywords: Navigation, Path planning, Mobile robot, Root Locus, Omnidirectional platform.

Resumen

Contexto: En este trabajo se muestra un enfoque de navegación novedoso basado en imágenes para un robot asistente híbrido compuesto por un humanoide y una plataforma omnidireccional.

Método: Este enfoque presenta un análisis del espacio complejo, usando el principio de atracción y repulsión de polos y ceros. Para desarrollar el algoritmo se desarrolla un sistema integrado, el cual incluye: una cámara externa (para tomar la vista de la superficie global de navegación), el robot asistente, y los algunos dispositivos de comunicación. La navegación está soportada por algoritmos de procesamiento digital de imágenes y llevada a cabo usando la técnica de localización de raíces.

Resultados: Se obtuvo un sistema integrado de navegación global con sensorica externa para el robot híbrido propuesto.

Conclusiones: Algunas simulaciones y pruebas experimentales se discuten con el fin de validar esta propuesta y el sistema entero. También se dan sugerencias para trabajos futuros.

Palabras clave: navegación, planeación de rutas, robot móvil, localización de raíces, plataforma omnidireccional.

- 1 Electronic Control and Instrumentation Engineer, magister in Electronic Engineer and computers. Professor of District University Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contact: fmartinezs@udistrital.edu.co
- 2 Electronic Engineer student, Corporación Unificada Nacional de Educación Superior (CUN). Bogotá, Colombia. Contact: santiago.orjuela@cun.edu.co
- 3 Mechanical Electrical Engineer, doctor in Electrical Electronic Engineering and Automatics, post doctorate in Robotics. Professor of Corporación Unificada Nacional de Educación Superior (CUN). Bogotá, Colombia. Contact: mario_arbulu@cun.edu.co

INTRODUCTION

Many path-planning algorithms had been proposed in order to increase the robot motion autonomy, at any environment. For example, granular control algorithm to solve a labyrinth right path, in which the robot is maintained at the center of corridor during its motion. This approach makes IR sensor linear with very accurate precision (Ahsan & Hasan, 2015), but the application is constrained to a well linearized method. Another approach is (Balestrino & Landi, 2002), which details a multiple vehicle path-planning coordination using root locus approach, but it is constrained to structured work space with known obstacles, to navigate at flat surface without collisions. Other proposals can be discussed, such as neural networks approach which can find paths developing networks (Andrakhanov, 2013) and contribute to solve paths on uncertainty environments, but at a high computation cost. Classical methods such as potential field are another choice at plane surface (Arslan & Koditschek, 2016; Bermudez, Castellar, Montiel, & Ceballos, 2004) and 3D Cartesian space (Chen, Luo, Mei, Yu & Su, 2016; Mac, Copot, Hernandez & De Keyser, 2016; Melingui, Merzouki, Mbede & Chetibi, 2014; Orozco-Rosas, Montiel & Sepulveda, 2015; Vechet, Chen & Krejsa, 2014), with low cost computation time and feasible to real-time applications. The idea of this research is to try innovative path-planning techniques for real-time applications. In some cases, it is necessary to build an environment map because it is not possible to have external information of global navigation surface (i.e. by external camera). Thus when the robot moves, the environment map is built, and then real-time path-planning is developed during the robot navigation at any environment (Fujimori, Murakoshi, & Ogawa, 2004). However, in our case there is no need to build a map, because it is possible to use an external camera. On the other hand, the case of manipulator robot

must take into account self-collisions between its links while its end effector is going to the goal (Gaschler, Nogina, Petrick & Knoll, 2014), so 3D path planning algorithms are proposed too.

Our approach takes into account a mobile robot (so self-collision avoidance is not a problem); it also proposes evolutionary algorithms, well known as genetic algorithms, in order to learn the environment performance and got the right path without collisions (Lin, Chen, Liu, & Yu, 2013). However, the trouble with those methods is strong computation and high cost while the system learns. Another approach, often used when the obstacles on the environment are in motion too, improves the path estimation because in real world the mobile robots are in motion in environments with people, other robots, and so on; thus optimization algorithms got the right path (Mohajer, Kiani, Samiei & Sharifi, 2013). This work proposes the root locus approach, which simplifies the path-planning computation and finds the free-obstacle-collision path faster than classical potential fields, neural networks, and evolutionary algorithms. Additionally, our approach uses the single poles and zero attraction and repulsion principles on each obstacle to find the better path. In this case a previous approach contributes the basis to this work (Arbulú Saavedra, Martínez Santa & Montiel Ariza, 2015), when the right path could be found in unstructured work space.

The proposed approach can reach similar or even improved execution time than that of other algorithms, such as Voronoi diagrams (Pehlivanoglu, 2012). Likewise, it works similar to artificial potential field, but it is much better over round environments or with round-shaped obstacles. In general, this approach would be successfully used in radial navigation environments due that the planned paths draw curved trajectories and semi circles, especially semicircular ones. In summary this work contributes to create a solution that:

Reach better execution times than Voronoi diagrams.

- Works similar to the artificial potential field.
- Is useful in environments with radial distribution.
- Can generate soft curved paths.

So, this work is divided as follows: section 2, theoretical background; section 3, proposed approach; section 4, simulations and experimental results; section 5, conclusions; and section 6, future work.

THEORETICAL BACKGROUND

HSV image color threshold

The *HSV* image representation is an alternative to *RGB* regular representation of color images. It has three matrices: Hue *H*, Saturation *S* and Value *V*. Hue matrix represents the color itself; Saturation and Value represent the purity and brightness of color, respectively. This images color representation has the advantage to simplify the making of the color threshold by computing one matrix instead of three matrices. The color threshold produces a binary image *B*, comparing the Hue matrix *H* with a low threshold and a high one, as equation (1) shows.

$$B = (H < t_h) \wedge (H > t_l) \quad (1)$$

Then image *B* contains pixel of the original image that belong to the color range defined by t_l and t_h . In this paper these thresholds are defined depending on the object to apply threshold segmentation.

Image convolution blurring

The blurring method used in this paper applies a two-dimensional matrix convolution operation, using an average disk-shaped convolution matrix. This means that the summation of point values of

the disk is one, which produces an average result after convolution finishes. It also means that the blurred images are soft due that the shape used has not hard angles.

Root locus method

So far, poles and zeros location have been one of the most used method to design controllers for dynamic systems. It is based on the relationship between system root location in the complex plane and its temporal behavior (Arbulú Saavedra *et al.*, 2015). Root locus method creates parametric curves starting from original system poles, and those curves represent the new position of the poles when a feedback constant *K* is changed until tending to infinite. Each path connects a pole with a zero of the same system; then the system has less zeros than poles, the missing zeros tending to infinite, and the correspondent generated paths too.

METHODOLOGY

This global navigation method is implemented for an assistant robot composed by NAO™ and FES-TO Robotino™ robotic platforms for redundant manipulation and locomotion (Muñoz Martinez, Gil-Gómez & Garcia Cerezo, n.d.; Zambrano Pérez, 2015), respectively, as it is shown in Figure 1. Its specifications are detailed in Table 1. That navigation is based on external sensing and control; it uses a panoramic IP camera, a computer, and the assistant robot. The complete diagram block of the system is shown in Figure 2. The panoramic IP camera is placed in the middle of the scene, two and a half meters from the floor. The process has four main steps: image acquisition and pre-processing, object detection, path-planning algorithm, and locomotion performance, each one is described in detail below.

Table 1. Assistant robot specifications

	Unit	Specifications
Redundant manipulator (NAO™)	Height	58 cm
	Weight	5.4 Kg
	Autonomy	90 min
	DOF	25
	CPU	Intel Atom @1.6 GHz
	Built-in OS	NAOgi 2.0 (linux-based)
	Compatible OS	Windows, MAC OS, Linux
	Programming languages	C++, Python, Java, MATLAB, Urbi, C, .Net
	Sensors	3 HD cameras, 4 microphones, sonar rangefinder, 2 infrared emitters and receivers, inertial unit, 9 tactile sensors, 8 pressure sensors
	Connectivity	WiFi, Ethernet
Wheeled locomotion (Robotino™)	Height	29 cm
	Weight	5 Kg
	Diameter	45 com
	CPU	Intel Core i5 4.4 GHz, 8 GB RAM
	Compatible OS	Windows
	Programming languages	C/C++, Java, .Net, LabVIEW, MATLAB, Simulink, ROS, Microsoft Rob, Developer St.
	Sensors	9 distance infrared sensors, inductive sensor, 2 optical sensors, Full HD camera
Connectivity	2 Ethernet, 6 USB, 1 VGA, 2 PCI	

Source: own work.

**Figure 1.** Assistant robot (NAO plus FESTO Robotino)

Source: own work.

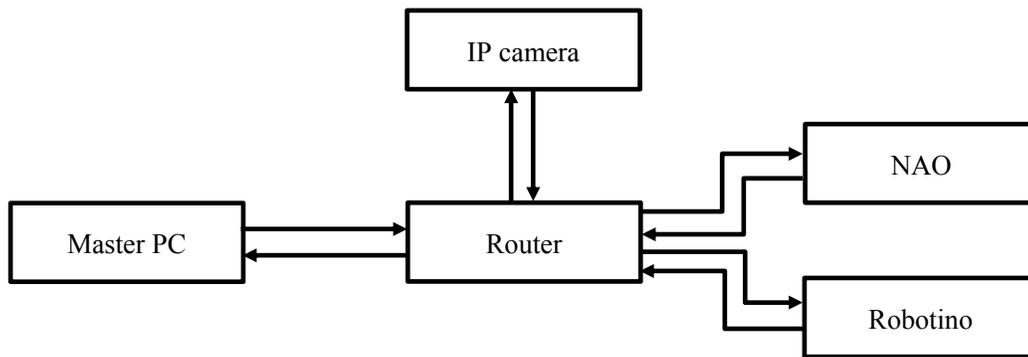


Figure 2. Complete diagram block of system

Source: own work.

Image acquisition and pre-processing

The first step is image acquisition, which uses a fisheye panoramic IP camera. The camera is able to do the geometric transformation for viewing a square scene from the fisheye lens; then it obtains

an image of 1600x1200 pixels at 30Hz (figure 3). After that, a region of interest (ROI) is selected in order to limit only the navigable area, as shown in figure 4. The ROI is a 1300x470-pixel image centered in the original image.

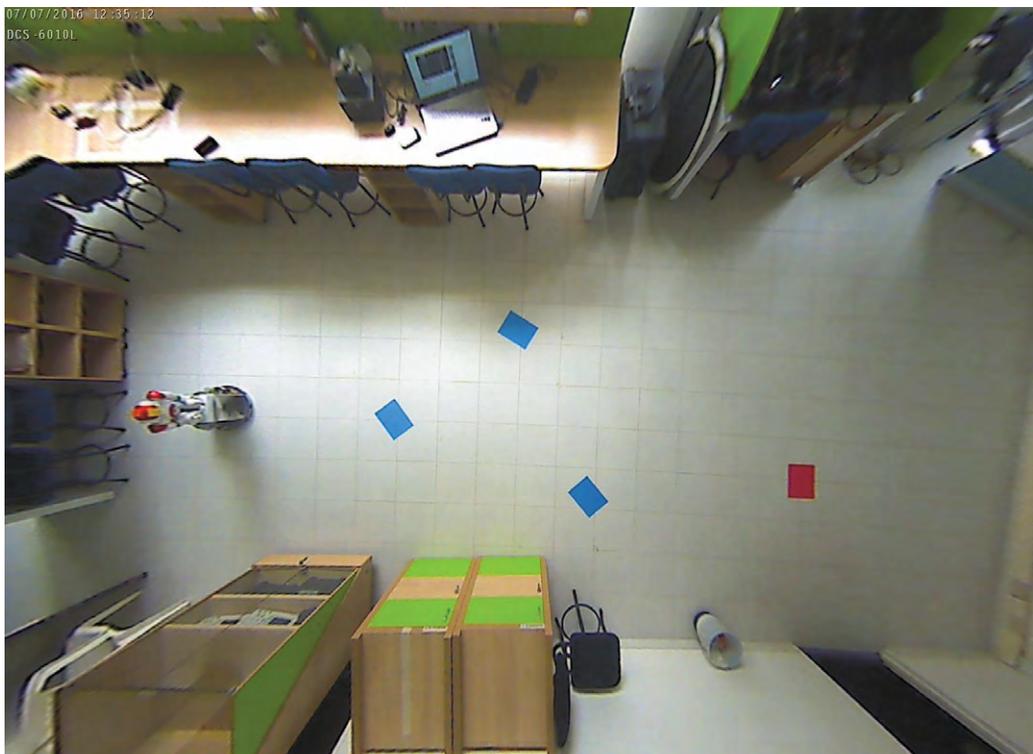


Figure 3. Image acquisition of navigation scene

Source: own work.

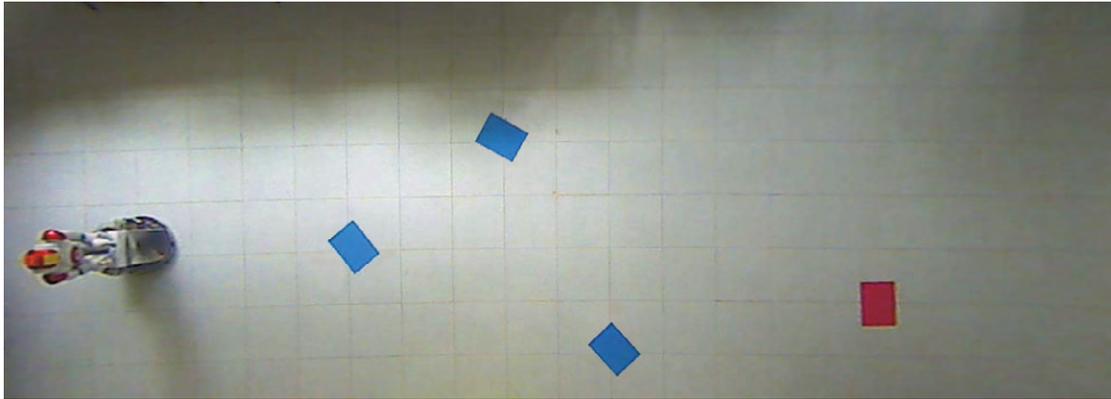


Figure 4. Region of interest (ROI) selection

Source: own work.

The acquired image is turned into *HSV* representation from *RGB*, in order to take advantage of the colors organization in only one matrix (Hue), which facilitates the color threshold. After that, a reduction of the brightness pattern effect is done changing saturation S and value V matrices by blurring these matrices in order to obtain matrices S_b and V_b . Then the proposed correction is a weighted matrix subtraction, as shown in the following equations (2) and (3).

$$S_r = S - S_b * k_s \quad (2)$$

$$V_r = V - V_b * k_v \quad (3)$$

Object detection

This step is used to locate all the objects in the scene, including obstacles, robot and target. Then the system uses color marks: blue for obstacles and red for target. Likewise, for the robot there are two marks, orange and yellow, not only for locating it, but detecting its direction, as shown in Figure 4. After that, a color threshold for all the marking colors is done over hue matrix H from the image in *HSV* representation, which allows to obtain four binary images: one for the obstacles, one for the target and two for the robot. The binary image of obstacles is shown in Figure 5. On the other hand,



Figure 5. Binary image of obstacle segmentation

Source: own work.

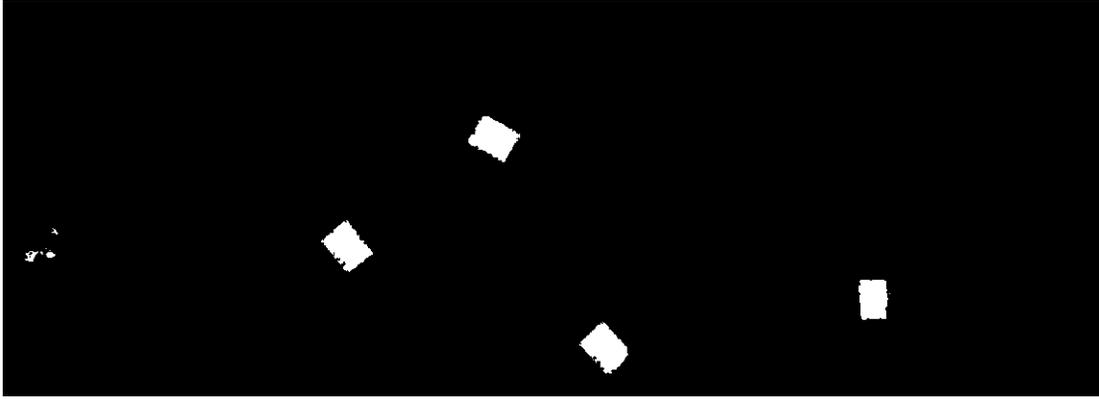


Figure 6. Binary image of all the objects in the scene

Source: own work.

Figure 6 shows a binary image with all objects in the scene, obstacles target point, and robot. Then, all locations in the space are found through the objects centroids in binary images, likewise the initial direction of robot is computed as the vector created between centroids of the orange and yellow marks.

Path-planning

Using root locus method, it is possible to obtain navigable paths, by setting a zero and a pole as starting and ending points on the scene (Arbulú Saavedra *et al.*, 2015). For doing that, the first step is matching the original image coordinates with a complex plane; in this case it was used the upper-right region of the complex plane, where the real and the imaginary coordinates are positive. Then, all the possible points to be placed correspond to a complex coordinate. Generally in a root locus plot, when the system has a pole and a zero, both complex, it generates arc-shaped path between them, tending to the upper side. In order to avoid this arc getting out of the scene, a pole and a zero are placed on the upper-right and the upper-left corners. Each corner root has to be placed as

the same kind (pole or zero) of nearest root (starting point or target). After that, a pole is placed on the robot location and a zero on the target one (the example image is shown in Figure 7, upper part), which correspond to equation (4). Each placed root has its conjugated pair in the lower-right region of the plane, but they are not shown.

$$H_1(s) = \frac{(s + 1 - 4i)(s + 1 + 4i)}{(s + 14 - 6i)(s + 14 + 6i)} \quad (4)$$

In figure 7 there are two different solutions given by the algorithm. The first one places the scene in the upper-right part of complex plane, and the second one in the lower-right part. They generate concave and convex paths respectively. Both paths are large curves instead of straight lines due that root locus parametric functions tend to generate semicircular paths when starting and ending points are horizontal or diagonal. The only way to obtain a straight line is when those points are vertical. The proposed algorithm traces a straight line instead of using root locus technique, when there are not obstacles in the middle of starting and ending points.

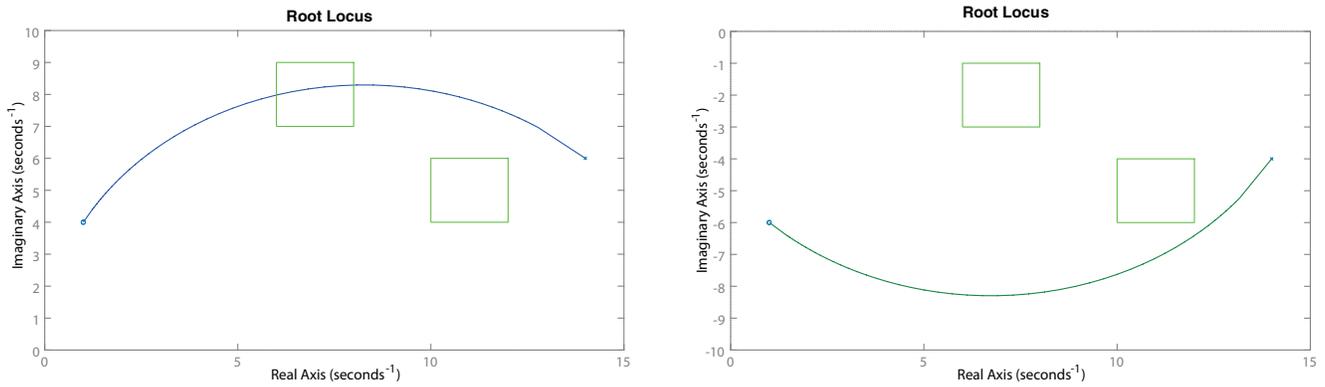


Figure 7. Regular path shape between two points using root locus

Source: own work.

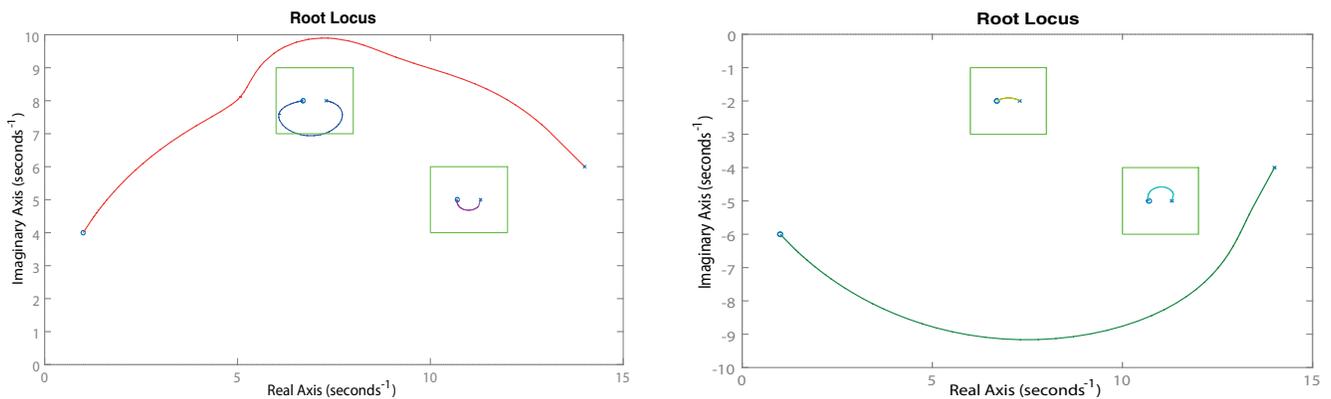


Figure 8. Path shape obtained using root locus, after adding a pole and a zero per obstacle

Source: own work.

Both examples of Figure 7 used the same obstacles; the first one shows a collision with one of them and the second one passes too close to the other, so it is necessary to improve those paths. Poles and zeros behavior looks like positive and negative electric charges, equal roots repel themselves and different roots attract themselves. So, if the starting point has a pole, the nearest obstacle has to have a pole too in order to repel the robot to that one. At the same time a contrary root has to be placed not to change the original path between initial and target points. This additional root has to be placed close to the first one, so the distance

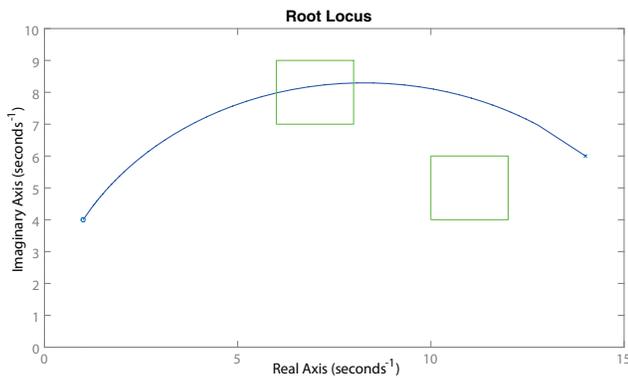
between the new pole and zero is proportional to the robot radius using the factor f , in order to prevent the robot to pass through spaces narrower than it. Therefore, it is necessary a pair of pole and zero for each obstacle in the scene, which is represented as one transfer function per each obstacle, such as Figure 8 and equations (5), (6) and (7).

$$H_2(s) = \frac{(s + 10.7 - 5i)(s + 10.7 + 5i)}{(s + 11.3 - 5i)(s + 11.3 + 5i)} \quad (5)$$

$$H_3(s) = \frac{(s + 6.7 - 8i)(s + 6.7 + 8i)}{(s + 7.3 - 8i)(s + 7.3 + 8i)} \quad (6)$$

$$H_4(s) = H_1(s) * H_2(s) * H_3(s) \quad (7)$$

As shown in Figure 8 the obtained path is not necessary the shortest one, because the original path without obstacles (Figure 7) is a large curve instead of a straight line. But both paths effectively avoid obstacles from the start to the end.



The obtained paths can be turned into more straight-shape ones mapping the original scene into the complex plane, changing the scale of x axis and continue with the same scale of y axis, that produces a path composed by a section of a bigger circle than the original and obtaining a flatter curve, as shown in Figure 9.

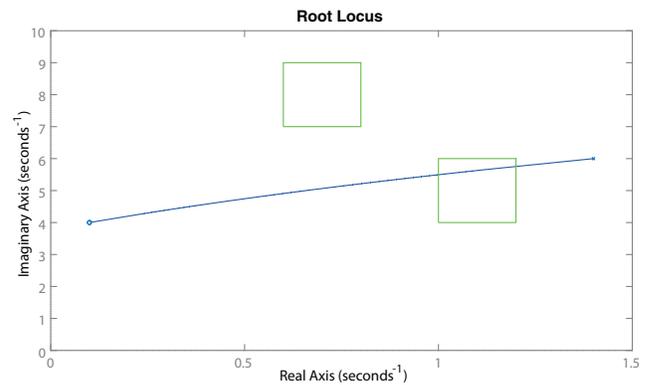


Figure 9. The path is gotten straight, scaling only the x-axis

Source: own work.

In addition, the choice of the path between concave and convex can be done detecting the distribution of obstacles inside the scene by means of image processing, using the center of all obstacles in the scene and determining if most of them are located in the upper or lower side of scene.

Locomotion performance

Once the path is obtained, the software decimated it in order to reduce the information managed by the robot, and sends it to the robot for navigating the scene. Around 16 points per path are sent via WiFi. In order to keep the algorithm as simple as possible, Robotino platform was used as a differential robot, in spite of being an omnidirectional (Mao, Wiedmann & Chen, 2011; Mbede, Melingui, Zobo, Merzouki & Bouamama, 2012; Melingui, Chettibi, Merzouki & Mbede, 2013). Then, the

robot has to move in straight lines, stop and turn over its axis to perform the movement on the path; the robot repeats this process for each point of the given path.

RESULTS

Using the proposed approach, it was obtained the navigation path as shown in Figure 10, matching the original ($x;y$) image coordinates with the complex plane. For this specific application, x-axis of input image is larger than y-axis, and then the first generated path is a big semicircle that gets out of the scene. Therefore, it is necessary to add other two roots: one pole and one zero in the upper-left and upper-right scene corners, p and z respectively, taking into account that these should match with the same kind of root with the nearest main point (start or target); as shown in equations (8) and (9).

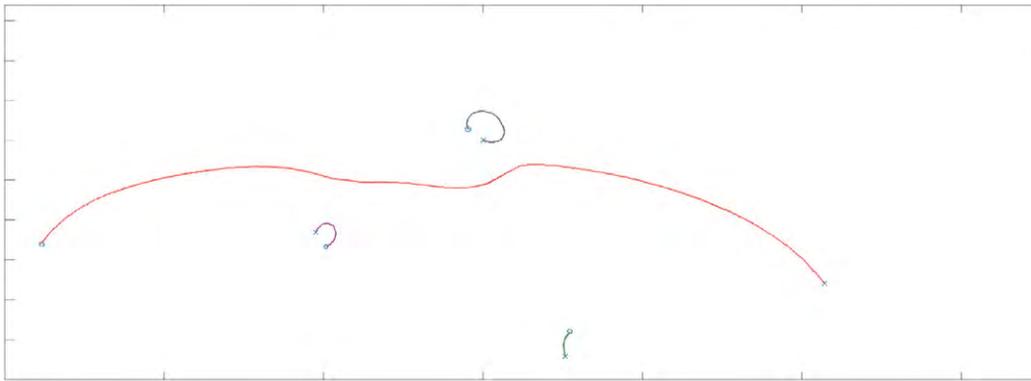


Figure 10. Navigation path obtained by a root locus plot

Source: own work.

$$H_5(s) = \frac{(s + z_r + z_i * i)(s + z_r - z_i * i)}{(s + p_r + p_i * i)(s + p_r - p_i * i)} \quad (8)$$

$$H_6(s) = H_4(s) * H_5(s) \quad (9)$$

After that, the generated path is drawn on the scene image in order to assure that it will not generate collisions with obstacles or borders of the scene, as shown in Figure 11. Then, the decimation of path vector produces a minimum amount of navigation points, which are sent to the robot, as shown in Figure 12.

The difference between the generated path and the one performed by the robot is shown in Figure

13, which shows an accumulative error over the resultant path. Additionally, the average distance d_a and relative error between paths e are computed as follows in equation (10) and (11), where d_m is the maximum distance in the original image. The average distance between points of both paths gave as a result 0.56 (in distance units) and the relative error was equal to 4.4%.

$$d_a = \sum_{j=1}^n \frac{\sqrt{(x_2j - x_1j)^2 + (y_2j - y_1j)^2}}{n} \quad (10)$$

$$e = \frac{d_a}{d_m} \quad (11)$$

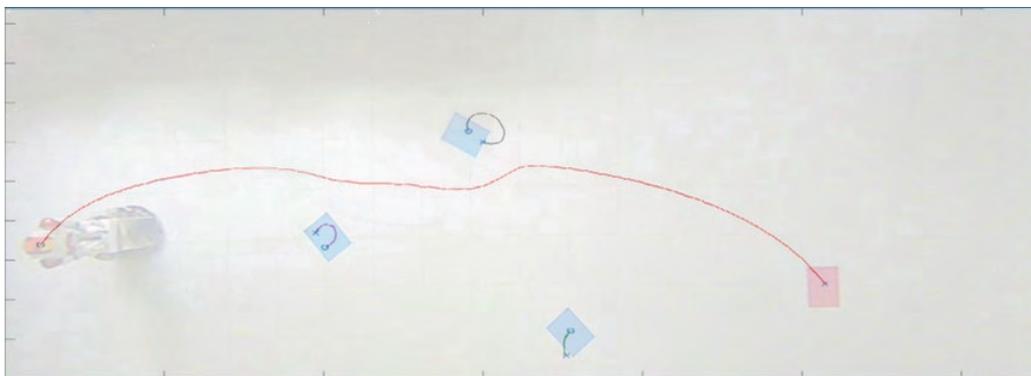


Figure 11. Original scene plus navigation path

Source: own work.

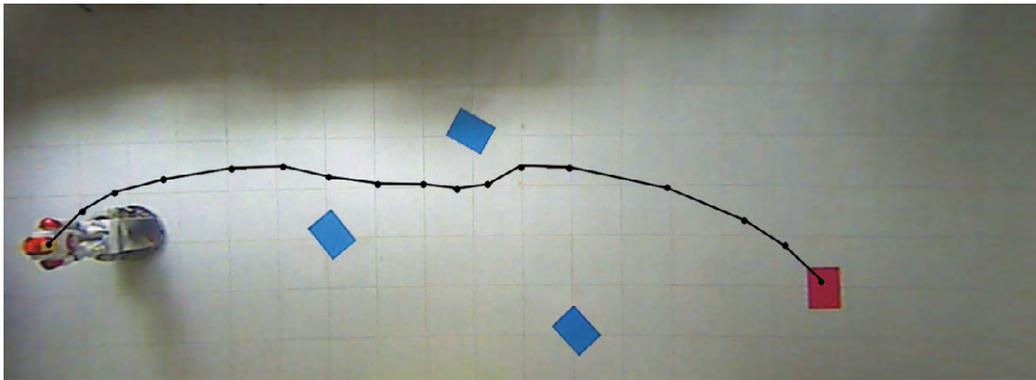


Figure 12. Navigation path as point vector representation

Source: own work.

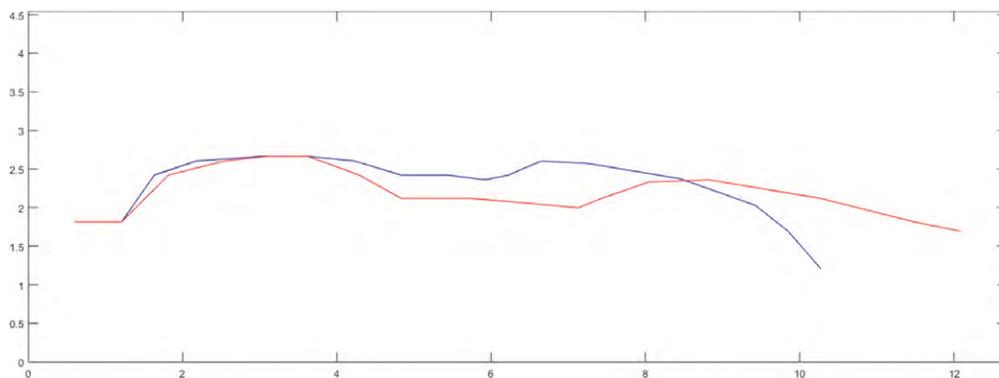


Figure 13. Difference between generated path and the performed by the robot (the red line represents the actual path while the blue line represents the generated path)

Source: own work.

CONCLUSIONS

The proposed approach of root locus for mobile robot navigation can solve the free obstacle path on flat surface successfully, so the assistant robot can navigate on real static environment safely. The generated paths are semicircles in most of the cases, which are not always the shortest way from the starting point to the target, but at the same time those paths are softer than the generated by other path planning methods. Additionally, this approach works similar to artificial potential fields but generates semicircular paths; it can execute as fast as Voronoi diagrams or faster. Obtained paths

can be optimized in time, mapping the scene into a complex plane, scaled only in the x-axis, to obtain flatter paths than those shown here. Finally, the system integration (IP camera, mobile robot, communication protocols, and navigation algorithm) was successfully experimentally validated.

FUTURE WORK

It is possible to take advantage of the round shape of paths created by root locus algorithm by applying it directly to original images generated by the fish-eye IP camera. It means that there is no need to apply any geometric transformation at

the beginning of the process, but just a coordinate transformation instead, at the end. This method would briefly reduce the computing time, working on separate points instead of the complete image when the geometric transformation is performed.

Taking into account the error presented due to the robot position referring to the camera, it is important to do a point-of-view x-coordinate correction in order to reduce the accumulated error presented in the whole generated path.

It is necessary to change the robot-to-server communication approach in order to avoid the position error presented, due to communication missing. The way to solve this problem would be generating our own communication protocol and load a specific firmware on Robotino platform that performs each movement command, even when communication fails in the middle of that movement.

In order to achieve a smoother movement of assistant robot, it is important to use Robotino platform with the complete control of its three motors as omnidirectional platform. Once it is done, a great improvement would be reached sending not only isolated points of path to the robot, but sending the equation that generates the path in order to generate the path internally. This proposal will require certain compute power, due that the robot processor will need to solve in real time a higher order equation; that depends on both the number of presented obstacles and the correspondent speed profile sent to the motors. Combining self-generation path and omnidirectional movement, the performance of prototype would improve considerably.

Additionally, some features of algorithm as x-axis scaling, position and separation of obstacle roots, additional poles and zeros placement, etc., can be chosen automatically using an optimization algorithm like genetic algorithms. This fact could improve the generated paths, but gets the execution time of general approach higher.

ACKNOWLEDGMENT

We would like to give acknowledgment to the Electronic Program, technical staff, and Research Direction from Corporación Unificada Nacional de Educación Superior, for their support and funding this project, under the "Robot asistencial para hogares y oficinas" research project.

REFERENCES

- Ahsan, F. & Hasan, K.M.U. (2015). Seeker: Autonomous maze-navigating and ball-potting robot. In *2015 International Conference on Open Source Systems & Technologies (ICOSST)* (pp. 52–57). IEEE. <http://doi.org/10.1109/ICOSST.2015.7396402>
- Andrakhanov, A. A. (2013). Navigation of Autonomous Mobile Robot in Homogeneous and Heterogeneous Environments on Basis of GMDH Neural Networks. In *Proceedings of 4th International Conference on Inductive Modelling (ICIM-2013)* (pp. 133–138).
- Arbulú Saavedra, M.R., Martínez Santa, F. & Montiel Ariza, H. (2015, November 4). Metodología para el uso de la técnica de localización de raíces en la planeación de rutas para robots móviles. *Revista Tecnura*. <http://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.4.a04>
- Arslan, O. & Koditschek, D. E. (2016). Exact robot navigation using power diagrams. In *Robotics and Automation, 2016 IEEE International Conference on (accepted)*.
- Balestrino, A. & Landi, A. (2002). High level path coordination for multiple vehicles and reciprocal root locus. *IFAC Proceedings Volumes*, 35(1), 415–420.
- Bermudez, G., Castellar, L.A.R., Montiel, H. & Ceballos, M. (2004). Aplicación del método de campos de potencial artificial para un robot móvil autónomo. *Revista Tecnura*, 7(14), 86–96.
- Chen, Y., Luo, G., Mei, Y., Yu, J. & Su, X. (2016). UAV path planning using artificial potential field method updated by optimal control theory. *International Journal of Systems Science*, 47(6), 1407–1420.

- Fujimori, A., Murakoshi, T. & Ogawa, Y. (2004). Navigation and local path planning of mobile robots with real-time map-building. *Integrated Computer-Aided Engineering*, 11(3), 281–288. Retrieved from <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true%7B%7Ddb=aph%7B%7DAN=13857304%7B%7Dlang=es%7B%7Dsite=ehost-live>
- Gaschler, A., Nogina, S., Petrick, R.P.A. & Knoll, A. (2014). Planning perception and action for cognitive mobile manipulators. In *IS&T/SPIE Electronic Imaging* (p. 90250D—90250D).
- Lin, C.-J., Chen, Y.-L., Liu, C.-H. & Yu, S. K. (2013). Path planning of a Mobile Robot Using Real-coded Genetic Algorithm Based Simultaneous Exploration. In *2nd International Conference on Advances in Computer Science and Engineering (CSE 2013)*.
- Mac, T.T., Copot, C., Hernandez, A. & De Keyser, R. (2016). Improved potential field method for unknown obstacle avoidance using UAV in indoor environment. In *2016 IEEE 14th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMII)* (pp. 345–350).
- Mao, Y.F., Wiedmann, H. & Chen, M. (2011). Autonomous Mobile Robots and Development of Vision Based Automotive Assistance Systems. *Applied Mechanics and Materials*, 121–126, 2416–2420. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.121-126.2416>
- Mbede, J.B., Melingui, A., Zobo, B.E., Merzouki, R. & Bouamama, B. O. (2012). zSlices based type-2 fuzzy motion control for autonomous robotino mobile robot. In *Proceedings of 2012 IEEE/ASME 8th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications* (pp. 63–68). IEEE. <http://doi.org/10.1109/MESA.2012.6275538>
- Melingui, A., Chettibi, T., Merzouki, R. & Mbede, J. B. (2013). Adaptive navigation of an omni-drive autonomous mobile robot in unstructured dynamic environments. In *2013 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)* (pp. 1924–1929). IEEE. <http://doi.org/10.1109/ROBIO.2013.6739750>
- Melingui, A., Merzouki, R., Mbede, J. B. & Chettibi, T. (2014). A novel approach to integrate artificial potential field and fuzzy logic into a common framework for robots autonomous navigation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 228(10), 787–801.
- Mohajer, B., Kiani, K., Samiei, E. & Sharifi, M. (2013). A New Online Random Particles Optimization Algorithm for Mobile Robot Path Planning in Dynamic Environments. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, 1–9. <http://doi.org/10.1155/2013/491346>
- Muñoz Martínez, V.F., Gil-Gómez, G. & Garcia Cerezo, A. (n.d.). *Modealdo cinemático y dinámico de un robot móvil omni-direccional*, (April 2016), 9.
- Orozco-Rosas, U., Montiel, O. & Sepulveda, R. (2015). Pseudo-bacterial potential field based path planner for autonomous mobile robot navigation. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 12.
- Pehlivanoglu, Y.V. (2012). A new vibrational genetic algorithm enhanced with a Voronoi diagram for path planning of autonomous UAV. *Aerospace Science and Technology*, 16(1), 47–55. <http://doi.org/10.1016/j.ast.2011.02.006>
- Vechet, S., Chen, K.S. & Krejsa, J. (2014). Hybrid navigation method for dynamic indoor environment based on mixed potential fields. In *Mechatronics 2013* (pp. 575–582). Springer.
- Zambrano Pérez, V.D. (2015). *Implementación de algoritmos de determinación de rutas para el robotino de festo*. Escuela Politécnica Nacional EPN | Ecuador. Retrieved from <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/11042>





Análisis de temperaturas durante la cocción de ladrillos macizos y sus propiedades finales

Analysis of temperatures during the firing bricks and final properties solid

Gustavo Guerrero Gómez¹, Edwin Espinel Blanco², Heller Guillermo Sánchez Acevedo³

Fecha de recepción: 22 de marzo de 2016

Fecha de aceptación: 23 de noviembre de 2016

Cómo citar: Guerrero G., G.; Espinel B., E. y Sánchez A., H.G. (2017). Análisis de temperaturas durante la cocción de ladrillos macizos y sus propiedades finales. *Revista Tecnura*, 21(51), 118-131. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.1.a09

Resumen

Contexto: Las propiedades finales de un bloque cerámico utilizado para mampostería dependen de las temperaturas a las que fue cocida la pasta. Dichas propiedades son relevantes, toda vez que en función de ellas será el comportamiento estructural de los muros en una edificación.

Objetivo: El propósito del presente trabajo es determinar la relación entre las propiedades finales del bloque cerámico y las temperaturas a las que fue cocido, considerando la rapidez con que estas varían en el horno.

Método: Se implementó un sistema para registrar temperaturas en el horno utilizando *Labview*, se consideró la velocidad de incremento de temperatura según la curva ideal para la cocción de bloques, que fueron clasificados al interior del horno, y se tomaron muestras de producto para determinar las propiedades siguiendo las normas NTC 4017 y NTC 4205.

Resultados: Se determinó la tasa de absorción inicial de agua (TIA), absorción a las 24 horas de inmersión, resistencia a la compresión y módulo de rotura (MR). Mediante un análisis de regresión lineal

múltiple se encontró relación existente entre la TIA, la velocidad de incremento de temperatura y el MR.

Conclusiones: Los bloques que superaron los 1000 °C poseen el mayor módulo de rotura (con valor de 1,54 MPa). Sin embargo, se encontró la mayor tasa de absorción inicial (0,37 g/cm²/min) y la mejor resistencia a la compresión (7,28 Mpa) en los bloques que fueron cocidos a menor temperatura. Las propiedades no son las adecuadas dado que en el proceso de cocción no es controlada la temperatura ni el tiempo.

Palabras clave: curva cocción, propiedades, ladrillos, arcilla.

Abstract

Context: Since the structural behavior of the walls in a building directly depends on the properties of the blocks used, these properties are very important. In particular, the final properties of a ceramic block (often used in masonry) depend on the cooking temperature of the pulp.

Objective: The purpose of this research is to determine the relationship between the final properties of a ceramic block and the temperature at which it was

- 1 Ingeniero mecánico, candidato a magíster en Sistemas Energéticos Avanzados. Docente e Investigador Grupo GITYD, Universidad Francisco de Paula Santander. Ocaña, Colombia. Contacto: gguerrerog@ufpso.edu.co
- 2 Ingeniero mecánico, especialista en Mantenimiento Industrial, magíster en Ingeniería, docente e investigador Grupo GITYD, Universidad Francisco de Paula Santander. Ocaña, Colombia. Contacto: eespinelb@ufpso.edu.co
- 3 Ingeniero mecánico, doctor en Ingeniería Mecánica. Docente e investigador grupo GIEMA, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. Contacto: hgsanchez@uis.edu.co

cooked. Additionally, it is worth considering how quickly these temperatures vary in the kiln.

Method: In first place, a system based on Labview was used to record the temperatures in the oven. In second place, it was considered the temperature increasing rate according to the ideal curve for baking blocks, which was classified inside the oven. In third place, samples of the product were taken according to the technical norms NTC 4017 and NTC 4205 in order to determine the properties of the block.

Results: According to the samples, we determined: the Initial absorption of water (TIA), the absorption rate at 24 hours of immersion, the compressive strength, and the Modulus of Rupture (MR). Additionally,

applying a multiple linear regression analysis, it was found a relationship between the TIA, the temperature increase rate, and the MR.

Conclusions: From the results in the research, it is possible to conclude that: blocks baked at more than 1000 °C have the highest modulus of rupture (1.54 MPa); however, it was found that blocks baked at lower temperature presented the highest initial absorption rate (0.37 gr/cm²/min) and the best compressive strength (7.28 MPa). Finally, since the temperature and time are not controlled during the baking process, it is difficult for properties to be the most suitable.

Keywords: baking curve, properties, bricks, clay.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad aún se presenta la producción de ladrillos cerámicos de forma artesanal en lo que se conoce como *chircales*, esto originado por la alta demanda de este producto para la construcción, el proceso fabricación comienza mezclando agua, arcilla, aserrín entre otros, hasta tener una pasta uniforme y manejable, que es llevada a un lugar abierto donde se coloca en moldes de madera; una vez retirado el molde se obtiene el ladrillo en crudo que se deja al sol por un tiempo de secado de 48 horas en promedio. Finalmente, los ladrillos son llevados a hornos de cocción artesanales durante un periodo que oscila entre 2 y 3 días a una temperatura máxima que varía entre 800 y 1300 °C, hornos que principalmente funcionan con gas natural, carbón, y leña entre otros (Gallegos, Lang y Fernández, 2006).

Los bloques para mampostería fabricados de arcilla son utilizados en la construcción de todo tipo de edificaciones, por su disponibilidad y relación costo/beneficio debido a sus propiedades tanto estructurales como térmicas (Rozo y Sánchez, 2014), la importancia de la cerámica además de lo económico radica en que el proceso de cocción de la pasta permite la obtención de un producto duro

que no es modificable en su forma, que es frágil, pero presenta resistencia mecánica y dureza, capaz de soportar agua y en algunos casos con baja conductividad térmica (Fernández, 2000).

Las propiedades mecánicas de los materiales utilizados en la construcción son consideradas para el diseño de las estructuras, en cualquier edificación los bloques de mampostería son sometidos a cargas que pueden llegar fracturarlos si no poseen las propiedades adecuadas (Valvuenza, Mena y García, 2015), por lo que es indispensable para cualquier comercializador de este producto garantizar a los constructores el cumplimiento de las exigencias de acuerdo con las normas establecidas en cada país (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010). Cualquier construcción está sometida a cargas combinadas y, en algunos casos, a asentamientos del terreno que ponen a prueba la estabilidad estructural de la obra, que en el caso de los muros debe ser la requerida para no aumentar la vulnerabilidad sísmica y no colocar en peligro la vida de las personas que las ocupan (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2004).

Sin duda, la cocción es clave, dado que en esta etapa se manifiesta si el proceso de fabricación se ha realizado correctamente y de esta depende que

el ladrillo cocido alcance las propiedades mecánicas esperadas, según las exigencias de las normas (Aranguren, Sancho y Planas, 2011).

La cocción es un proceso fisicoquímico donde se genera movilidad atómica que une las partículas de arcilla y disminuye la porosidad; es necesario mantener la rapidez con la que se varía la temperatura en el horno, dado que un descenso súbito en la temperatura puede generar una rápida contracción y provocar tensiones que llegan a fracturar el material; igualmente se debe conocer y mantener el rango de temperatura adecuado durante la cocción, el cual depende de la pasta utilizada en cada quema (Betancurt, Martinera y Day, 2007).

METODOLOGÍA

Ubicación

El estudio se realizó en la ladrillera El Recreo, ubicada en el municipio de Ocaña, en Colombia, a una altitud de 1754 metros sobre el nivel del mar, con las coordenadas N 08°13'52,14" y W 73°20'20,39" con una temperatura promedio de

21 °C; el horno de sección transversal circular tiene un diámetro interior de 2,12 metros y una altura de 4,52 metros con espesor de pared de 0,24 metros, es cargado con 4300 ladrillos en cada quema.

Selección de muestras

Se organizaron los bloques en el horno por niveles; para tomar las muestras se utilizó el muestreo por estratos indicado la Tabla 1, se dividió el área del horno en 3 niveles de manera que cada uno sea claramente diferenciable con el objetivo de tomar las muestras y que estas representen el conjunto o nivel del cual provienen (Alfaro, 2002); de cada nivel se seleccionaron 20 muestras y se utilizaron cinco para cada ensayo (Instituto Colombiano de Normas Técnicas NTC 4017, 2005).

Para registrar la temperatura interna presentada en cada nivel del horno se instalaron termopares de bulbo de aleación de cromo aluminio tipo K con aislamiento cerámico y para las temperaturas externas termopares de alambre tipo K con recubrimiento fiberglass a 900 °F.

Tabla 1. Diseño del muestreo por niveles en el horno

Nivel	Muestra	Tipo de ensayo
1	1,2,3,4,5	Tasa de absorción inicial TIA
	1,2,3,4,5	Ensayo de inmersión durante 24 horas
	1,2,3,4,5	Resistencia a la compresión
	1,2,3,4,5	Módulo de rotura o flexión
2	6,7,8,9,10	Tasa de absorción inicial TIA
	6,7,8,9,10	Ensayo de inmersión durante 24 horas
	6,7,8,9,10	Resistencia a la compresión
	6,7,8,9,10	Módulo de rotura o flexión
3	11,12,13,14,15	Tasa de absorción inicial TIA
	11,12,13,14,15	Ensayo de inmersión durante 24 horas
	11,12,13,14,15	Resistencia a la compresión
	11,12,13,14,15	Módulo de rotura o flexión

Fuente: elaboración propia.



Figura 1. Termopares instalados por niveles en el horno

Fuente: elaboración propia.

Diseño, programación e instalación del sistema de adquisición de temperaturas

Se desarrolló un sistema de adquisición de datos utilizando un ejecutable en el software *Labview* se consideraron las variables de control y monitoreo; temperatura y tiempo de almacenamiento necesarias para la obtención de los datos, con base en las cuales se seleccionaron los comandos adecuados, de acuerdo con la programación y diseño del panel y el diagrama de bloques. Se utilizó módulo National Instruments modelo E/S NI 9213 de la serie C y un manejador DAQ Assistant del sistema embebido compact RIO, que comunica los datos con *Labview*. El panel de la interfaz para el usuario del sistema de adquisición permite monitorear y registrar las temperaturas en los niveles del horno estratificados durante todo el ciclo de cocción. Los registros generan tablas gráficas y numéricas, e indicadores para cada termopar. Con la librería de *Labview* se desarrolló el diagrama de bloques, que opera los indicadores que se colocaron en la interfaz del usuario.

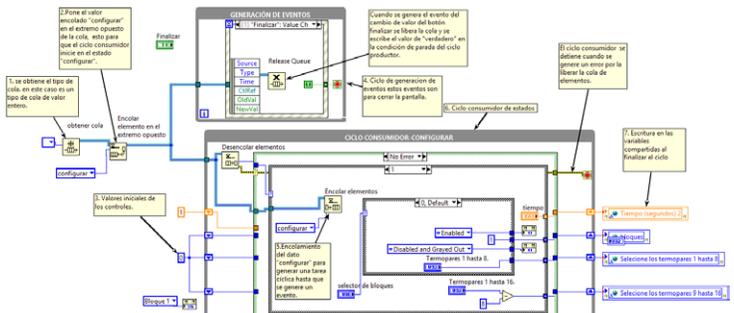
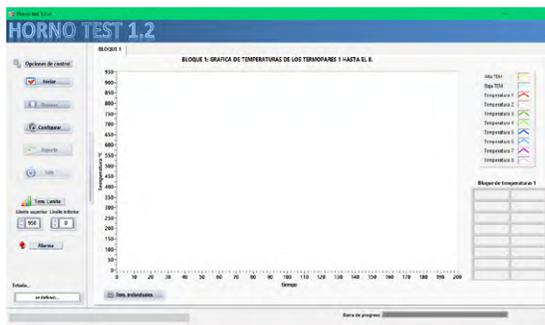


Figura 2. Panel frontal interfaz software *Labview* y diagrama de bloques

Fuente: elaboración propia.

Tasa de absorción inicial TIA

El ensayo se realizó de acuerdo con la norma técnica colombiana NTC 4017 a 5 muestras seleccionadas en cada nivel del horno y consistió en

determinar el área de la superficie, la masa seca y la masa final; para medir las muestras se utilizó un pie de rey digital marca STANDARDGAGE con rango $350 \text{ mm} \pm 0,1 \mu\text{m}$, para pesarlos una balanza electrónica digital marca PINZUAR modelo PG89.

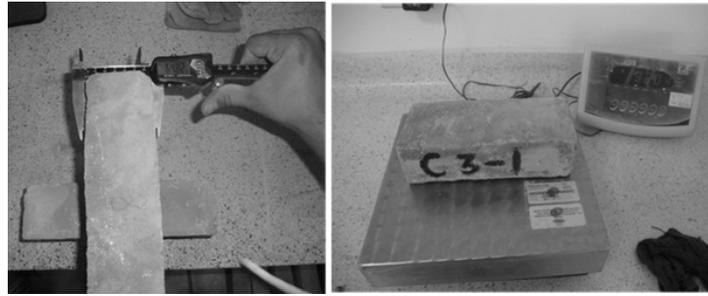


Figura 3. Determinación área de superficie y masa de las muestras

Fuente: elaboración propia.

La evaluación de la tasa de absorción inicial para cada muestra se determinó con la ecuación (1).

$$TIA = \frac{G}{A} \quad (1)$$

Donde:

G = Diferencia entre la masa inicial seca y la final (g/min).

A = Área neta en contacto con el agua (cm²).

Ensayo de inmersión durante 24 horas

Según la NTC 4017, se seleccionaron 5 muestras por cada nivel del horno, luego se secaron y enfriaron, se encontró su masa seca, para sumergir en agua en un rango de 15 °C y 30 °C, por 24 horas. La evaluación de la absorción durante las 24 horas para cada muestra se determinó con la ecuación (2).

$$\% \text{absorción} = \left(\frac{W_s - W_{ss}}{W_s} \right) \cdot 100 \quad (2)$$

Donde:

W_{ss} = masa sumergida de la muestra (g).

W_s = masa seca de la muestra previa a la inmersión (g).

Resistencia a la compresión

El ensayo de compresión se realizó de acuerdo con la norma técnica colombiana NTC 4017 a las 5 muestras seleccionadas de cada nivel del horno, las cuales se secaron durante 24 horas en un horno

marca Pinzuar, a temperatura entre 110 °C y 115 °C, luego se enfriaron a 24 °C ± 8 °C, con valores de humedad del 30 al 70 % por 4 horas, posteriormente se refrentaron con yeso aplicado en cada cara con un espesor máximo de 3 mm, finalmente se llevaron las muestras a una universal marca Pinzuar modelo PV-100-600 serie 109 de 1000 KN, y se aplicó carga en el área de contacto hasta llevarlas a la falla.

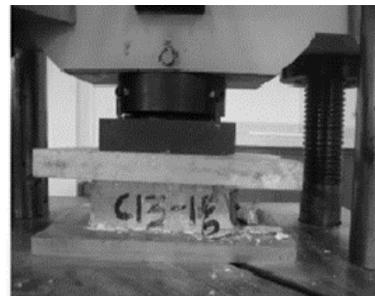


Figura 4. Aplicación de carga en la maquina universal

Fuente: elaboración propia.

La resistencia a la compresión para cada muestra se determinó mediante la ecuación (3).

$$f'_{cp} = \frac{W}{A} \quad (3)$$

Donde:

f'_{cp} = Resistencia de la muestra a la compresión (MPa).

W = Carga máxima de rotura (N).

A = Promedio de áreas brutas superior e inferior de la muestra (mm²).

Módulo de rotura o flexión

El ensayo se realizó de acuerdo NTC 4017, a las 5 muestras seleccionadas de cada nivel del horno, se secaron en un horno mufla marca Pinzuar modelo PG190 serie 151, por 24 horas en un rango de 110 °C y 115 °C, de forma que se obtengan dos pesajes seguidos cada 2 horas, en los que no haya disminución superior al 0,2 % de masa, una vez secadas las muestras se enfriaron a 24 °C ± 8 °C, entre el 30 % y 70 % de humedad por 4 horas, después de enfriadas se refrentaron las caras con 3,2 mm de yeso, y se aplicó carga puntual en el centro de cada cara por debajo de 1,3 mm/min utilizando una máquina universal marca Pinzuar modelo PV-100-600 serie 109 de 1000 KN.



Figura 5. Ensayo de flexión

Fuente: elaboración propia.

El módulo de rotura para cada muestra se determinó mediante la ecuación (4).

$$MR = \frac{3W \left(\frac{L}{2} - X \right)}{B \cdot d^2} \quad (4)$$

MR = Módulo rotura (Pa).

W = Carga máxima de rotura (N).

L = Distancia entre los soportes (mm).

B = Ancho de la muestra en el plano de falla (mm).

d = Profundidad de la muestra en el plano de falla (mm).

X = Distancia promedio del plano de falla al centro de la pieza, medida en la dirección de la línea central de la superficie sometida a tensión (mm).

RESULTADOS

Perfiles de temperatura presentada en el horno

Durante la quema de los ladrillos en el horno se programó el *software* para que registrara las temperaturas cada 5 minutos en los tres niveles en el proceso de cocción para un total de 737 registros con los cuales se realizaron las gráficas de los perfiles de temperatura.

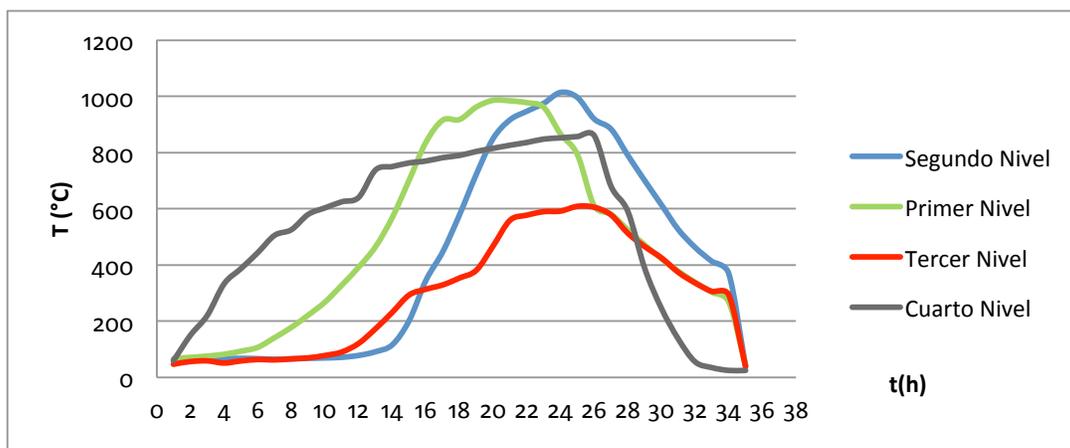


Figura 6. Curvas de temperatura en cada nivel del horno comparados con la curva ideal

Fuente: elaboración propia.

En el nivel 1 se alcanza una temperatura máxima de 985,43 °C, en el nivel 2 de 1034,53 °C y de 627,35 °C para el nivel 3.

Tasa de absorción inicial TIA

Determina el agua que absorbe el bloque en un minuto, la cantidad de agua que absorbe un producto cerámico afecta sus propiedades finales cuando es utilizado en mampostería, lo que genera deficiencias estructurales en la edificación (Delvasto, Guzman, Torres y Cedeño, 2015).

En la tabla 2 se presentan los resultados para la absorción inicial de agua TIA de acuerdo con el procedimiento descrito en la metodología.

Se encontró que la absorción inicial de agua presenta promedios de 0,34; 0,35 y 0,37 para los niveles 1, 2 y 3, respectivamente, y un valor promedio global de 0,35, todos los valores están por encima de los establecidos para ladrillos en la norma NTC 4205 el cual debe ser inferior al 10 %.

Tabla 2. Velocidad a la que se incrementa la temperatura en cada nivel del horno

	Nivel 1 (T máx. 985,43 °C)	Nivel 2 (T máx. 1034,53 °C)	Nivel 3 (T máx. 627,35 °C)
Rango de temperatura	Velocidad °C/min	Velocidad °C/min	Velocidad °C/min
0 °C hasta 400°C	0,23	0,17	0,15
400 °C hasta 600°C	0,79	1,08	0,40
600 °C hasta 900°C	1,1	0,92	0,30
900 °C hasta T máxima	0,16	0,42	0,35
T máxima hasta T amb	0,67	0,92	0,61

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Resultados para la absorción inicial de agua TIA

	Muestra N°	Área de contacto (cm ²)	Masa inicial (g)	Masa final (g)	T.I.A (g/cm ² /min)	T.I.A Promedio (gr/cm ² /min)	Desviación estándar (g/cm ² /min)
Primer nivel	1	284,99	3.413	3.506	0,33	0,34	0,10
	2	278,31	3.408	3.496	0,32		
	3	283,66	3.351	3.423	0,25		
	4	280,08	3.549	3.628	0,28		
	5	277,12	3.411	3.555	0,52		
Segundo nivel	6	270,84	3.077	3.141	0,24	0,35	0,12
	7	277,98	3.186	3.269	0,30		
	8	275,61	3.025	3.131	0,38		
	9	274,94	2.936	3.017	0,29		
	10	262,61	2.976	3.117	0,54		
Tercer nivel	11	284,61	3.543	3.650	0,38	0,37	0,18
	12	282,47	3.364	3.551	0,66		
	13	284,80	3.427	3.537	0,39		
	14	285,39	3.587	3.638	0,18		
	15	290,17	3.586	3.659	0,25		

Fuente: elaboración propia.

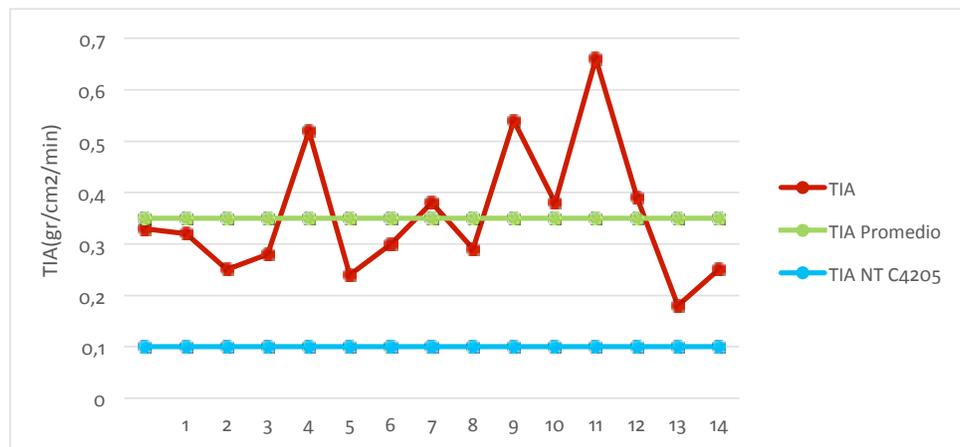


Figura 7. Tasa de absorción inicial de agua TIA

Fuente: elaboración propia.

Ensayo de inmersión durante 24 horas

La cantidad de agua que absorbe el ladrillo afecta su consistencia física y durabilidad. Se requiere conocer la capacidad del producto cerámico cuando se somete continuamente a grandes cantidades de agua o el nivel de agua que es capaz de absorber (Instituto Colombiano de Normas Técnicas NTC 4017, 2005).

La técnica usada permite determinar la absorción de agua final al término de 24 horas, las muestras ubicadas en el nivel 2 del horno son las que presentan mayor tasa de absorción con un porcentaje del 17,25 %, entre el nivel 1 y el nivel 3 los valores son similares 15,30 % y 15,40 %, respectivamente.

Se consideró el porcentaje máximo promedio de absorción de agua a las 24 horas para ladrillo de mampostería no estructural interior establecido

Tabla 4. Resultados para la absorción a 24 horas

	Muestra N°	Masa seca Ws (g)	Masa sumergida Wss (g)	Absorción 24 h (%)	Absorción 24 h promedio (%)	Desviación estándar (%)
Primer nivel	1	3.251	3.754	14,47	15,30	0,68
	2	3.196	3.667	14,74		
	3	3.251	3.727	15,93		
	4	3.209	3.732	16,30		
	5	3.195	3.644	14,95		
Segundo nivel	6	3.206	3.726	16,22	17,25	1,11
	7	2.946	3.487	18,36		
	8	2.851	3.358	17,78		
	9	2.861	3.316	15,90		
	10	2.828	3.337	18,00		
Tercer nivel	11	3.468	4.020	15,92	15,40	0,48
	12	3.418	3.959	15,83		
	13	3.555	4.080	14,77		
	14	3.426	3.947	15,21		
	15	3.564	4.108	15,26		

Fuente: elaboración propia.

en la norma NTC 4205 en 17,5 %, se encontraron tres valores por encima del recomendado con un valor máximo de 18,36 % y el mínimo de 14,47 %.

Resistencia a la compresión

Esta propiedad es importante para definir la calidad de bloque cerámico, está relacionada con la rapidez y tiempo de cocción, así como la temperatura máxima presentada en el horno.

Según la tabla 5, las muestras ubicadas en el nivel 3 presentan mayor resistencia a la compresión.

Se consideró la resistencia mínima promedio para ladrillo de mampostería no estructural establecido en la norma NTC4205 en 14 MPa, se encontró un valor promedio muy inferior de 4,87 MPa, un valor máximo de 7,91 MPa y mínimo de 2,82 MPa.

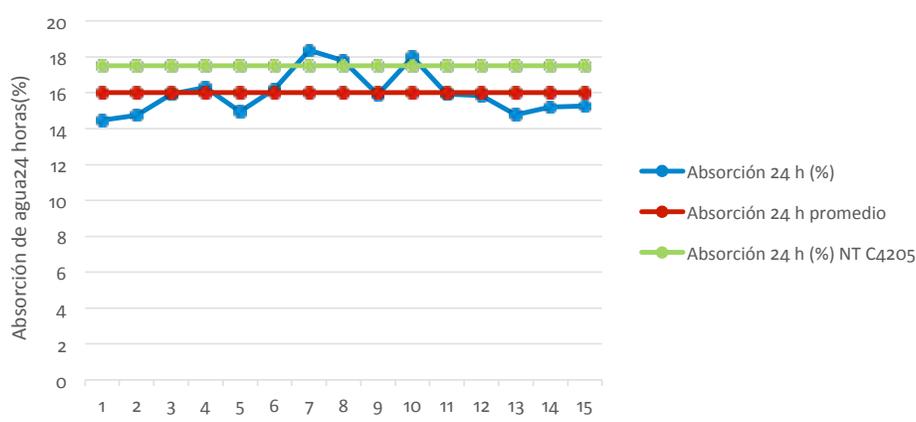


Figura 8. Absorción de agua 24 horas

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Resistencia a la compresión

	Muestra N°	Área A (mm ²)	Carga máxima W (N)	Resistencia a la compresión f'_{cp} (Mpa)	Resistencia a la compresión promedio f'_{cp} (Mpa)	Desviación estándar (Mpa)
Primer nivel	1	27.266,97	77.200	2,83	2,93	0,10
	2	26.872,43	81.500	3,03		
	3	27.266,4	82.960	3,04		
	4	27.233,04	78.500	2,88		
	5	26.806,41	76.850	2,87		
Segundo nivel	6	23.383	94.340	4,03	4,05	1,07
	7	26.920	155.330	5,77		
	8	27.025	102.120	3,78		
	9	28.084	79.080	2,82		
	10	27.116	104.879	3,87		
Tercer nivel	11	28.353	182.640	6,44	7,28	0,59
	12	28.134	197.610	7,02		
	13	28.238	218.070	7,72		
	14	28.919	228.850	7,91		
	15	28.188	201.325	7,14		

Fuente: elaboración propia.

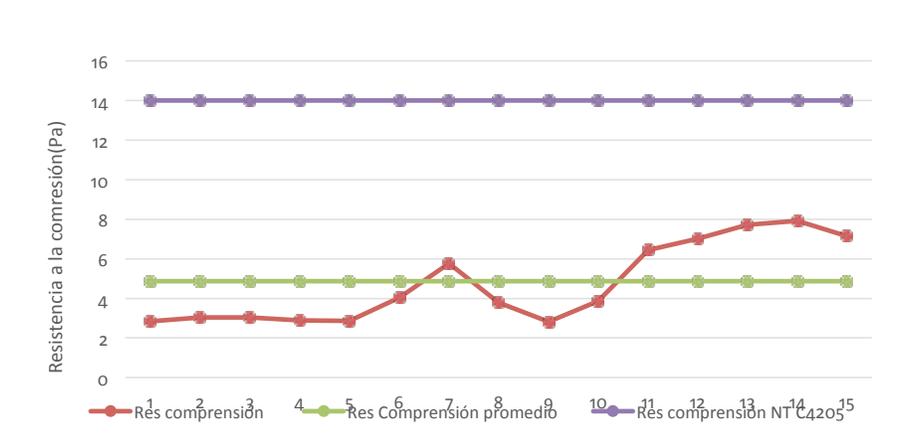


Figura 9. Resistencia a la compresión

Fuente: elaboración propia.

Módulo de rotura o flexión MR.

El módulo de rotura o ensayo de flexión (MR) permite conocer esta importante propiedad que define

la durabilidad del ladrillo cuando se somete a esfuerzos de flexión, lo que ocurre frecuentemente en la mampostería (Afanador y Guerrero, 2012).

Tabla 6. Módulo de rotura o flexión

	Muestra	Carga máxima W (N)	L (mm)	B (mm)	D (mm)	X(mm)	Módulo de rotura MR (Pa)	Módulo de rotura promedio MR (Pa)	Desviación estándar (Pa)
Primer nivel	1	3.425,75	214	114,34	75,24	45,33	0,98		
	2	3.124,72	218	113,14	94,73	25	0,78		
	3	3.040,43	217	115,42	76,08	14	1,29	1,32	0,51
	4	3.016,43	215	114,14	72,93	10,67	1,44		
	5	4.377,01	213	113,73	72,38	11	2,10		
Segundo nivel	6	1.968,75	214	112,52	67,62	12,33	1,09		
	7	3.937,51	215	110,54	67,56	8,67	2,31		
	8	2.594,9	217	111,03	74,3	18,33	1,15	1,54	0,54
	9	2.071,1	217	111,76	65,87	8,33	1,28		
	10	3.786,99	213	111,79	74,54	3	1,89		
Tercer nivel	11	1.456,99	241	115,2	72,4	30,3	0,65		
	12	6.454,14	244	117,2	72,5	13,6	3,41		
	13	2.763,48	242	116,8	75	10	1,40	1,45	1,38
	14	1.318,52	224	114,4	72	62,3	0,33		
	15	3.510,04	224	114,7	78,6	16,67	0,13		

Fuente: elaboración propia.

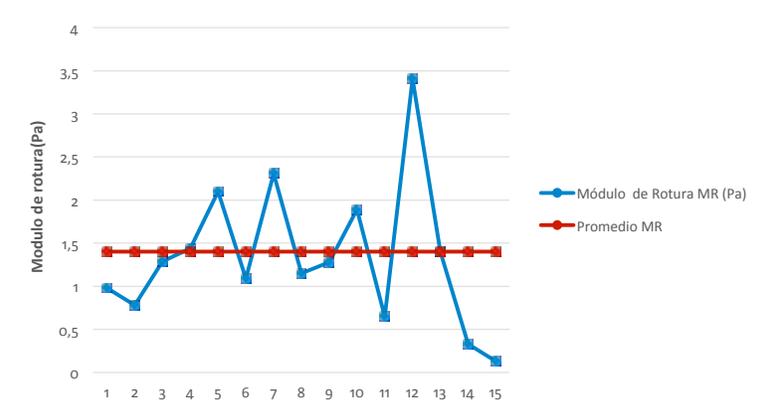


Figura 10. Módulo de rotura

Fuente: elaboración propia.

Correlación entre la temperatura y las propiedades de los ladrillos

Se realizó un análisis de correlación lineal múltiple que determina la relación funcional entre una variable dependiente Y y respecto a una serie de variables independientes $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$, que se expresa como la ecuación (5) (Santesmases, 2009).

$$Y = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_n X_n + c \quad (5)$$

Se consideró la velocidad de incremento de temperatura, la tasa de absorción inicial TIA y los resultados de la inmersión a las 24 horas como

variables independientes y la resistencia a la compresión y el módulo de rotura como variables dependientes. Del análisis de la regresión lineal múltiple se encontró que la velocidad a la que se incrementa la temperatura tiene un coeficiente de correlación negativo de 0,22 con respecto a la resistencia a la compresión y positivo de 0,21 con respecto al módulo de rotura, se destaca también que la tasa de absorción al término de las 24 horas presenta un coeficiente de correlación positivo de 0,34 con el módulo de rotura. En la tabla 6, se muestra la relación encontrada entre la tasa de absorción inicial (TIA) con coeficiente de correlación positivo de 0,76 con el módulo de rotura y con un

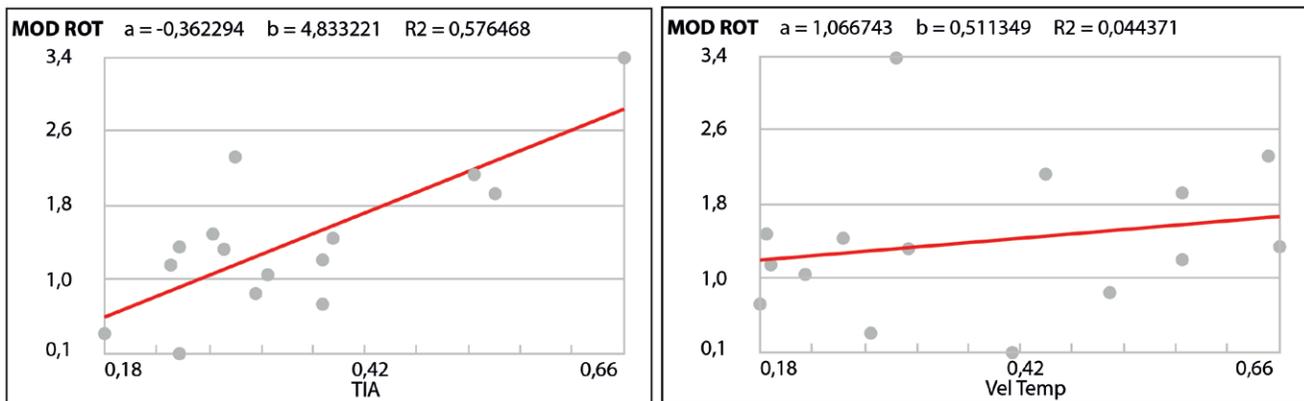


Figura 11. Regresión lineal múltiple TIA, velocidad con respecto al módulo de rotura

Fuente: elaboración propia.

coeficiente de correlación múltiple de 0,77 para la TIA y la velocidad sobre el MR.

No se encontró relación entre la tasa de absorción inicial y la absorción a las 24 con la resistencia a la compresión como en otros trabajos (Kaushik y Rai, 2007).

CONCLUSIONES

Al comparar la curva ideal de cocción para las arcillas, con la curva real de los tres niveles en el horno, se observa un gran desfase entre ellas durante las primeras horas del precalentamiento, aunque el mayor desfase se presenta con el tercer nivel que corresponde a la parte superior del horno y es que la combustión se inicia en la parte inferior del horno y avanza en la dirección de abajo hacia arriba y la velocidad de calentamiento es lenta. Dicho desfase da lugar a una auténtica lluvia ácida sobre el material seco, ahuecando toda su estructura y manchando las superficies expuestas a los gases.

A las 6 horas de haber comenzado la cocción, la temperatura del material debería situarse sobre los 500 °C aproximadamente (Fernández, 2000); sin embargo, las mediciones efectuadas en el primer nivel no exceden los 100 °C y en los otros niveles es casi despreciable. Esto significa que se efectuó un calentamiento muy lento, precisamente en una zona en que el peligro de roturas es mínimo (García, García y Vaca, 2013).

A partir de las 6 primeras horas, se aprecia en la curva ideal una reducción gradual y progresiva de la velocidad de calentamiento (Fernández, 2000), pues la dilatación es cada vez mayor. En cambio, en el primer nivel de la curva real sucede todo lo contrario, es decir que se acelera dicha velocidad.

En la curva ideal a los 500 °C la velocidad de precalentamiento disminuye y entre los 650 °C y 750 °C se presenta un rápido aumento de la temperatura, pues la arcilla no experimenta cambios volumétricos. Luego, se presenta una uniformidad en la temperatura en toda la pieza, preparándola para entrar en la zona de máxima contracción que comienza a partir de los 750 °C (Fernández, 2000),

mientras que en las curvas reales del primer y segundo nivel se presenta un rápido calentamiento que tiene lugar al acercarse la llama al material, provocando la aparición de fisuras en las caras y aristas más directamente expuestas al fuego. Además, el carbón y el material están prácticamente en contacto, con lo cual se alcanzan temperaturas muy altas, lo cual dio lugar a una vitrificación excesiva de las piezas que están más próximas a él, disminuyendo el calor y su elasticidad, lo cual dio como consecuencia una mayor sensibilidad frente a las tensiones de enfriamiento.

El enfriamiento de la curva ideal inicia entre la temperatura de régimen 800 °C y los 650 °C aproximadamente, en la que el material se encuentra en estado pirolástico y soporta sin problemas las tensiones producidas por un enfriamiento rápido (Fernández, 2000), mientras que las curvas del primer y tercer nivel en el horno están por debajo de dicha temperatura conduciendo a que el material entre en el estado elástico, soportando peor las tensiones producidas por el enfriamiento.

En el segundo nivel se presenta una temperatura de cocción que supera los 1000 °C, y se encuentra para las muestras ubicadas en este nivel el mayor módulo de rotura o resistencia a la flexión con un valor de 1,54 MPa, lo que concuerda con la teoría, dado que las piezas cocidas por debajo de los 1000 °C presentan menor módulo de rotura (Peña, Miranda y Santafe, 2009). La velocidad de incremento de temperatura en el tercer nivel es la más baja y en este nivel la temperatura máxima es la menor de los tres solo alcanza los 627,35 °C, lo que permite alcanzar la mayor tasa de absorción inicial de 0,37 g/cm²/min y la mejor resistencia a la compresión de 7,28 Mpa, dado que a bajas velocidades de calentamiento se mejoran las propiedades al disminuir la temperatura máxima de cocción (Fernández, 2000).

Se encontró una incidencia de la tasa de absorción inicial (TIA) y la velocidad de incremento de temperatura en el módulo de rotura (MR), se obtuvo un coeficiente relación múltiple $r = 0.77$ y un coeficiente de determinación $r^2 = 0.60$ que explica

la proporción de la varianza del módulo de rotura explicado por el modelo, el coeficiente de regresión $\alpha = -0.53$, expresa el valor del MR cuando la TIA y la velocidad son iguales a 0.

Ninguna de las propiedades cumple con la norma NTC4205, en parte el proceso de cocción durante el cual no es controlada la temperatura ni el tiempo, lo que, sin duda, incide en las propiedades finales del ladrillo.

FINANCIAMIENTO

Este trabajo se desarrolló dentro del proyecto “Eficiencia energética y uso racional de la energía en la producción de materiales cerámicos en la provincia de Ocaña”, el cual fue aprobado por la División de Investigación y Extensión de la Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña, para su ejecución se aprobó una partida de treinta y dos millones de pesos (\$32.000.000), distribuidos entre gastos de personal científico y de apoyo, equipos y materiales, servicios tecnológicos y software. La investigación realizada tiene como objetivo estudiar el proceso de cocción de material cerámico y obtención de las propiedades físico mecánicas de los ladrillos en la provincia de Ocaña, contribuyendo a la racionalización de los recursos no renovables, aumento en la productividad, beneficios económicos y la reducción de la contaminación ambiental.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Afanador, N. y Guerrero, M.R. (2012). Propiedades físico-mecánicas en ladrillos macizos para mampostería. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 22(1), 43-58.
- Alfaro, M. (2002). *Introducción al muestreo minero*. Santiago de Chile: Instituto de Ingenieros de Minas de Chile.
- Anderson, J. (1998). *Ciencia de los Materiales*. 2a. ed. México: Limusa, S.A.
- Aranguren, A.; Sancho, S.B. y Planas, J. (2011). Método de caracterización de las propiedades mecánicas de la fractura del ladrillo. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 2, 725-730.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2004). *Guía de patologías constructivas, estructurales y no estructurales*. Bogotá.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2010). *Reglamento colombiano de construcción sismo resistente. NSR-10*. Bogotá.
- Betancurt, D.; Martinera, F. y Day, R. (2007). Influencia de la adición de carbonato de calcio en la eficiencia. *Rev. Ing. Constr.*, 22(3), 187-196.
- Cornellis, K.; Cornelius, K. y Hurbult, C. S. y. (1996). *Manual de Minerología*. 4a. ed. México: Reverte, S.A.
- Dana, J.D. y Hurlbut, C.S. (1960). *Manual de Minerología de Dana*. 2a. edición. Barcelona-Buenos Aires-México: Reverté, S.A.
- Delvasto, S.; Guzmán, A.; Torres, J. y Cedeño, M. (2015). Viabilidad de uso del polvo de vidrio como fundente en la elaboración de baldosas de gres porcelánico. *Revista Tecnura*, 19(44), 59-70.
- Fernández A., M. (2000). *Manual sobre fabricación de baldosas, tejas y ladrillos*. España: Laboratorio Técnico Cerámico.
- Gallegos, A.; Lang, B. y Fernández, M. (2006). Contaminación atmosférica por la fabricación de ladrillos y sus posibles efectos sobre la salud de los niños de zonas aledañas. *Acta Nova*, 3(2), 192-210.
- García, C.; García, M. y Vaca, M. (2013). Resistencia mecánica de ladrillos preparados con mezclas de arcilla y lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales. *Revista Tecnura*, 17(38), 68-81.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas (2000). *Ingeniería civil y arquitectura unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos NTC 4205*.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas NTC 4017. (2005). *Metodos para muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla*. Bogotá: Icontec.
- Kaushik, H. y Rai, D. (2007). Stress-strain characteristics of clay brick masonry under uniaxial compression. *Journal of Materials in Civil*, 19(9), 728-739.

- Peña, G.; Miranda, A. y Santafé, G. (2009). Efecto de la temperatura y tiempo de cocción en la porosidad de mezclas a base de arcillas caolines. *Revista Colombiana de Física*, 41(12), 27-30.
- Rozo, S. y Sánchez, J.A. (2014). Propiedades físico-mecánicas de bloques H10 fabricados en el área metropolitana de Cúcuta. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 24(1), 67-78.
- Santesmases, M. (2009). *Diseño y análisis de encuesta en investigación social y de mercado*. Madrid: Pirámide.
- Shackelford, J. (2010). *Introducción a la Ciencia de Materiales para Ingenieros*. México: Pearson Educación.
- Valvueda, S.; Mena, M. y García, C. (2015). Evaluación de la resistencia a la compresión en morteros de pega de acuerdo con la dosificación establecida por el código Sismo Resistente Colombiano. Estudio de caso. *Revista Tecnura*, 20(48), 115-122.





Identificación de un método cuantitativo para la evaluación de la calidad ambiental de centros educativos cercanos a antenas de estaciones base de telefonía

Identification of a quantitative method for the evaluation of the environmental quality of educational centers near to antennas of base stations of mobile telephony

Alexander Armesto Arenas¹, Wilson Angarita Castilla²

Fecha de recepción: 10 de enero de 2016

Fecha de aceptación: 23 de noviembre de 2016

Cómo citar: Armesto A., A. y Angarita C., W. (2017). Identificación de un método cuantitativo para la evaluación de la calidad ambiental de centros educativos cercanos a antenas de estaciones base de telefonía. *Revista Tecnura*, 21(51), 132-139. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.1.a010

Resumen

Contexto: Este estudio tiene como objetivo definir un método cuantitativo apropiado para la evaluación de la calidad ambiental relacionada con el funcionamiento de antenas de estaciones base de telefonía móvil, ubicadas cerca de centros educativos. El estudio está basado en el método de Norbert Dee de Battel Columbus Laboratories.

Método. Se tuvieron en cuenta las cantidades afectadas en el área de estudio: número de especies de flora y fauna, número de personas, niveles máximos de radiación, y la distancia permitida para la instalación de antenas en Colombia. El estudio se realizó en un colegio de la ciudad de Ocaña, situado cerca de una antena estación base de telefonía móvil. Para las pruebas se utilizaron encuestas, el software *QGIS*, y un equipo de medición de radiación electromagnética de alta frecuencia (Spectran HF 60105. Aronia).

Resultados: Se obtuvieron seis ecuaciones que permitieron definir el índice de calidad ambiental de acuerdo con la relación matemática entre las

cantidades afectadas y los límites de ubicación y radiación electromagnética de las antenas de telefonía móvil.

Conclusiones: El método cuantitativo propuesto permite medir índices de calidad ambiental en centros educativos afectados por la ubicación y el funcionamiento cercano de antenas de estaciones base de telefonía móvil; con esto es posible evitar la implementación de una evaluación subjetiva y poco específica.

Palabras clave: ambiente, antena, colegio, telefonía.

Abstract

Context: The objective of this research is to define an appropriate quantitative method to evaluate the environmental quality affected by the location of antennas of base stations of mobile telephony near educational centers. This study is based on the method of Norbert Dee from Battel Columbus Laboratories.

Method: For the development of the study, we took into account the most affected parts: number of species (both animals and plants), people, maximum

1 Ingeniero ambiental, candidato a magíster en Ingeniería Ambiental. Docente de la Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña, Colombia. Contacto: aarmestoa@ufpso.edu.co

2 Ingeniero ambiental, candidato a magíster en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. Docente de la Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña, Colombia. Contacto: wangaritac@ufpso.edu.co

levels of radiation, and the minimum allowed distance for the installation of antennas in Colombia. The study was conducted at a school in the city of Ocaña, located near an antenna base station for mobile telephony. For the tests we used surveys, the QGIS software, and a high-frequency electromagnetic radiation measuring equipment (Spectran HF 60105. Aronia).

Results: As a result, we obtained six equations that help define the environmental quality index according to the mathematical relationship between the

affected parts, the limit of location, and the radiation of mobile phone antennas permitted in any region.

Conclusions: The proposed method allows measuring indices of environmental quality in educational centers affected by the location and function of antennas base stations of mobile telephony. Additionally, a quantitative method prevents the need to implement a subjective and unspecific evaluation.

Keywords: antenna, environment, schools, telephony.

INTRODUCCIÓN

La sostenibilidad de las áreas urbanas tiene una estrecha relación con su calidad ambiental (Ministerio del Medio Ambiente, 2013). El medio ambiente es un sistema complejo compuesto de partes físicas, biológicas y sociales, y el uso de estas puede tener efectos adversos o benéficos. En este sentido, debe tenerse en cuenta que los métodos cuantitativos son definidos como técnicas de conteo, de medición y de razonamiento abstracto (Medina, 2001). Una técnica para evaluar este problema, como primer paso, es convertir estos parámetros en unidades acordes con indicadores de calidad ambiental (Dee *et al.*, 1972). Con respecto a las alteraciones por la instalación de antenas de telefonía móvil cercanas a centros educativos, esta metodología permitirá, en forma más clara y real, medir y comparar las partes afectadas con el todo del lugar de estudio.

En ese sentido, hay que considerar que este tipo de tecnologías ha tenido mucho florecimiento desde los años 1970 (Martínez, 2001), en especial en Latinoamérica (Gasca, Camargo y Medina, 2014), en donde su funcionamiento consiste en enviar y recibir llamadas por medio de ondas electromagnéticas en una determinada área (Fernández, González y Rubio, 2002) emitidas en una establecida banda de frecuencia del espectro electromagnético (Cadena, Eslava y Franco, 2015). Este tipo de

avances funciona con equipos denominados “antenas” (Anguera y Pérez, 2008). La radiación electromagnética corresponde a ondas eléctricas y magnéticas que se disipan en el espacio a la velocidad de la luz (Ornetta, s.f.) y forma parte de todo nuestro entorno, incluyendo los seres vivos (García, 2005). Su relación y sus efectos poco se han estudiado (Torres y Osorio, 2007). Existen estudios que relacionan varias enfermedades con este tipo de contaminación (Tchernitchin y Riveros, 2004). La Organización Mundial de la Salud (OMS), a través de la Agencia Internacional de Investigación del Cáncer (IARC), cataloga la radiación electromagnética emitida por antenas de telefonía móvil y Wi-Fi como cancerígenos (De la Rosa, 2014). Lamentablemente los seres humanos están sufriendo graves consecuencias y no se han unificado respuestas al respecto (Bergareche, 2013). Debido a esto y con el fin de proteger a los seres vivos, organizaciones internacionales ya están investigando (Torres y Alzate, 2006). De hecho, hay metodologías que permiten analizar los lugares más alterados por la radiación (Balmori, 2006). Algunos países para protegerse han implementado el principio de precaución y otras organizaciones han unido fuerzas conjuntas para estudiar y minimizar los riesgos de exposición a radiación no ionizante (Secretaría de Medio Ambiente y Salud Laboral de Catalunya, 2010). En nuestro país ya se definió una distancia mínima para la ubicación de antenas de

telefonía móvil cerca de centros educativos, centros geriátricos y jardines infantiles (Ministerio de Salud y Protección Social–Organización Panamericana de Salud, 2016). Acorde a lo anterior, este artículo presenta métodos cuantitativos para el respectivo estudio de calidad ambiental con el fin de mejorar la evaluación de las alteraciones ambientales con respecto al funcionamiento de antenas de estaciones base de telefonía móvil, cuando están cerca de escuelas, colegios u universidades.

METODOLOGÍA

Para la aplicación de los respectivos métodos cuantitativos se tuvieron en cuenta los límites máximos y mínimos permitidos sobre radiación y ubicación de antenas de estaciones base de telefonía móvil, y las respectivas cantidades afectadas. En cuanto a la implementación y toma de datos se dispuso un equipo de medición electromagnética de alta frecuencia Spectran HF-60105 Aronia, *software QGIS 2.8.1*, *Google Earth*, *Google SketchUp*, y visitas a

la zona afectada. Con respecto a la medición de la radiación electromagnética, se tomó el máximo valor registrado durante seis minutos. Como lugar de prueba se escogió el Instituto Técnico Industrial Ocaña (ITI), ubicado en la coordenadas latitud 8° 15' 27.02" N, longitud 73° 21' 29. 85" O.

RESULTADOS

Los componentes bióticos y abióticos interactúan entre sí y cualquier cambio que se produzca en el medio abiótico repercutirá sobre los seres vivos. A partir de esta afirmación se puntualizó sobre cuatro componentes ambientales (tabla 1) de los centros educativos.

Los índices de calidad ambiental (ICA) de cada uno de los indicadores se valoraron de 0 a 1 (tabla 2).

A los índices de calidad ambiental de cada una de las variables de los componentes ambientales se les determinó una ecuación (tabla 3) que relacionara las partes afectadas con la calidad ambiental.

Tabla 1. Componentes ambientales

Componente ambiental	Indicadores
Ecología	Área de flora y fauna afectada por la radiación electromagnética de telefonía móvil.
Contaminación	Contaminación atmosférica por radiación electromagnética.
Componentes bióticos del medio	Flora: número de especies afectadas. Fauna: número de especies afectadas.
Social	Población urbana relacionada con gestión ambiental. Área afectada "usos de suelo". Ubicación de la antena de acuerdo con la población afectada.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Valoración de la calidad ambiental

ICA	Calidad ambiental
< 0,2	Muy baja calidad ambiental
(0,2 – 0,4]	Baja calidad ambiental
(0,4 – 0,6]	Calidad ambiental media
(0,6 – 0,8]	Calidad ambiental alta
(0,8 – 1]	Calidad ambiental muy alta

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente (2013).

Tabla 3. Ecuaciones por indicador ambiental

Indicador ambiental	ICA Ecuación	Descripción
Área de flora, fauna y población humana afectada	$A = \pi r^2$ $ICA = \frac{\text{Area afectada}}{\text{Area de estudio}} + 1$	Cuanta más área de cobertura tenga el punto crítico de la fuente, menor será el ICA.
Contaminación atmosférica por radiación electromagnética	$ICA = \frac{\cos\left(\frac{\pi I}{\text{Im ax}}\right) + 1}{2}$ $0 < I \leq I \text{ max}$	Las mediciones de intensidad (I) muestran valores muy pequeños (entre nanowatts/m ² y miliwatts/m ²) y la disminución del ICA es muy lenta con relación a la intensidad de la radiación, mostrando una curva sinusoidal.
Número de especies afectadas de fauna y flora	$ICA = -\frac{\text{N}^\circ \text{ de especies afectadas}}{\text{N}^\circ \text{ de especies en total}} + 1$	En cuanto a los componentes bióticos del medio, cuanto mayor es el número de especies afectadas por la radiación, menor es el ICA de la zona de estudio.
Número de personas afectadas	$ICA = -\frac{\text{N}^\circ \text{ de personas afectadas}}{\text{N}^\circ \text{ total de personas}} + 1$	Cuanto mayor sea el número de personas afectadas por las antenas, menor será el ICA.
Ubicación de la antena de acuerdo con la población afectada	$ICA = \begin{cases} \frac{0.4x}{x_{\min}}, & x < x_{\min} \\ \frac{0.6(x - x_{\min})}{x_{\min}} + 0.4, & x_{\min} < x < x_{\max} \end{cases}$ <p style="text-align: center;"> X_{máx}: distancia máxima X_{mín}: distancia mínima X: distancia antena-centro educativo </p>	A menor distancia de la antena, habrá menor ICA.

Fuente: elaboración propia.

La relación entre la sumatoria total de cada uno de los ICA y la sumatoria de la calificación máxima que estos pueden tener es el valor que determina la puntuación general de la calidad ambiental del sitio de estudio (ecuación (1)).

$$ICA = \frac{\sum ICA_i}{\sum ICA_{\max}} \quad (1)$$

El primer paso es hacer un diagnóstico que permita conocer las cantidades de las partes alteradas del sitio de estudio (figura 1).

La descripción del colegio (tabla 4) muestra una extensa superficie arbórea, de planta física y sitios de recreación.

Para la medición de la radiación electromagnética (figura 2) se tomaron tres puntos: sitio de recreación (canchas), salón de clases y otro en la cafetería.



Figura 1. Ubicación Instituto Técnico Industrial

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Descripción cuantitativa del colegio ITI

Área total (m ²)	Área total de flora y fauna urbana (m ²)	Área física (m ²)	Número de especies de flora urbana	Número de especies de fauna urbana	Población total (estudiantes y administrativos)	Antenas de telefonía móvil instaladas		
						Cantidad	Cerca	Dentro Distancia (m)
22618.19	8802.15	8876.917	11	11	950	1	X	40

Fuente: elaboración propia.

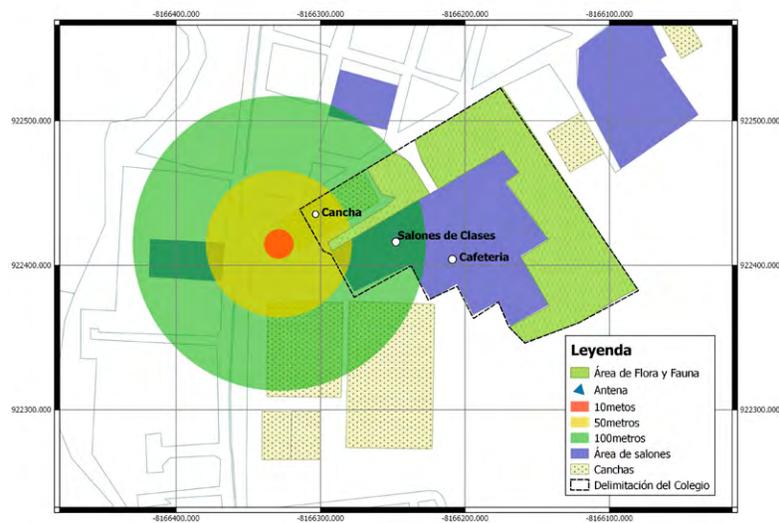


Figura 2. Puntos de medición de radiación electromagnética

Fuente: elaboración propia.

Todas las mediciones mostraron valores inferiores al máximo establecido por Colombia, describiendo mayor valor la medición realizada en las canchas (tabla 5).

Una vez determinado lo anterior, se establece la calidad ambiental general. De acuerdo con el

sitio de estudio escogido, el índice de calidad ambiental del lugar de estudio fue 0,45 (tabla 6), representado una calidad ambiental media.

Tabla 5. Intensidad de radiación en cada punto de medición

Banda de frecuencia (MHz)	Lugar de medición	Intensidad (W/m ²)	Intensidad máxima permitida W/m ²
1900	Canchas	2.45×10^{-7}	9.5
	Salón de clases	7.76×10^{-8}	
	Cafetería	6.94×10^{-9}	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Índice de calidad ambiental del colegio ITI con respecto a la ubicación y funcionamiento de antenas de telefonía móvil

Componente ambiental	Variables	Q	Q Mín.	Q Máx.	ICA	Calidad ambiental
Ecología	Área de flora y fauna afectada (m ²)	833.76	-	8802.15	0.90	Muy alta
Contaminación	Intensidad de radiación electromagnética (w/m ²)	2.4×10^{-7}	-	9.5	1	Muy alta
Componentes bióticos del medio	Flora: número de especies afectadas	4	-	11	0.6	Media
	Fauna: número de especies afectadas	11	-	11	0	Muy baja
social	Número de habitantes afectados	950	-	950	0	Muy baja
	Área afectada	6628.35	-	22618.19	0.7	Alta calidad
	Ubicación de la antena (distancia en metros)	0	100	1000	0	Muy baja
Total					3.2	
Índice de calidad ambiental					0.45	Media

Q: Cantidad medida en la zona de estudio.

Q mín.: Valor mínimo o permitido de cada una de las variables analizadas.

Q máx.: Define el valor máximo o total de la variable analizada.

El número de especies afectadas hace referencia a las especies que permanecen en la zona crítica ($r < 100$ m).

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

El método cuantitativo posibilita medir el índice de calidad ambiental de acuerdo con la realidad de las cantidades de las partes de los centros de educativos afectados por la ubicación y funcionamiento cercano de antenas de estaciones base telefonía móvil, y evita del mismo modo implementar una evaluación subjetiva y poco específica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anguera, J. y Pérez, A. (2008). *Teoría de antenas. Guía de estudio*. Barcelona: Universidad Ramon Llull. Recuperado de: <http://web.salleurl.edu/~jaumean/Teoria-Antenas-by-Jaume-Anguera.pdf>
- Balmori, A. (2006). Efectos de las radiaciones electromagnéticas de la telefonía móvil sobre los insectos. *Ecosistemas*, 15(1), 87-95.
- Bengt, K. (1996). Radiaciones no ionizantes. En: *Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo* (cap. 49, pp. 1-36). Recuperado de: <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo2/49.pdf>
- Bergareche, R.L. (2013). Contaminación por radiación electromagnética en personas vulnerables: tutela preventiva y generación de otras fuentes de energía. *Actualidad Jurídica Ambiental*. Recuperado de: http://www.actualidadjuridicaambiental.com/wp-content/uploads/2013/11/2013_10_28_Raquel_Luquin_Contaminacion-electromagnetica.pdf
- Cadena M., E.; Eslava B., H J. y Franco C., J.A. (2015). Gestión del espectro radioeléctrico en Colombia. *Revista Tecnura*, 19(45), 159. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.3.a12>
- De la Rosa, R. (2014). *La enfermedad silenciada*. Madrid, España: Ediciones I. Recuperado de: <http://www.escuelasinwifi.org/>
- Dee, N.; Baker, J.; Drobny, N.; Duke, K. y Fahringer, D.C. (1972). Description of the environmental evaluation system (EES). En: *Environmental Evaluation Water Resource Planning* (pp. 6-10). Recuperado de: <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=coo.31924004263087;view=1up;seq=22>
- Fernández L., A.; González L. y Rubio L., A. (2002). *Telefonía móvil. Transmisión y redes de datos*. Recuperado de: http://www.uhu.es/fernando.gomez/transydat_archivos/Movil.PDF
- García, S.I. (2005). *La salud humana y los campos electromagnéticos de frecuencia extremadamente baja (CEM-FEB)*. Buenos Aires: Asociación de Toxicología Argentina. Recuperado de: http://www.ataonline.org.ar/bibliotecavirtual/documentos_utilies/cem_feb.pdf
- Gasca M., M.C.; Camargo A., L.L. y Medina D., B. (2014). Metodología para el desarrollo de aplicaciones móviles. *Revista Tecnura*, 18(40), 20-35. Recuperado de: <http://tecnura.udistrital.edu.co/ojs/index.php/revista/article/view/767>
- Martínez, E. (2001). La evolución de la telefonía móvil. *Revista Red*, 1, 1-6. Recuperado de: <http://www.eveliux.com/mx/La-evolucion-de-la-telefonía-móvil.html>
- Medina B., C.I. (2001). Paradigmas de la investigación sobre lo cuantitativo y lo cualitativo. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 10, 1-13. <http://www.re-dalyc.org/articulo.oa?id=91101010>
- Ministerio de Medio Ambiente (2013). *Índice de calidad ambiental urbana (ICAU)*. Bogotá, Colombia.
- Ministerio de Salud y Protección Social–Organización Panamericana de Salud (2016). Recomendaciones con respecto a la exposición por campos electromagnéticos generados por la red de telefonía móvil. En: *Guía para la gestión de las DTS en el desarrollo de los procesos de promoción, prevención, vigilancia y control sanitario relacionados con los campos electromagnéticos generados por la telefonía móvil* (pp. 80-83). Bogotá, Colombia. Recuperado de: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/SA/gestion-dts-campos-electromagneticos-telefonía-móvil.pdf>
- Ornetta, V.C. (s.f.). *La telefonía móvil y su salud*. Recuperado de: http://www.who.int/peh-emf/publications/en/esp_mobphonehealthbk.pdf
- Secretaría de Medio Ambiente y Salud Laboral de Catalunya (2008). El futuro de las radiaciones no ionizantes. In *amb tu + prevenció. Cuaderno preventivo: Radiaciones no ionizantes* (p. 52).

Catalunya. Recuperado de: [http://www.ladep.es/ficheros/documentos/Cuaderno Preventivo Radiaciones no ionizantes](http://www.ladep.es/ficheros/documentos/Cuaderno%20Preventivo%20Radiaciones%20no%20ionizantes.pdf). UGT de Catalunya. 2008. pdf

Tchernitchin, N.A. y Riveros, R. (2004). Efectos de la radiación electromagnética sobre la salud. *Cuadernos Medico Sociales*, 44(4), 221-234. Recuperado de: http://cms.colegiomedico.cl/Magazine%5C2004%5C44%5C4%5C44_4_5.pdf

Torres, J.I. y Alzate, L.H. (2006). Efectos de las radiaciones electromagnéticas no ionizantes en sistemas biológicos. *Revista Médica de Risaralda*, 12(2), 44-54.

Torres, J.I. y Osorio, M.C.O. (2007). Criterios técnico-ambientales para el análisis del riesgo por contaminación electromagnética no ionizante en Colombia. *Revista Luna Azul*, 24, 8-14. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/pdf/3217/321727226002.pdf>





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 digitalizarse en Microsoft Word (2003 en adelante), cumpliendo con las siguientes indicaciones:

Letra *Times New Roman* de 12 puntos (a excepción de que se requiera lo contrario para algunos apartados).

- Una columna a doble espacio.
- Todas las márgenes de 3 cm.
- Los párrafos se justifican, y no debe haber espacio entre los consecutivos.
- No incluir saltos de página o finales de sección.
- Si se desea resaltar palabras o frases del texto, no usar letra negrita sino letra cursiva.
- Los decimales se deben señalar con coma (,) y no con un punto.

- Los millares y millones se deben señalar con un espacio fino.
- Evitar las notas de pie de página.
- Se debe utilizar nomenclatura arábica hasta el tercer nivel únicamente.

3.4 De la estructura del documento

Los trabajos deben tener la siguiente estructura y cumplir con los siguientes requisitos:

Composición de un artículo

Todos los artículos remitidos para su evaluación y posible publicación por parte de la revista *Tecnura* deben tener por lo menos los siguientes componentes:

- Título en español e inglés.
- Información de los autores.
- Resumen en español e inglés.
- Palabras clave en español e inglés.
- Introducción.
- Conclusiones.
- Trabajo futuro (opcional).
- Agradecimientos (opcional).
- Referencias bibliográficas.

Si el artículo es de investigación científica y tecnológica deben tener, además de lo anterior, los siguientes componentes:

- Metodología.
- Resultados.
- Financiamiento.

Título

El título del artículo deberá ser corto o dividido en título y subtítulo, atractivo para el lector potencial y escrito en mayúscula sostenida. Este debe aparecer centrado entre las márgenes, escrito con letra *Times New Roman*, en negrita, tamaño de fuente 18. El título del artículo debe ir en español e inglés separado por un espacio doble. Máximo 20 palabras.

Autores

Después del título debe escribirse el (los) nombre(s) completo(s) del (los) autor(es), acompañado de los datos biográficos básicos: título de pregrado, título de posgrado, ocupación o cargo, afiliación institucional (institución donde labora), dependencia, ciudad, país y correo electrónico. La información anterior debe ir inmediatamente debajo del nombre del autor.

Resumen

Debe establecer el objetivo y alcance del trabajo, una descripción clara y concisa de la metodología, los resultados y las conclusiones obtenidas. Máximo 250 palabras.

Palabras clave

Debe escogerse entre tres y diez palabras clave, escritas en español con letra *Times New Roman*, en negrita y cursiva.

Las palabras clave deben estar escritas en orden alfabético y ser de uso estandarizado, para lo cual se sugiere utilizar bases de datos internacionales según el área del conocimiento. Por ejemplo, en el área de Eléctrica y Electrónica se sugiere utilizar el tesoro de la UNESCO que se pueden encontrar en la página: <http://databases.unesco.org/thessp>.

Abstract

Debe ser una traducción correcta y precisa al idioma inglés del texto que aparece en el resumen en español.

Keywords

Debe ser una traducción correcta y precisa al idioma inglés de la lista de palabras clave en español.

Las *keywords* deben estar escritas en el orden de las palabras clave y ser de uso estandarizado, para lo cual se sugiere utilizar bases de datos internacionales según el área del conocimiento. Por ejemplo, en el área de Eléctrica y Electrónica se sugiere utilizar los Tesoros de la IEEE y/o World Bank que se pueden encontrar en las siguientes páginas respectivamente: http://www.ieee.org/documents/2009Taxonomy_v101.pdf, <http://multites.net/mtsql/wb/site/default.asp>

Introducción

Debe describir el planteamiento general del trabajo, así como contexto, antecedentes, estado de arte de la temática abordada, objetivo y posible alcance del trabajo.

Metodología

La redacción de este apartado debe permitir a cualquier profesional especializado en el tema replicar la investigación.

Resultados

Explicación e interpretación de los hallazgos. Si es necesario, se puede presentar una discusión breve y enfocada a la interpretación de los resultados.

Conclusiones

Implicación de los resultados y su relación con el objetivo propuesto.

Financiamiento

Mencionar la investigación asociada de la cual se derivó el artículo y la entidad que avaló y financió dicha investigación.

Agradecimientos

Preferiblemente deben ser breves y deben incluir los aportes esenciales para el desarrollo del trabajo.

Ecuaciones

Deben aparecer centradas con respecto al texto principal. Las ecuaciones deben ser referenciadas con números consecutivos (escritos entre paréntesis cerca al margen derecho). Las ecuaciones se citan en el texto principal empleando la palabra ecuación y seguida del número entre paréntesis. Las ecuaciones deben ser elaboradas en un editor de ecuaciones apropiado y compatible con el paquete de software InDesign, por ejemplo, el editor de ecuaciones de Windows.

Tablas

Para el caso de realización de tablas se recomienda que estas no sean insertadas como imágenes,

considerando que en este formato no pueden ser modificadas. El encabezado de cada tabla debe incluir la palabra Tabla (en negrita) seguida del número consecutivo correspondiente y de un breve nombre de la tabla. El encabezado debe estar escrito con letra Times New Roman, en cursiva y tamaño de fuente 9.

No se presentan cuadros sino tablas y estas se deben levantar automáticamente desde el procesador de textos. Las tablas deben ir nombradas y referenciadas en el artículo, en estricto orden. Toda tabla debe tener en su parte inferior la fuente de la que fue tomada, o mencionar que es autoría de los autores si es el caso.

Figuras

Todas las figuras o fotografías deben enviarse en formato PNG o TIFF con una resolución mínima de 300 DPI, adaptadas a escala de grises.

El pie o rótulo de cada figura debe incluir la palabra Figura (en negrita) seguida del número consecutivo correspondiente y de una breve descripción del contenido de la figura. El pie de figura debe estar escrito con letra Times New Roman, en cursiva y tamaño de fuente 9. Las figuras deben ir nombradas y referenciadas en el artículo, en estricto orden. Toda figura debe tener también la fuente de la que fue tomada, o mencionar que es autoría de los autores si es el caso.

Símbolos

Los símbolos de las constantes, variables y funciones en letras latinas o griegas –incluidos en las ecuaciones– deben ir en cursiva; los símbolos matemáticos y los números no van en cursiva. Se deben identificar los símbolos inmediatamente después de la ecuación. Se deben utilizar las unidades, dimensiones y símbolos del sistema internacional.

Cuando se empleen siglas o abreviaturas, se debe anotar primero la equivalencia completa, seguida de la sigla o abreviatura correspondiente entre paréntesis y en lo subsecuente se escribe solo la sigla o abreviatura respectiva.

Referencias bibliográficas

El estilo de citación de referencias adoptado por la revista **Tecnura** es APA sexta edición. Las citas, referencias bibliográficas e infografía se incluyen al final del artículo. Las referencias bibliográficas deben ordenarse alfabéticamente de acuerdo con el primer apellido del primer autor, sin numeración.

Solo deben aparecer las referencias que fueron citadas en el texto principal del trabajo, en las tablas o en las figuras. Es decir, en la lista no deben aparecer otras referencias aunque hayan sido consultadas por los autores para la preparación del trabajo. Sugerimos utilizar herramientas como: *Citas y bibliografía* de Microsoft Word (para APA sexta edición versión 2013 o superior), *Zotero*, *Mendeley*, entre otras.

El llamado de una referencia bibliográfica se inserta en el texto, en el punto pertinente, bajo ciertas características:

- Si la oración incluye el apellido del autor, solo se debe escribir la fecha dentro de un paréntesis, ejemplo:
Cuando Vasco (2012), analizó el problema de presentado en
- Cuando no se incluye el autor en la oración, debe ir entre el paréntesis el apellido y la fecha.
La investigación de materiales dio una visión en el área (Martínez, 2012).
- Si el documento u obra tiene más de dos autores, se debe citar la primera vez con todos los apellidos.
1990. (Fernández Morales, Villa Krieg & Caro de Villa, 2008)
- En las menciones siguientes, solo se debe escribir el primer apellido del autor, seguido de un "et al".
En cuanto al estudio de las aguas, Fernández Morales et al. (2008) encontraron que ...
- Cuando el documento u obra tiene más de seis autores, se debe utilizar desde la primera mención el "et al".

A continuación se describen una serie de ejemplos de las referencias más utilizadas, según

el estilo de referencias adoptado por la revista *Tecnura*:

Publicaciones Periódicas:

Forma Básica

Apellidos, A. A., Apellidos, B. B. & Apellidos, C. C. (Fecha). Título del artículo. *Título de la publicación*, volumen (número), pp. xx-xx. doi: xx.xxxxxxx

Artículo básico

Guevara López, P., Valdez Martínez, J., Agudelo González, J., & Delgado Reyes, G. (2014). Aproximación numérica del modelo epidemiológico SI para la propagación de gusanos informáticos, simulación y análisis de su error. *Revista Tecnura*, 18(42), 12 -23. doi:<http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.4.a01>

Artículo web

Rodríguez Páez, S., Fajardo Jaimes, A., & Páez Rueda, C. (2014). Híbrido rat-race miniaturizado para la banda ISM 2,4 GHZ. *Revista Tecnura*, 18(42), 38-52. Recuperado de <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/article/view/8059/9675>

Libros:

Forma Básica

Apellidos, A. A. (Año). *Título*. Ciudad: Editorial.
Apellidos, A. A. (Año). *Título*. Recuperado de <http://www.xxxxxx.xxx>
Apellidos, A. A. (Año). *Título*. doi: xx.xxxxxxx
Apellidos, A. A. (Ed.). (Año). *Título*. Ciudad: Editorial.

Libro con autor

Goleman, D. (2000). *La inteligencia emocional: Por qué es más importante que el cociente intelectual*. México: Ediciones B.

Libro con editor:

Castillo Ortiz, A. M. (Ed.). (2000). *Administración educativa: Técnicas, estrategias y prácticas gerenciales*. San Juan: Publicaciones Puertorriqueñas

Libro versión electrónica:

Montero, M. & Sonn, C. C. (Eds.). (2009). *Psychology of Liberation: Theory and applications*. [Versión de Springer]. doi: 10.1007/978-0-387-85784-8

Informe técnico:

Forma Básica

Apellidos, A. A. (Año). *Título*. (Informe Núm. xxx). Ciudad: Editorial

Informe con autores

Weaver, P. L., & Schwagerl, J. J. (2009). U. S. *Fish and Wildlife Service refuges and other nearby reserves in Southwestern Puerto Rico*. (General Technical Report IITF-40). San Juan: International Institute of Tropical Forestry.

Informe de una agencia del gobierno

Federal Interagency Forum on Child and Family Statistics. *America's Children: Key National Indicators of Well-Being, 2009*. Washington, DC: U.S. Government Printing Office. Recuperado de <http://www.childstats.gov/pubs/index.asp>

Tesis

Forma Básica

Apellidos, A. A. (Año). *Título*. (Tesis inédita de maestría o doctorado). Nombre de la institución, Localización.

Tesis inédita, impresa

Muñoz Castillo, L. (2004). *Determinación del conocimiento sobre inteligencia emocional que poseen los maestros y la importancia que le adscriben al concepto en el aprovechamiento de los estudiantes*. (Tesis inédita de maestría). Universidad Metropolitana, San Juan, PR.

Tesis de base de datos comercial

Santini Rivera, M. (1998). *The effects of various types of verbal feedback on the performance of selected motor development skills of adolescent males with Down syndrome*. (Tesis doctoral). Disponible

en la base de datos ProQuest Dissertations and Theses. (AAT 9832765).

Tesis web

Aquino Ríos, A. (2008). *Análisis en el desarrollo de los temas transversales en los currículos de español, matemáticas, ciencias y estudios sociales del Departamento de Educación*. (Tesis de maestría, Universidad Metropolitana). Recuperado de http://suagm.edu/umet/biblioteca/UMTESIS/Tesis_Educacion/ARAquinoRios1512.pdf

Estándares o patentes

Forma Básica

Apellidos, A. A. Título de la patente. País y número de la patente. Clasificación de la patente, fecha de concesión oficial. Número y fecha de solicitud de la patente, paginación.

Hernández Suárez, C. A., Gómez Saavedra, V. A., & Peña Lote, R. A. Equipo medidor de indicadores de calidad del servicio de energía eléctrica para usuario residencial. Colombia., 655. G4F 10/0, 15 de Marzo 2013. 27 de Octubre 2011, 147

4. ENVÍO DE ARTÍCULOS

Los autores deben enviar sus artículos a través de la aplicación para tal fin del Open Journal System en formato digital, adjuntando la carta de presentación y el formato de información artículo-autores.

4.1 Carta de presentación

El artículo debe ir acompañado de una carta de presentación dirigida al director y editor de la revista, Ing. Cesar Augusto García Ubaque, donde incluya:

- Solicitud expresa de considerar su artículo para publicarlo en la revista Tecnura.
- Título completo del trabajo.
- Nombres completos de todos los autores del trabajo.
- Certificación de la originalidad y el carácter inédito del trabajo.

- Exclusividad de su remisión a la revista *Tecnura*.
- Confirmación de la autoría con la firma de todos los autores.

Esta carta deberá estar firmada por todos los autores, escanearse y enviarse junto con los demás documentos solicitados.

4.2 Formato de información artículo-autores

El artículo además debe ir acompañado de un formato de información sobre el artículo y sus autores, el cual se puede descargar de la página web de la revista *Tecnura*: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>, en la sección "Formatos y Documentos". Es importante completar todos los campos de información solicitados, algunos de ellos tienen comentarios para aclarar mejor lo que se está solicitando. El formato no debe escanearse.

4.3 Artículo

Artículo en formato digital (Word 2003 en adelante) que cumpla con todas las normas de presentación descritas en el capítulo 3, "Formato del artículo", de la presente en las instrucciones a los autores.

5. PROCEDIMIENTO PARA LA PUBLICACIÓN

El procedimiento que sigue la revista *Tecnura* para la evaluación y posible publicación de los trabajos enviados por los autores es el siguiente en orden cronológico:

1. Envío del artículo acompañado de la carta de presentación y el formato de información por parte de los autores.
2. Notificación al autor de correspondencia de la recepción del artículo.
3. Verificación del tema del artículo con respecto a las áreas de interés de la revista.
4. Verificación de las normas de presentación por parte del monitor de la revista.
5. Notificación al autor de correspondencia de la evaluación de las normas de presentación.

6. Envío de las correcciones realizadas por los autores con respecto a la evaluación de las normas de presentación.
7. Envío del artículo a los árbitros seleccionados.
8. Notificación del inicio del proceso de arbitraje del artículo.
9. Notificación a los autores de la decisión tomada por el Comité Editorial y de las evaluaciones hechas por los árbitros.
10. Envío de las correcciones realizadas por los autores con respecto a las evaluaciones de los árbitros.
11. Estudio de la versión final del artículo y de las evaluaciones de los árbitros por parte del Comité Editorial.
12. Envío por parte de los autores de la carta de cesión de derechos al editor de la revista.
13. Envío de la versión con corrección de estilo y diagramada a los autores.
14. Verificación de errores y aprobación final de la versión con corrección de estilo y diagramada por parte de los autores.
15. Publicación del artículo en el número correspondiente de la revista *Tecnura*.
16. Notificación a los autores de la publicación del número de interés.
17. Envío de un ejemplar de la revista a cada autor del artículo publicado.

6. PROCESO DE ARBITRAJE DE ARTÍCULOS

Considerando la periodicidad trimestral de la revista, el Comité Editorial realiza cuatro convocatorias anuales para la recepción de artículos, aproximadamente en los meses de febrero, mayo, agosto y noviembre. Los artículos serán recibidos hasta la fecha máxima establecida en cada convocatoria.

Una vez recibidos los artículos el monitor de la revista realizará una primera evaluación de forma para verificar que cumplan con todos los elementos mencionados en esta guía de instrucciones a los autores. Luego de recibir nuevamente el artículo con las correcciones de forma solicitadas por el

monitor de la revista, este será sometido a evaluación por tres pares académicos (paulatinamente se espera incorporar un mayor número de pares externos que participen en el proceso).

Cada artículo remitido a la revista *Tecnura* es revisado por dos pares académicos externos a la institución de los autores, mediante un proceso de "revisión entre pares" (*Peer-review*) de doble-ciego, garantizando el anonimato de los autores y evaluadores; se considera confidencial todo trabajo recibido y así se le exige a sus evaluadores.

Las posibles conclusiones de los resultados de la evaluación por parte de los árbitros son únicamente tres: publicar el artículo sin modificaciones, publicar el artículo con modificaciones o no publicar el artículo.

Posteriormente, el Comité Editorial toma la decisión de publicar o no los artículos, con base en los resultados de las evaluaciones realizadas por los árbitros asignados. En caso de existir contradicciones en las evaluaciones con respecto a la publicación de un artículo, el Comité Editorial enviará el artículo a un tercer árbitro y se inclinará por las dos evaluaciones que tengan el mismo concepto respecto a la publicación del artículo.

En cada convocatoria el autor de correspondencia debe sugerir al menos cuatro posibles evaluadores externos a su institución laboral, los cuales deben ser especialistas en el tema específico del artículo remitido, tener al menos maestría y por lo menos dos deben ser internacionales. Los posibles evaluadores pueden pertenecer a una universidad o industria, pública o privada; de estos se debe proporcionar el nombre completo, su formación académica más alta, su afiliación institucional y su correo electrónico. Estos cuatro potenciales

evaluadores serán analizados por el Comité Editorial a fin de ampliar la base de datos de los árbitros de la revista *Tecnura*.

El Comité Editorial de la revista *Tecnura* se reserva los derechos de impresión, reproducción total o parcial del artículo, así como el de aceptarlo o rechazarlo. Igualmente, se reserva el derecho de hacer cualquier modificación editorial que estime conveniente; en tal caso el autor recibirá por escrito recomendaciones de los evaluadores. Si las acepta, deberá entregar el artículo con los ajustes sugeridos dentro de las fechas fijadas por la revista para garantizar su publicación dentro del número programado.

6. CONTACTO

Para cualquier solicitud de información adicional puede comunicarse a través del correo electrónico de la revista *Tecnura*: tecnura@udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com, o por mensajería con el Ing. Cesar Augusto García Ubaque, Director y Editor de la revista *Tecnura*, a la dirección:

Revista Tecnura
Sala de Revistas, Bloque 5, Oficina 305.
Facultad Tecnológica
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Transversal 70 B N. 73 a 35 sur
Teléfono: 571 – 3238400 Extensión: 5003
Celular: 57–3153614852
Bogotá D.C., Colombia
Email:
tecnura.ud@correo.udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com
Página web:
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

Tecnura journal District francisco José de caldas university Faculty of technology

CONTENT

- **Scope and editorial policy of the journal**
- **Type of accepted articles**
- **Article format**
- **Article submission**
- **Publication procedure**
- **Article arbitration**
- **Contact**

SCOPE AND EDITORIAL POLICY OF THE JOURNAL

Tecnura journal is an institutional publication of the Faculty of Technology from University Francisco José de Caldas. It is a scientific and technological publication with quarterly periodicity, which is published in January, April, July and October. The first issue appeared in the second semester of 1997 and up to now it has maintained its regularity.

The areas of interest of *Tecnura journal* are focused on all engineering fields such as electronics, telecommunications, electricity, systems, industrial, mechanics, cadastral, civil, environmental, among others. However, it is not restricted to those; it also has room for education and health issues, as long as they are related to engineering. The journal will only publish concerning scientific and technological research, reflection and revision. In consequence, during the initial editorial evaluation, short articles and case reports will be rejected.

Tecnura Journal is addressed for professors, researchers, students and professionals interested in permanent update of their knowledge and follow-up of scientific-technologic processes in the field of engineering. *Tecnura Journal* has as mission to disseminate results of research projects in

the areas of engineering, through the publication of original and unpublished articles, conducted by academics and professionals accredited by public or private national or foreign institutions. Articles submitted to *Tecnura journal* must be unpublished works written in Spanish or English; nevertheless, preference will be given to articles that show innovative concepts of great interest, related to the objective and scope of the journal.

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

Tecnura is a journal arbitrated by a revision process among double blind peers. The schedule of the conformation of its scientific and editorial committee is subject to the publication of articles in internationally indexed journals by their members.

District University Francisco José de Caldas, its directors, the editor, the editorial and scientific committee are not responsible for the opinions and the criteria expressed in the content of the articles

and they are published under the exclusive responsibility of the authors and do not necessarily reflect the ideas of the editorial committee.

In addition to the printed version, Tecnura journal also has a digital version available in its web page: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/index>

TYPE OF ARTICLES ACCEPTED

According to the classification of the Scientific and Technological Publications National Index (Publindex-Colciencias), *Tecnura* journal receives nominations of unpublished articles on the following topics:

- ***Scientific and technological research articles:*** document that presents, in a detailed manner, the original results of research projects. The generally used structure contains four main parts: introduction, methodology, results and conclusions.
- ***Reflection articles:*** document that presents research results from an analytic, interpretative or critic perspective from the author, dealing with a specific topic and adopting original sources.
- ***Review article:*** document that results from a research where the results of published or unpublished research on a science or technology field are analyzed, systematized and integrated, in order to state the advances and tendencies in development. It is characterized for presenting a careful bibliographical review of at least 50 references.

ARTICLE FORMAT

About the appropriate language and style for articles writing

- Authors must use simple sentence structures, avoiding those too long or complex.
- The vocabulary used must be basic and common. Technical language must be briefly explained; also, the meaning of the acronyms must be given the first time they appear in the text.
- The authors are responsible for their work to be conducted in a professional and ethic manner.

About the length of articles

The articles should not exceed 25 pages in letter size and double space, with symmetric margins of 3 cm. Only in the case of review articles, these 25 pages do not include references.

About the presentation format

Submitted articles must be unpublished works written in Spanish or English, and must be typed in Microsoft Word (2003 and beyond), complying with the following indications:

- *Times New Roman* letter, 12 point (except it is required for some sections).
- One column, double-spaced.
- All the margins 3 cm.
- Paragraphs should be justified without spaces between consecutives and without cutting words.
- Do not include page breaks or section finals.
- If you want to emphasize words or phrases from the text, do not use bold letters but italic.
- Decimals should be pointed with comma (,) and not with period (.).
- Thousands and millions should be pointed with a fine space.
- Avoid footnotes.
- Arabic nomenclature must be used only until the third level.

About the article structure

The papers must have the following structure and comply with the following requirements:

Composition of an article

All the articles submitted for evaluation and possible publication by the Tecnura Journal must have at least the following components:

- Title in Spanish and English.
- Information about the authors.
- Abstract in Spanish and English.

- Key words in Spanish and English.
- Introduction.
- Conclusions.
- Future work (optional).
- Acknowledgements (optional).
- Bibliographical references.

If the article is related to scientific and technological research must have, in addition to the above, the following components:

- Methodology.
- Results.
- Financing.

Title

The title of the article must be short or divided in title and subtitle, attractive for the potential reader and written in capital letters. It should appear centered between the margins, written in *Times New Roman* letter, in bold, font size 18. The title of the article has to be in Spanish and English separated by double space. Maximum 20 words.

Authors

After the title the complete name(s) of the author(s) must be written, with their basic biographical data: undergraduate degree, graduate degree, occupation or position, institutional affiliation (institution where they work), dependency, city, country and e-mail. The above information must be immediately below the author's name.

Abstract

The scope and purpose of the work must be established giving a clear and concise description of the methodology, results presented and the conclusions obtained. Maximum of 250 words.

Keywords

Between three and ten keywords must be chosen, written in English with *Times New Roman* letter in bold and italic.

Key words must be written in alphabetic order and must be as standard as possible, for which it is suggested the use of international databases according to the area of knowledge. For example, in the area of Electrics and Electronics it is suggested to use the IEEE thesaurus and World Bank thesaurus that can be accessed at the following web pages respectively:

http://www.ieee.org/documents/2009Taxonomy_v101.pdf

<http://multites.net/mtsql/wb/site/default.asp>

Abstract in Spanish

Translation to the Spanish language of the text that appears in the abstract, it must be correct and precise.

Keywords in Spanish

Translation to the English language of the keywords in Spanish, they must be correct and precise.

Keywords must be written in the order of the English version and must be as standard as possible, for which it is suggested the use of international databases according to the area of knowledge. For example, in the area of Electrics and Electronics it is suggested to use the UNESCO thesaurus that can be found at the following web pages:

<http://databases.unesco.org/thessp>

Introduction

The general idea of the work must be described, its context, backgrounds, state of the art of the topic, objectives and possible scope of the work.

Methodology

The writing of this part must allow any specialized professional in the topic to replicate the research.

Results

Explanation and interpretation of the findings. If necessary, a brief discussion focused on the interpretation of the results can be presented.

Conclusions

Implication of the results and their relation to the proposed objective.

Financing

Mention the associated research from which the article was derived and the entity that endorsed and financed the research.

Acknowledgments

They should preferably be brief and include the essential contributions for the development of the paper.

Equations

Equations must appear centered with respect to the main text. They must be referenced with consecutive numbers (written in parenthesis close to the right margin). Equations are cited in the main text employing the word equation, and followed by the number in parenthesis. Equations must be made in an appropriate equation editor and compatible with "InDesign" software, as for example the equation editor of Windows.

Tables

In the case of implementation of tables, it is recommended that these are not inserted as images, considering that in that format they cannot be modified. The title of each table must include the word table (in italic) followed by the corresponding consecutive number and a brief name of the table. The heading must be written in TNR letter, italic and font size 9.

Charts are not presented but tables and they should be automatically raised from the text processor. Tables should be named and referenced in the article, in strict order. Every table must have at the bottom the source from which it was taken, or to mention self-authorship if it is the case.

Figures

All the figures or pictures have to be sent in JPG or PNG format with a minimum resolution of 300 DPI, adapted to gray scale.

The footnote or name of each figure must include the word figure (in italic) followed by the corresponding consecutive number and a brief description of the content of the figure. The footnote of the figure must be written in *Times New Roman* letter, italic and font size 9. Figures must be named and referenced in the article, in strict order. Every figure must have at the bottom the source from which it was taken, or to mention self-authorship if it is the case.

Symbols

The symbols of the constants, variables and functions in Latin or Greek letters –included in the equations- must be in italic; the mathematical symbols and the numbers do not go in italic. The symbols must be identified immediately after the equation. Units, dimensions and symbols of the international system must be used

When using acronyms or abbreviations, the complete equivalence should be written first, followed by the corresponding acronym or abbreviation in parenthesis and from there it is only written the respective acronym or abbreviation.

Bibliographic references

The adopted reference citation style by *Tecnura* journal is APA sixth edition. The cites, bibliographic references and infography are included in the last part of the article. The bibliographic references must be alphabetically ordered according to the author's first surname, without numbering.

There should only appear the cited references in the main body of the work, in tables or in figures. It means, in the list there should not appear other references although they have been consulted by the authors for the work preparation. We suggest using tools such as: Cites and bibliography from Microsoft Word (for APA sixth edition version 2013 or superior), Zotero, Mendeley, among others.

The call for a bibliographic reference is inserted in the text, at the pertinent point, under certain characteristics:

- If the sentence includes the author's surname, it should only be written the date into a parenthesis, for instance:

Cuando Vasco (2012), analizó el problema de presentado en

- When the author is not included in the sentence, surname and date must be into a parenthesis.

La investigación de materiales dio una visión en el área (Martínez, 2012).

- If the document or work has more than two authors, the first cite must include all the surnames. 1990. (Fernández Morales, Villa Krieg & Caro de Villa, 2008)

- In the following mentions, it must only be written the author's first surname, followed by "et al.".

En cuanto al estudio de las aguas, Fernández Morales et al. (2008) encontraron que ...

- When the document or work has more than six authors, it must be used from the first mention "et al.".

Next it is described a series of examples of the more used references, according to the reference style adopted by *Tecnura* journal:

Periodical Publications:

Basic Form

Surnames, A. A., Surnames, B. B. & Surnames, C. C. (Date). Article's title. *Title of the publication*, volume (number), pp. xx-xx. doi: xx.xxxxxxx

Basic article

Guevara López, P., Valdez Martínez, J., Agudelo González, J., & Delgado Reyes, G. (2014). Aproximación numérica del modelo epidemiológico SI para la propagación de gusanos informáticos, simulación y análisis de su error. *Revista Tecnura*, 18(42), 12 -23. doi:http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.4.a01

Web article

Rodríguez Páez, S., Fajardo Jaimes, A., & Páez Rueda, C. (2014). Híbrido rat-race miniaturizado para la banda ISM 2,4 GHz. *Revista Tecnura*, 18(42),

38-52. Recuperado de <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/article/view/8059/9675>

Books:

Basic Form

Surnames, A. A. (Year). *Title*. City: Editorial.

Surnames, A. A. (Year). *Title*. Recovered from <http://www.xxxxxx.xxx>

Surnames, A. A. (Year). *Title*. doi: xx.xxxxxxxx

Surnames, A. A. (Ed.). (Year). *Title*. City: Editorial.

Book with author

Goleman, D. (2000). *La inteligencia emocional: Por qué es más importante que el cociente intelectual*. México: Ediciones B.

Book with editor:

Castillo Ortiz, A. M. (Ed.). (2000). *Administración educativa: Técnicas, estrategias y prácticas gerenciales*. San Juan: Publicaciones Puertorriqueñas

Book electronic version:

Montero, M. & Sonn, C. C. (Eds.). (2009). *Psychology of Liberation: Theory and applications*. [Versión de Springer]. doi: 10.1007/ 978-0-387-85784-8

Technical report:

Basic Form

Surnames, A. A. (Year). *Title*. (Report No. xxx). City: Editorial

Report with authors

Weaver, P. L., & Schwagerl, J. J. (2009). *U. S. Fish and Wildlife Service refuges and other nearby reserves in Southwestern Puerto Rico*. (General Technical Report IITF-40). San Juan: International Institute of Tropical Forestry.

Report from a Government agency

Federal Interagency Forum on Child and Family Statistics. *America's Children: Key National Indicators of Well-Being, 2009*. Washington, DC: U.S. Government Printing Office. Recuperado de <http://www.childstats.gov/pubs/index.asp>

Thesis**Basic form**

Surnames, A. A. (Year). Title. (Unpublished master or doctorate thesis). Institution name, Location.

Unpublished thesis, printed

Muñoz Castillo, L. (2004). *Determinación del conocimiento sobre inteligencia emocional que poseen los maestros y la importancia que le adscriben al concepto en el aprovechamiento de los estudiantes*. (Tesis inédita de maestría). Universidad Metropolitana, San Juan, PR.

Commercial database thesis

Santini Rivera, M. (1998). *The effects of various types of verbal feedback on the performance of selected motor development skills of adolescent males with Down syndrome*. (Tesis doctoral). Disponible en la base de datos ProQuest Dissertations and Theses. (AAT 9832765).

Web thesis

Aquino Ríos, A. (2008). *Análisis en el desarrollo de los temas transversales en los currículos de español, matemáticas, ciencias y estudios sociales del Departamento de Educación*. (Tesis de maestría, Universidad Metropolitana). Recuperado de http://suagm.edu/umet/biblioteca/UMTESIS/Tesis_Educacion/ARAquinoRios1512.pdf

Standards or patents**Basic form**

Surnames, A. A. Title of the patent. Country and number of the patente. Classification of the patent, date of official license. Number and date of patent request, pagination.

Hernández Suárez, C. A., Gómez Saavedra, V. A., & Peña Lote, R. A. Equipo medidor de indicadores de calidad del servicio de energía eléctrica para usuario residencial. Colombia., 655. G4F 10/0, 15 de Marzo 2013. 27 de Octubre 2011, 147

ARTICLE SUBMISSION

Authors must submit their articles through the application Open Journal System in digital format, attaching the cover letter and the article-authors format.

Cover letter

The article must be submitted with a cover letter addressed to the director and editor of the journal, Engineer Cesar Augusto Garcia Ubaque, including:

- Specific request to consider your article to be published in Tecnura journal.
- Full title of the article.
- Full names of all the authors of the paper.
- Certification of the originality and unpublished character of the paper.
- Exclusivity of submission to Tecnura journal.
- Authoring confirmation with signature of all the authors.

This letter must be signed by all the authors, scanned and sent with the remaining requested documents.

Article-authors information format

The article has to be submitted with an information format about the article and its authors which can be downloaded from the web page of Tecnura journal <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/index>, in the section "Forms and Documents". It is important to complete all the fields of information requested, some of them have comments to clarify better what is being requested. The format must not be scanned.

Article

Article in digital format (Word 2003 and later editions) that complies with all the presentation rules described in chapter three, "Article structure", of this guide of instructions for authors.

PUBLICATION PROCEDURE

The procedure to be followed by Tecnura journal for the evaluation and possible publication of the papers sent by the authors is the following in chronological order:

1. Delivery of the article with the cover letter and the information format by the authors.
2. Notification to the author about the reception of the article.
3. Verification of the presentation rules by the monitor of the journal.
4. Notification to the author about the evaluation of the presentation rules.
5. Submission of corrections made by the authors related to the evaluation of presentation rules.
6. Submission of the articles to the selected arbitrators.
7. Notification of the beginning of the arbitration process of the article.
8. Notification to the authors about the decision made by the editorial committee, and about the evaluations made by the arbitrators.
9. Delivery of the corrections made by the authors with respect to the evaluations made by the arbitrators.
10. Study of the final version of the article and the evaluations of the arbitrators by the editorial committee.
11. Delivery by the authors of the letter that surrenders right to the editor of the journal.
12. Submission of the version with style corrections and diagrammed to the authors.
13. Verification of errors and final approval of the version with style corrections and diagrammed by the authors.
14. Publication of the article in the corresponding number of Tecnura journal.
15. Notification to the authors of the number of interest.
16. Delivery of a copy of the journal to each one of the authors of the published article.

ARTICLE ARBITRATION PROCESS

Considering the quarterly periodicity of the journal, the Editorial Committee makes four calls every year for the submission of articles, approximately in the months of February, May, August and November. The articles will be received until the date established in the call.

Once received the articles, the monitor of the journal will make an initial form evaluation to verify the completion of the elements mentioned in this guide of instructions to authors. After receiving again the article with the requested corrections by the journal's monitor, the paper will be submitted to evaluation by three academic peers (through time it is expected to include more external peers to participate in the process).

Each article sent to Tecnura journal is checked by two expert academic peers external to the institution of the authors, by a process of "Peer-review" of double blind, guaranteeing the anonymity of authors and evaluators; every paper sent is considered confidential and so it is demanded to evaluators.

Possible conclusions of the result of the evaluation by the judges are only three: publish the article without modifications, publish the article with modifications and not publish the article.

Subsequently, the Editorial Committee takes the decision to publish or not the articles, based on the results of the evaluations made by the assigned arbitrators. In case of contradictions in the evaluations with respect to the publication of an article, the editorial committee will send the article to a third peer and will be inclined for the two evaluations that have the same concept with respect to the publication of the article.

In each call the main author must suggest at least four possible external arbitrators to his work institution evaluators, who must be specialists in the specific topic of the article sent and must have at least Masters level, and at least two must to be international. Potential evaluators can belong to a university or industry, public or private; their

complete names must be provided, highest academic formation, institutional affiliation and e-mail. The editorial committee will analyze these four potential evaluators in order to enrich the database of arbitrators of *Tecnura* journal.

The Editorial Committee of *Tecnura* journal reserves the right to print, reproduce total or partially the article, as the right to accept or reject it. In the same way, it has the right to make any editorial modification that considers necessary; in this case the author will receive written recommendations from the evaluators. If accepted, authors must deliver the article with the suggested adjustments within the dates given by the journal to guarantee its publication in the programmed number.

CONTACT

For any additional information request, please send an e-mail to *Tecnura* journal tecnura@udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com or by mail to Cesar Augusto Garcia Ubaque, Director and Publisher of *Tecnura* Journal, to the following address:

Tecnura Journal
Journals Room, Block 5, Office 305.
Faculty of Technology
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Transversal 70 B N. 73 a 35 sur
Phone: 571-3238400 Extension: 5003
Mobile: 57-3153614852
Bogotá D.C., Colombia
Email:
tecnura.ud@correo.udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com
Web page:
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/index>



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

SUSCRIPCIÓN

Revista *Tecnura*

Nombre completo: _____

Institución u organización: _____

Factura a nombre de: _____

Dirección de envío: _____

Ciudad: _____ Departamento, Estado o provincia: _____

Código postal: _____ Apartado aéreo / P.O. Box: _____

País: _____ Correo electrónico: _____

Teléfono: _____ Fax: _____ Firma: _____

Tabla de costos de suscripción:

Región	1 Año	2 Años
Bogotá	40 000 COP	70 000 COP
Colombia	45 000 COP	80 000 COP
América Latina y el Caribe	40 USD	70 USD
Estados Unidos y Canadá	40 USD	70 USD
Otras regiones	60 USD	100 USD

Nota: los precios tanto en dólares como en pesos incluyen el valor del envío.

Diligenciar el formato de suscripción y enviarlo por correo junto con la copia del recibo de consignación a la dirección postal que aparece en el parte inferior de esta página o escaneado a los correos electrónicos tecnura.ud@correo.udistrital.edu.co y tecnura@gmail.com. La consignación nacional se realiza en el Banco de Occidente a nombre de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas en la cuenta de ahorros número 230-81461-8.

Canje y suscripciones

Enviar a Ing. César Augusto García Ubaque, PhD.

Director y Editor Revista *Tecnura*

Biblioteca

Facultad Tecnológica

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Transversal 70B No. 73A - 35 sur

Teléfono: +57 - 1 - 7311542

Celular: +57 - 3153614852

Bogotá, D.C., Colombia

Correo electrónico: tecnura@udistrital.edu.co tecnura@gmail.com

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



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

SIGN UP

Tecnura journal

Full name: _____
Institution or organization: _____
Invoice name: _____
Mailing address/address: _____
City: _____ Department, state or province: _____
Zip code: _____ P.O. Box: _____
Country: _____ E-mail: _____
Phone number: _____ Fax: _____ Signature: _____

Table of subscription costs:

Región	1 year	2 year
Bogotá	23 USD	40 USD
Colombia	26 USD	46USD
Latin America and The Caribbean	40 USD	70 USD
The United States of America and Canada	40 USD	70 USD
Other regions	60 USD	100 USD

Note: prices in both dollars and pesos include the value of the shipment.

Fill out the subscription form and mail it along with a copy of the receipt of consignment to the e-mail address that appears in the bottom of this page or scanned to the following E-mails: tecnura.ud@correo.udistrital.edu.co and tecnura@gmail.com. The national bank deposit is done in Banco de Occidente in the name of Universidad Distrital Francisco José de Caldas in the savings account number 230-81461-8.

Exchange and Subscription

Send Ing Cesar Augusto Garcia Ubaque PhD.
Editor and Publisher Tecnura Journal

Library

Technology Faculty
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Transversal 73A No. 70B-35 Sur
Phone: +57 - 1 - 7311542
Mobile: +57-3153614852
E-mail: tecnura@udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com