

ISSN 0123-921X

Tecnura

Tecnología y Cultura Afirmando el Conocimiento

Universidad Distrital Francisco José de Caldas • Facultad Tecnológica

METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA MADUREZ DE LA GESTIÓN DEL CONOCIMIENTO EN ALGUNAS GRANDES EMPRESAS COLOMBIANAS / Carlos Mario Durango Yepes / Martha Elena Quintero Muñoz / Carlos Arturo Ruiz González • DURABILIDAD Y ACÚSTICA DEL CONCRETO CON ESCORIA DE CUBILOTE COMO REEMPLAZO DEL AGREGADO FINO / Ricardo Alfredo Cruz Hernández / Carlos Mauricio Pico Cortés / Ludwing Pérez Bustos • RESISTENCIA DE UNA CONEXIÓN EMPERNADA SOLICITADA A CIZALLADURA DOBLE PARALELA A LA FIBRA PARA ESTRUCTURAS DE GUADUA ANGUSTIFOLIA / Fabián Augusto Lamus Báez / Mayra Alejandra Plazas Bernal / Patricia Luna Tamayo • INFLUENCE OF THE VOID RATIO AND THE CONFINING ON THE STATIC LIQUEFACTION IN SLOPES IN CHANGI SAND / Alfonso Mariano Ramos Cañón • COMPORTAMIENTO A FATIGA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COLOMBIANAS CON ADICIÓN DE PAVIMENTO RECICLADO AL 100% / Neidy Betssey Patiño Boyacá / Oscar Javier Reyes Ortiz / Javier Fernando Camacho Tauta • EVALUACIÓN DEL LÍMITE DE RESISTENCIA A LA CORROSIÓN FATIGA DEL ACERO SAE 1020 EN AMBIENTE ÁCIDO / William Mauricio Sanabria Becerra / Oscar Hernando Pardo Cuervo / Robinson de Jesús Torres Gómez • EVALUATION OF ENERGY EFFICIENCY OF AN INNOVATIVE VERTICAL AXIAL ROTARY KILN FOR POTTERY PRODUCTION / Carlos Andrés Forero Núñez / Germán Arturo López Martínez / Fabio Emiro Sierra Vargas • PLANEACIÓN ÓPTIMA DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN CONSIDERANDO MÚLTIPLES OBJETIVOS: COSTO DE INVERSIÓN, CONFIABILIDAD Y PÉRDIDAS TÉCNICAS / Ana María Mejía Solanilla / Ricardo Alberto Hincapié Isaza / Ramón Alfonso Gallego Rendón • PROCESAMIENTO PARALELO EN FPGA PARA CONVOLUCIÓN DE IMÁGENES USANDO MATLAB / Fernando Martínez Santa • TÉCNICAS DE CONTROL PARA EL BALANCE DE UN ROBOT BÍPEDO: UN ESTADO DEL ARTE / Sergey González Mejía / José Miguel Ramírez Scarpetta / Edna Joydeth Avella Rodríguez • COMPUESTOS ORGÁNICOS PERSISTENTES EN COLOMBIA: CUANTIFICACIÓN Y DIAGNÓSTICO PARA PESTICIDAS ORGANOCOLORADOS / César Augusto García Ubaque / Juan Carlos García Ubaque / Martha Lucía Vaca Bohórquez •

METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA MADUREZ DE LA GESTIÓN DEL CONOCIMIENTO EN ALGUNAS GRANDES EMPRESAS COLOMBIANAS

ENERGY EFFICIENCY EVALUATION OF AN INNOVATIVE VERTICAL AXIAL ROTARY KILN FOR POTTERY PRODUCTION

PLANEACIÓN ÓPTIMA DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN CONSIDERANDO MÚLTIPLES OBJETIVOS: COSTO DE INVERSIÓN, CONFIABILIDAD Y PÉRDIDAS TÉCNICAS

Revista Tecnura • ISSN 0123-921X • Volumen 19 - Número 43 • UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Bogotá D.C. ISSN 0123-921X. Volumen 19 - Número 43. enero - marzo de 2015



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS



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



Tecnura

Tecnología y Cultura, Afirmando el Conocimiento

Volumen 19 - Número 43

Enero - marzo de 2014

p-ISSN: 0123-921X

e-ISSN: 2248-7638

TECNURA JOURNAL

Volume 19 - Number 43

January - March, 2015

p-ISSN: 0123-921X

e-ISSN: 2248-7638



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

EDITOR

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

COMITÉ EDITORIAL

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

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

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

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

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

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

Ph.D. Ing. Jorge Mario 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. La Valle
University of Illinois, Estados Unidos

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

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

EVALUADORES

Ph.D. Andrés Tovar Pérez
Indiana University-Purdue University, Indianapolis, Estados Unidos

Ph.D. Anna Sidorova
Universidad Politécnica de Cataluña, España

Ph.D. Caori Patricia Takeuchi Tam
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

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

Ph.D. Carolina Sarmiento Mantilla
Universidad Politécnica de Cataluña, España

Ph.D. Jesús María López Lezama
Universidad de Antioquia, Colombia

Ph.D. John Fredy Franco Baquero
Universidad Estadual Paulista, Brasil

Ph.D. Mónica Lorena Sánchez Limón
Universidad Autónoma de Tamaulipas, México

Ph.D. Ramón Botella Nieto
Universidad Politécnica de Cataluña, España

Ph.D. Yesid Aguilar Castro
Universidad del Valle, Colombia

Ph.D (c). Juan Carlos Ruge Cárdenas
Universidad de Brasilia, Brasil

M.Sc. Andrés Enrique Nieto Leal
Universidad Militar Nueva Granada, Colombia

M.Sc. Andrés Felipe Panesso Hernández
Universidad de La Salle, Colombia

M.Sc. Carlos Andrés Aristizábal Botero
Universidad de Antioquia, Colombia

M.Sc. Fabiola Mejía
Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central, Colombia

M.Sc. Gabriel de Jesús Camargo Vargas
Universidad Libre, Colombia

M.Sc. José Tomás Buitrago Molina
Universidad del Valle, Colombia

ASISTENTES DE LA REVISTA *TECNURA*

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

PORTADA

<http://www.freeimages.com/photo/1159613>

CONTRAPORTADA

<http://www.freeimages.com/photo/1159613>

PREPARACIÓN EDITORIAL Y DISEÑO

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

DIRECCIÓN

Rubén Eliécer Carvajalino Carvajalino

COORDINACIÓN EDITORIAL

María Elvira Mejía Pardo

CORRECCIÓN DE ESTILO PARA ESPAÑOL

Rodrigo Díaz Losada

CORRECCIÓN DE ESTILO PARA INGLÉS

Edward Stiven Valderrama Briñas

DIAGRAMACIÓN ELECTRÓNICA Y MONTAJE DE CUBIERTA

Margoth de Olivos SAS

IMPRESIÓN

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

REVISTA *TECNURA*

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

PERIODICIDAD

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

COBERTURA TEMÁTICA

Las áreas temáticas de interés de la revista *Tecnura* están enfocadas a todos los campos de la ingeniería, como electrónica, telecomunicaciones, electricidad, sistemas, industrial, mecánica, catastral, civil, ambiental, entre otras. Sin embargo, no se restringe 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 inge-

nería, a través de la publicación de artículos originales e inéditos, realizados por académicos y profesionales pertenecientes a instituciones nacionales o extranjeras del orden público o privado.

PÚBLICO OBJETIVO

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

INDEXACIÓN

Tecnura es una publicación de carácter académico indexada en el Índice Bibliográfico Nacional Publindex (IBN) de Colciencias (Colombia) en la categoría A2, en los índices regionales Scielo Colombia (Colombia) y Redalyc (México); además de las siguientes bases bibliográficas: Inspec, del Institution of Engineering and Technology (Inglaterra); Fuente Académica Premier de Ebsco (Estados Unidos); CABI (Inglaterra); Index Corpnicus (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 el Caribe, Latindex (México); Índice Bibliográfico Actualidad Iberoamericana (Chile), e-Revistas (España), DOAJ (Suecia), Ulrich de Proquest (Estados Unidos) y CABI (Reino Unido).

FORMA DE ADQUISICIÓN

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

SUSCRIPCIÓN

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

REPRODUCCIÓN

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

DIRECCIÓN POSTAL

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

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. Por ello 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 al 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 las normas de la revista. Las decisiones de los editores de aceptar o rechazar un documento para su publicación se basan únicamente en la relevancia del trabajo, la originalidad y la pertinencia con relación a la línea editorial de la revista.

La revista incluye una descripción de los procesos seguidos en la evaluación por pares de cada trabajo recibido. Cuenta con una guía de autores en la que se presenta esta información. Dicha guía se actualiza regularmente y contiene un vínculo a la presente declaración ética. Se reconoce el derecho de los autores a apelar las decisiones editoriales.

Los editores no modificarán su decisión en la aceptación de envíos, a menos que se detecten irregularidades o situaciones extraordinarias. Cualquier cambio en los miembros del equipo editorial no afectará las decisiones ya tomadas, salvo casos excepcionales en los que confluyan circunstancias graves.

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 a responder con rapidez a las quejas recibidas y a velar por 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 el 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 o los alumnos participantes, como colaboradores o sujetos de estudio en las investigaciones presentadas).

Seguimiento de malas prácticas

Tecnura asume su obligación de 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 solo rechazarán los manuscritos que planteen dudas sobre una posible mala conducta, sino que también 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 y se informará inmediatamente tanto a los lectores como a los sistemas de indexación.

Se consideran prácticas inadmisibles, y como tal se denunciarán, las siguientes: 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 los 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 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 o el propio equipo editorial.

Quejas/denuncias

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



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

EDITOR

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

EDITORIAL COMMITTEE

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

SCIENTIFIC COMMITTEE

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

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

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

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

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

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

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

EVALUATORS

Ph.D. Andrés Tovar Pérez
Indiana University-Purdue University Indianapolis, Estados Unidos

Ph.D. Anna Sidorova
Universidad Politécnica de Cataluña, España

Ph.D. Caori Patricia Takeuchi Tam
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

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

Ph.D. Carolina Sarmiento Mantilla
Universidad Politécnica de Cataluña, España

Ph.D. Jesús María López Lezama
Universidad de Antioquia, Colombia

Ph.D. John Fredy Franco Baquero
Universidad Estadual Paulista, Brasil

Ph.D. Monica Lorena Sanchez Limón
Universidad Autónoma de Tamaulipas, México

Ph.D. Ramón Botella Nieto
Universidad Politécnica de Cataluña, España

Ph.D. Yesid Aguilar Castro
Universidad del Valle, Colombia

Ph.D (c). Juan Carlos Ruge Cardenas
Universidad de Brasilia

M.Sc. Andrés Enrique Nieto Leal
Universidad Militar Nueva Granada, Colombia

M.Sc. Andres Felipe Panesso Hernández
Universidad de la Salle, Colombia

M.Sc. Carlos Andrés Aristizabal Botero
Universidad de Antioquia, Colombia

M.Sc. Fabiola Mejia
Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central, Colombia

M.Sc. Gabriel de Jesus Camargo Vargas
Universidad Libre, Colombia

M.Sc. José Tomás Buitrago Molina
Universidad del Valle, Colombia

TECNURA JOURNAL ASSISTANTS

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

TITLE PAGE

<http://www.freeimages.com/photo/1159613>

BACK COVER

<http://www.freeimages.com/photo/1159613>

EDITORIAL AND DESIGN PREPARATION

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

DIRECTED BY

Rubén Eliecer Carvajalino Carvajalino

EDITORIAL COORDINATION

María Elvira Mejía Pardo

STYLE CORRECTION IN SPANISH

Rodrigo Díaz Lozada

STYLE CORRECTION IN ENGLISH

Margoth de Olivos SAS

ELECTRÓNIC LAYOUT AND TITLE PAGE DISEGN

Guillermo Peñaloza Martínez

PRINTED BY

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

TECNURA JOURNAL

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

PERIODICITY

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

THEMATIC COVERAGE

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

MISSION

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

TARGET AUDIENCE

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

INDEXING

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

FORM OF ACQUISITION

Tecnura journal is available through purchase, exchange or subscription.

SIGN UP

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

REPRODUCTION

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

POSTAL ADDRESS

Send to Ing. Cesar Augusto García Ubaque Ph.D. Director and Editor Revista Tecnura

Sala de Revistas, Bloque 5, Oficina 305.

Technological Faculty

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Transversal 70B No. 73A - 35 sur

Telephone Number: 571 - 3238400, extension: 5003

Cell phone Number: 57 - 3153614852

Bogotá D.C., Colombia

E-mail: tecnura@udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com

Tecnura on internet: <http://tecnura.udistrital.edu.co>

CODE OF ETHICS AND GOOD PRACTICE

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

General duties and responsibilities of the editorial board

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

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

Relations with readers

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

Relations with authors

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

The journal includes a description of the process for peer evaluation of each received work, and has an authors guide with this information. The guide is regularly updated and contains a link to this code of ethics. The journal recognizes the right of authors to appeal editorial decisions

Publishers will not change their decision in accepting or rejecting articles, unless extraordinary circumstances or irregularities are detected. Any change in the editorial board members will not affect decisions already made, except for unusual cases where serious circumstances converge.

Relations with evaluators

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

Peer review process

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

Claims

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

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

Promoting Academic Integrity

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

Protection of individual data

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

Tracking malpractice

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

Integrity and academic rigour

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

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

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

Relations with owners and journal editors

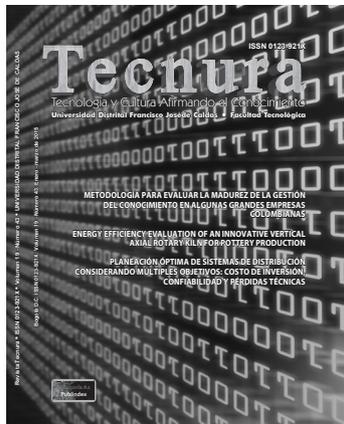
The relation between editors, publishers and owners will be subject to the principle of editorial independence. *Tecnura* will ensure that articles are published based on their quality and suitability for readers, and not for an economic or political gain. In this sense, the fact that the journal is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

Conflict of interest

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

Complaints / allegations

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



Revista *Tecnura*
 Volumen 19 - Número 43
 p-ISSN: 0123-921X
 e-ISSN: 2248-7638
 enero-marzo de 2015

TABLA DE CONTENIDO

EDITORIAL

16

INVESTIGACIÓN

METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA MADUREZ DE LA GESTIÓN DEL CONOCIMIENTO EN ALGUNAS GRANDES EMPRESAS COLOMBIANAS

20

Methodology for assessing the maturity of knowledge management in large companies some colombian to

Carlos Mario Durango Yepes / Martha Elena Quintero Muñoz
 Carlos Arturo Ruiz González

DURABILIDAD Y ACÚSTICA DEL CONCRETO CON ESCORIA DE CUBILOTE COMO REEMPLAZO DEL AGREGADO FINO

37

Durability and acoustics of concrete with slag of cupola furnace as fine aggregate replacement

Ricardo Alfredo Cruz Hernández / Carlos Mauricio Pico Cortés
 Ludwing Pérez Bustos

RESISTENCIA DE UNA CONEXIÓN EMPERNADA SOLICITADA A CIZALLADURA DOBLE PARALELA A LA FIBRA PARA ESTRUCTURAS DE GUADUA ANGUSTIFOLIA

52

Bolted join strength under parallel to grain double shear in guadua angustifolia structures

Fabián Augusto Lamus Báez / Mayra Alejandra Plazas Bernal
 Patricia Luna Tamayo

INFLUENCE OF THE VOID RATIO AND THE CONFINING ON THE STATIC LIQUEFACTION IN SLOPES IN CHANGI SAND

63

Influencia de la relación de vacíos y el confinamiento en la licuación estática en taludes de arena de Changi

Alfonso Mariano Ramos Cañón

INVESTIGACIÓN

COMPORTAMIENTO A FATIGA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COLOMBIANAS CON ADICIÓN DE PAVIMENTO REICLADO AL 100%

74

Fatigue behavior of asphalt mixtures colombian with addition recycled pavement asphalt to 100%

Neidy Betssey Patiño Boyacá / Oscar Javier Reyes Ortiz
 Javier Fernando Camacho Tauta

EVALUACIÓN DEL LÍMITE DE RESISTENCIA A LA CORROSIÓN FATIGA DEL ACERO SAE 1020 EN AMBIENTE ÁCIDO

84

Limit to corrosion fatigue strength evaluation of sae 1020 steel in acidic environment

William Mauricio Sanabria Becerra / Oscar Hernando Pardo Cuervo
 Robinson de Jesús Torres Gómez

ENERGY EFFICIENCY EVALUATION OF AN INNOVATIVE VERTICAL AXIAL ROTARY KILN FOR POTTERY PRODUCTION

93

Evaluación de la eficiencia energética de un horno rotatorio axial vertical para la producción de cerámica

Carlos Andrés Forero Núñez / Germán Arturo López Martínez
 Fabio Emiro Sierra Vargas

PLANEACIÓN ÓPTIMA DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN CONSIDERANDO MÚLTIPLES OBJETIVOS: COSTO DE INVERSIÓN, CONFIABILIDAD Y PÉRDIDAS TÉCNICAS

106

Optimal planning of distribution systems considering multiple objectives: investment cost, reliability and technical losses

Ana María Mejía Solanilla / Ricardo Alberto Hincapié Isaza
 Ramón Alfonso Gallego Rendón

INVESTIGACIÓN

PROCESAMIENTO PARALELO EN FPGA PARA CONVOLUCIÓN DE IMÁGENES USANDO MATLAB **119**

Parallel processing on fpga for image convolution using Matlab

Diego Armando Giral Ramírez / Ricardo Romero Romero
Fernando Martínez Santa

REVISIÓN

TÉCNICAS DE CONTROL PARA EL BALANCE DE UN ROBOT BÍPEDO: UN ESTADO DEL ARTE **139**

Control techniques for the balance of a robot biped: a state of the art

Sergey González Mejía / José Miguel Ramírez Scarpetta
Edna Joydeth Avella Rodríguez

ESTUDIO DE CASOS

COMPUESTOS ORGÁNICOS PERSISTENTES EN COLOMBIA: CUANTIFICACIÓN Y DIAGNÓSTICO PARA PESTICIDAS ORGANOCLORADOS **163**

Persistent organic pollutants in colombia: quantification and diagnosis for organochlorine pesticides

César Augusto García Ubaque / Juan Carlos García Ubaque
Martha Lucía Vaca Bohórquez

ANEXOS

INSTRUCCIONES PARA LOS AUTORES **170**

SUSCRIPCIÓN **192**

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. Por ello 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 al 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 las normas de la revista. Las decisiones de los editores de aceptar o rechazar un documento para su publicación se basan únicamente en la relevancia del trabajo, la originalidad y la pertinencia 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 confluayan circunstancias graves.

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 a responder con rapidez a las quejas recibidas y a velar por 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 el 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 o los alumnos participantes, como colaboradores o sujetos de estudio en las investigaciones presentadas).

Seguimiento de malas prácticas

Tecnura asume su obligación de 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 solo rechazarán los manuscritos que planteen dudas sobre una posible mala conducta, sino que también 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 y se informará inmediatamente tanto a los lectores como a los sistemas de indexación.

Se consideran prácticas inadmisibles, y como tal se denunciarán, las siguientes: 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 los 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 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 o el propio equipo editorial.

Quejas/denuncias

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

Code of ethics and good practice

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

General duties and responsibilities of the editorial board

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

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

Relations with readers

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

Relations with authors

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

The journal includes a description of the process for peer evaluation of each received work, and has an authors guide with this information. The guide is regularly updated and contains a link to this code of ethics. The journal recognizes the right of authors to appeal editorial decisions

Publishers will not change their decision in accepting or rejecting articles, unless extraordinary circumstances or irregularities are detected. Any change in the editorial board members will not affect decisions already made, except for unusual cases where serious circumstances converge.

Relations with evaluators

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

Peer review process

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

Claims

Tecnura is committed to respond quickly to complaints and ensure that dissatisfied claimant can process all complaints. In any case, if applicants fail to satisfy their claims, the journal considers that they have the right to raise their protests to other instances.

Promoting Academic Integrity

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

Protection of individual data

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

Tracking malpractice

Tecnura accepts the obligation to act accordingly in case of suspected malpractice or misconduct. This obligation extends both to published and unpublished documents. The editors not only reject manuscripts with doubts about possible misconduct, but they are considered ethically obligated to report suspected cases of misconduct. From the journal every

reasonable effort is made to ensure that works submitted for evaluation are rigorous and ethically appropriate.

Integrity and academic rigour

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

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

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

Relations with owners and journal editors

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

Conflict of interest

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

Complaints / allegations

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

Uno de los indicadores que permite evidenciar la importancia de la investigación en cada país es cuánto se invierte en ella, en términos de su producto interno bruto (PIB) año a año. En países como Estados Unidos, Alemania o el Reino Unido, el porcentaje del PIB que se invierte para este rubro oscila entre 1,3 y 2,1%. En Japón, Corea y China se citan valores entre 0,8 y 1,1%, mientras que en nuestra región Brasil, en los últimos años, ha alcanzado valores cercanos al 1,0%. Es importante aclarar que en estos valores se encuentran incluidos los aportes del sector privado, u otros como defensa y seguridad, que contribuyen con un porcentaje aún más alto en algunas partes del mundo.

En Colombia, hasta 2009, el porcentaje del PIB destinado a investigación no superaba el 0,05%. En 2010, el Consejo Asesor de Regalías aprobó el Acuerdo 029 para financiar proyectos de inversión en Ciencia, Tecnología e Innovación (CTI) con recursos disponibles en el Fondo Nacional de Regalías. Esta nueva fuente de recursos para la investigación, que entró a operar en 2012, equivale, por mandato constitucional, al 10% de los recursos que el Estado recibe por la explotación de los recursos naturales no renovables, lo que ha permitido elevar significativamente los recursos disponibles para la investigación.

Este Fondo de Ciencia, Tecnología e Innovación del Sistema General del Regalías es independiente, tanto del Presupuesto General de la Nación como del Sistema General de Participación, no depende de Colciencias ni de ninguna otra entidad. Por el contrario, hace parte de un nuevo esquema en el que las decisiones de inversión son acordadas entre los gobiernos territoriales, los representantes de las universidades y el gobierno nacional mediante los órganos colegiados de administración y decisión (OCAD).

Su objetivo misional es aprovechar los ingresos derivados de la explotación de los recursos no renovables, que se encuentran en las regiones y que se irán agotando con el tiempo, para construir en las mismas regiones capacidades para el futuro y, de esta manera, impulsar un modelo de desarrollo basado en el conocimiento y la innovación, que garantice un crecimiento sostenible y que contribuya a la prosperidad de toda la población. Los recursos se deben distribuir entre todos los departamentos, sobre la base de los indicadores de necesidades básicas insatisfechas de su población y de desempleo, como lo establece el Acto Legislativo 05 de 2011.

Aunque los recursos del fondo permanecen en una cuenta administrada por el Ministerio de Hacienda y Crédito Público, una vez que los OCAD aprueban un programa o proyecto, los dineros deben ser transferidos al ejecutor del proyecto designado por el OCAD correspondiente. Los proyectos que pueden llegar a ser financiados por esta vía tienen varios condicionantes como:

- Todos los proyectos susceptibles de financiación deberán estar orientados al desarrollo regional y beneficiar a las entidades territoriales, tal como lo señala el artículo 28 de la Ley 1286 de 2009.
- Se financiarán proyectos de investigación básica aplicada y de desarrollo experimental, así como proyectos de innovación tecnológica y social.

- Se apoyará la creación y el fortalecimiento de unidades regionales de investigación, tales como centros de investigación y desarrollo tecnológico, parques científicos y tecnológicos, incubadoras de base tecnológica, entre otros.
- Se destinará una parte para los programas regionales de formación de talento humano a la investigación, la innovación y la gestión de la CTI.
- Colciencias, como entidad rectora del sector de CTI, será la encargada de viabilizar estos proyectos, previa presentación para aprobación por parte del Consejo Asesor de Regalías.

El acuerdo señala los criterios de viabilidad y elegibilidad, así como los requisitos mínimos que las entidades territoriales deben cumplir para presentar estos proyectos, los cuales deben incluir indicadores de investigación y desarrollo, innovación, formación y capacitación científica y tecnológica, así como servicios científicos y tecnológicos.

Este panorama ha abierto una nueva posibilidad para el desarrollo de capacidades de investigación en universidades y centros de desarrollo tecnológico en el país, pero implica que la investigación propenda a la búsqueda de soluciones a los problemas y las necesidades de las regiones y, por consiguiente, que tenga un alto contenido social. De manera concreta, las unidades y los grupos de investigación de nuestras facultades, en asocio con las unidades de extensión, tienen allí una posible fuente de financiación y recursos que deberá ser explorada mediante la búsqueda de alianzas estratégicas con entidades territoriales, ONG, minorías étnicas, para el mejoramiento de sus condiciones de calidad de vida.

No obstante, y en concordancia con ello, en el interior de nuestra universidad se deben generar las condiciones y los ajustes necesarios para hacer viable y funcional estas alianzas, en cuanto a la creación de un fondo de investigaciones que no dependa del presupuesto central de la universidad, la descentralización en la toma de algunas decisiones, los trámites y los procedimientos, la administración y el manejo de los recursos que ingresen por esta vía, además de la vigilancia y el control interno.

César Augusto García-Ubaque
Director

One of the indicators that allows for highlighting the importance of research in every country is the investment made in terms of their Gross Domestic Product (GDP) year after year. In countries such as the United States, Germany or the United Kingdom, the percentage of GDP invested to this area varies between 1.3 and 2.1 per cent; in Japan, Korea and China there are values between 0.8 and 1.1; while in our region Brazil has achieved values close to 1.0 per cent. It is important to clarify that those values are included among the contributions made by the private sector, or others such as defense and security, which contribute with an even higher percentage in some parts of the world.

In Colombia, up to 2009 the percentage of GDP destined to research did not exceed 0.05 per cent. In 2010, Consejo Asesor de Regalías approved Agreement 029 to fund research projects in Science, Technology and Innovation (CTI; initials in Spanish) with available resources in Fondo Nacional de Regalías. This new source of means for research that started its operations in 2012 is equivalent to, by constitutional command, ten per cent (10%) of the resources that the State receives from exploitation of non-renewable natural resources, which has allowed for increasing significantly the available resources for research.

This Fund for Science, Technology and Innovation from the Sistema General de Regalías is independent of the General State Budget, as well as from the General Participation System; and does not depend on COLCIENCIAS or any other institution. On the contrary, it is part of a new scheme in which decisions on investment are made between territorial governments, universities representatives and the National Government through the Órganos Colegiados de Administración y Decisión (OCAD).

Their missionary goal is to make the most of the incomes arising from the exploitation of non-renewable resources, found in the regions and that will be used up as time goes by, to build in those regions themselves capacities for the future and, in this way, encourage a model of development based in knowledge and innovation, which guarantees sustainable growing and contributes to the prosperity of the entire population. The resources are distributed between all the departments, based on the indicators of population dissatisfied basic needs and poverty, as established by the Legislative Act 05, 2011.

Although the resources from this Fund are kept in an account ran by the Ministerio de Hacienda y Crédito Público, once OCAD approves a program or project, the money must be transferred to the project executant appointed by the corresponding OCAD. The projects that can be funded through this means have several determining factors such as:

All projects subject to funding shall be oriented towards regional development and the strengthening of the territorial institutions, as well as it is noted in Article 28, Law 1286, 2009.

Basic applied research and experimental development projects shall be funded, as well as technological and social innovation projects.

Creation and strengthening of regional research units shall be supported, as well as research and technological development centers, science and technological parks, technology based incubators, among others.

Part of the regional programs for the formation of human talent shall be intended for research, innovation and management of CTI.

Colciencias, as rector entity of the CTI sector, shall be in charge of making viable these projects, previous presentation for approval by Consejo Asesor de Regalías.

The agreement points out the criteria for viability and eligibility, as well as the minimum requirements that territorial entities must accomplish in order to present these projects, which must include indicators of research and development, innovation, scientific and technological formation and training, and scientific and technological services.

This outlook has opened a new possibility for the development of research capacities in universities and technology development centers in the country, but it implies that research must be oriented to the search of solutions for the problems and necessities of the regions and, therefore, they can have a high social content. In a concrete way, the research units and groups in our faculties, associated to the extension units, have a possible source of funding and means that shall be explored through the search of strategic alliance with territorial entities, NGO's, ethnic minorities, for the improvement of their quality of life conditions.

However, and in correspondence with this, our University must generate the necessary conditions and adjustments to make viable and functional these alliances, regarding the creation of a research fund that does not depend on the university main budget, the decentralization in the decision-making processes, requests and procedures, administration and management of resources coming through this way, in addition to vigilance and internal control.

César Augusto García-Ubaque
Director

Metodología para evaluar la madurez de la gestión del conocimiento en algunas grandes empresas colombianas

Methodology for assessing the maturity of knowledge management in large companies some colombian

CARLOS MARIO DURANGO YEPES

Ingeniero químico, especialista en Asesoría y Consultoría de Organizaciones, magíster en Gestión Tecnológica, líder del Grupo de Investigación Goras, Fundación Universitaria Luis Amigó, Medellín, Colombia.

Contacto: carlosdster@gmail.com

MARTHA ELENA QUINTERO MUÑOZ

Economista agrícola, especialista en Gerencia del Desarrollo Social, magíster en Gestión Tecnológica, docente de la Fundación Universitaria Luis Amigó, Apartadó, Colombia. Contacto: mquintero0351@gmail.com

CARLOS ARTURO RUIZ GONZÁLEZ

Administrador de empresas, especialista en Gerencia Social, docente auxiliar de la Fundación Universitaria Luis Amigó, Centro Regional Manizales, Manizales, Colombia. Contacto: carlos.ruizgo@amigo.edu.co

Fecha de recepción: 5 de junio de 2013

Clasificación del artículo: investigación

Fecha de aceptación: 15 de agosto de 2013

Financiamiento: Fundación Universitaria Luis Amigó

DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.1.a01>

Palabras clave: análisis clúster, epistemologías funcionalista e interpretativa, madurez de la gestión del conocimiento.

Keywords: cluster analysis, functionalist and interpretive epistemologies, maturity of knowledge management.

RESUMEN

Este artículo propone una metodología para la evaluación de la madurez en la gestión del conocimiento (GC) en trece organizaciones colombianas, desde dos perspectivas epistemológicas: funcionalista e interpretativa, usando de manera

exploratoria el análisis clúster para la clasificación de madurez a través de cuatro dimensiones o áreas clave de la gestión del conocimiento (GC), y de todas y cada una de las empresas. Esto permite la medición del nivel de madurez de manera global por empresa y de forma independiente para cada una de las áreas clave, así como comparar las

empresas según los cinco niveles de la escala de madurez: inicial, conciencia, definido, gestionado y optimizado.

ABSTRACT

This paper proposes a methodology to assess maturity in Knowledge Management (KM) in thirteen Colombian organizations from two epistemologi-

cal perspectives: functionalist and interpretive; using Cluster Analysis in an exploratory manner to classify maturity through four dimensions or key areas of Knowledge Management (KM), in each one of the companies. Allowing the measurement of the maturity level for each company in a global way and independently for each of the key areas. Also, to compare companies according to the five levels in the maturity scale: initial, consciousness, defined, managed and optimized.

* * *

INTRODUCCIÓN

La mayoría de los modelos de madurez para la gestión del conocimiento actualmente en práctica, identifican áreas de proceso clave (o KPA en su sigla en inglés: *key process areas*) relacionadas con personas, procesos y tecnología. Estas KPA sugieren que la gestión del conocimiento necesita considerar aspectos organizacionales, humanos (por ejemplo, psicológicos y sociológicos) y tecnológicos con el objeto de apoyar de manera exitosa los procesos operativos de dicha gestión (Quintas, Lefrere y Jones, 1997). El área de proceso clave personas incluye aspectos relacionados con la cultura, estrategias y políticas de la organización; el área clave procesos se refiere a aspectos concernientes a los procesos de gestión de conocimiento (GC), tales como creación, recopilación, organización, transferencia y utilización del conocimiento (Durango, 2010); y el área de proceso clave tecnología, se relaciona con la infraestructura tecnológica de soporte a los procesos de GC, aplicaciones o servicios de GC y la actitud hacia las TI para la GC.

El modelo general de madurez de GC, o General Knowledge Management Maturity Model (GKMM en su sigla en inglés) (Pee, Teah y Kankanhalli, 2006), es un modelo descriptivo que describe los atributos esenciales que carac-

terizan una organización en un nivel particular de la madurez de la gestión del conocimiento. También es un modelo normativo en el que las prácticas principales caracterizan los tipos ideales de ambiente que deberían esperarse en una organización que esté implementando gestión del conocimiento. En una revisión sobre los fundamentos conceptuales y aspectos de investigación sobre sistemas de GC (Alavi y Leidner, 2001), los autores definen a las organizaciones como sistemas de conocimiento que tienen cuatro *procesos* de conocimiento: creación (referida como construcción), almacenamiento/recuperación, transferencia, y aplicación (Holsapple y Joshi, 2002; Pentland, 1995). Otros autores identificaron las principales actividades de manipulación del conocimiento: adquisición, selección, interiorización y utilización del conocimiento (Holzner y Marx, 1979) y examinaron los esfuerzos de GC basados en tecnologías de información (TI) en términos de tres procesos: crear, intercambiar y usar el conocimiento (Sabherwal y Sabherwal, 2005).

Para las organizaciones que han implementado alguna forma de GC, el Modelo General de Madurez de GC puede apoyar el desarrollo de la GC mediante el análisis sistemático de su nivel actual de madurez de la GC. El instrumento de evaluación proporcionado por este modelo pue-

de servir como una herramienta de diagnóstico, ubicando los aspectos que requieren mejora. Esto permite determinar las actividades esenciales y sus prioridades e indica cómo avanzar al siguiente nivel de madurez de GC. Además, puede servir de base para la comparación de las unidades dentro de una organización o entre organizaciones.

Debido al interés investigativo por conocer los avances y los retrocesos en los procesos de implementación de las prácticas de GC en grandes empresas de dos ciudades colombianas intermedias, Manizales y Apartadó, este artículo intenta responder a la pregunta ¿cómo medir el nivel de madurez de la gestión del conocimiento en trece grandes empresas colombianas desde la perspectiva funcionalista e interpretativa?

El texto está organizado de la siguiente manera: primero se desarrolla el concepto de madurez de la GC en el marco del modelo general de madurez; en segundo lugar se considera la madurez de la GC desde la perspectiva interpretativa; en tercer lugar se presenta la metodología; en cuarto lugar se muestran los resultados de medición de la madurez de GC en tres áreas funcionalistas y en el área interpretativa.

MODELO GENERAL DE MADUREZ PARA LA GESTIÓN DE CONOCIMIENTO (GC)

El primer modelo de madurez, denominado Capability Maturity Model (CMM), fue pensado y aplicado a los procesos de desarrollo de *software*; este describe e indica por cada uno de sus cinco niveles: inicial, repetible, definido, gerenciado y optimizado (Paulk, Curtis, Chrissis y Weber, 1993), cuáles son las características que marcan la evolución de estos procesos, así como las áreas clave en las que debe implementarse un conjunto de prácticas o focalizarse los cambios en aras de consolidar los mejoramientos. Con ello se definió

la estructura básica de los modelos de madurez, a saber: niveles, descripción o características de estos y áreas claves.

La literatura de gestión de conocimiento revela que al igual que el CMM, la mayoría de modelos de madurez de gestión de conocimiento (basados o no en CMM) identifican cinco niveles de madurez. El Modelo General de Madurez de GC propuesto adaptó cinco niveles de madurez de CMM llamados inicial, conciencia, definido, gestionado y de optimización. El nivel 2 fue renombrado por Pee et ál., de “Repetible” a “Conciencia”, considerando que “Repetible” es menos intuitivo en el contexto de la gestión de conocimiento y que dicho nivel está principalmente caracterizado por una conciencia de gestionar el conocimiento.

El modelo general de madurez de GC (o General Knowledge Management Maturity Model) es un modelo descriptivo, en el cual se describen los atributos esenciales que caracterizan una organización en un nivel particular de la madurez de la GC. También es un modelo normativo en el que las prácticas principales caracterizan los tipos ideales de ambiente que deberían esperarse en una organización que esté implementando GC.

De manera similar a la mayoría de modelos de madurez de GC basados o no en CMM, el Modelo General de Madurez de GC sigue una estructura por etapas y tiene tres componentes principales, llamados niveles de madurez, áreas de proceso clave o KPA y características comunes. Cada nivel de madurez está compuesto por diferentes KPA, y cada KPA está descrita por un conjunto de características comunes. Estas características especifican las principales prácticas que, cuando son direccionadas colectivamente, ayudan a lograr los objetivos de una KPA. Esta estructura se presenta en la tabla 1.

Tabla 1. Modelo de madurez de la gestión del conocimiento de corte funcionalista

Nivel de madurez		Descripción general	Áreas clave		
			Personas / organización	Procesos	Tecnología
1	Inicial	Poca o ninguna intención de usar el conocimiento	La organización no es consciente de la necesidad de GC	No existen procesos formales para capturar, compartir y reutilizar el conocimiento	Sin tecnologías o infraestructura de soporte u apoyo
2	Conciencia	La organización es consciente y tiene la intención de GC, posiblemente no sepa cómo	Los directivos están conscientes de la necesidad de GC	Se documentan los conocimientos indispensables para la realización de tareas repetitivas	Se han iniciado proyectos piloto de GC (no necesariamente por iniciativa de los directivos)
3	Definido	La organización ha puesto en marcha una infraestructura básica que soporta la GC	<ul style="list-style-type: none"> - Se proporciona formación básica sobre GC (por ejemplo: cursos de sensibilización) - Se pone en marcha una estrategia básica de GC - Se han definido roles individuales de GC - Se han activados los sistemas de incentivos 	<ul style="list-style-type: none"> - Se han formalizado los procesos para la gestión de contenidos e información. - Sistemas de medición pueden ser usados para medir el incremento de la productividad por causa de GC 	<ul style="list-style-type: none"> - Se tiene instalada una infraestructura básica de GC (páginas amarillas) - Se han puesto en marcha algunos proyectos de GC en algunos niveles de la pirámide organizacional
4	Gestionado / establecido	Las iniciativas de GC están plenamente establecidas en la organización	<ul style="list-style-type: none"> - Una estrategia común y que apunta a la normalización de la GC - La GC es incorporada dentro de la estrategia general de la organización - Formación avanzada en GC - Estándares organizacionales 	Medición cuantitativa de los procesos de GC (es decir, el uso de métricas)	<ul style="list-style-type: none"> - En toda la empresa los sistemas de GC están funcionando plenamente - El uso de los sistemas de GC está en un nivel razonable - Perfecta integración de la tecnología con la arquitectura de contenidos
5	Optimizar/ compartir	La GC está plenamente integrada a la organización y sometida a procesos de mejoramiento continuo	La cultura de compartir esta institucionalizada	<ul style="list-style-type: none"> - Los procesos de GC son revisados permanentemente y mejorados - Los actuales procesos de GC pueden ser fácilmente adaptados para satisfacer las nuevas necesidades de negocio - Los procedimientos de GC forman parte integral de la organización 	La infraestructura actual de GC es mejorada continuamente

Fuente: Pee, Teah y Kankanhalli (2006).

Con base en el concepto de organización como sistema de Trist (1981) se pudo llegar a la conclusión de que el subsistema técnico engloba dos de las áreas clave del modelo de madurez, los procesos y la tecnología, y que el subsistema social daría cuenta de la tercera: personas y organización. Sin embargo, de acuerdo con Kast y Rosenzweig (1988), al subsistema técnico y social se le debe agregar el administrativo, que planifica, coordina y controla los flujos de conocimiento en función de las actividades de la organización y su entorno, con el fin de crear unas competencias esenciales (Davenport, 1998).

En suma, el área clave *personas y organización* comprende la confianza, las habilidades *T-shaped*, los sistemas de incentivos, la estructura organizacional y la estrategia de GC, donde la confianza se define como la fe en las intenciones y comportamientos de otros y la organización; las habilidades *T-Shaped* como el grado de comprensión de las tareas propias y de los demás; el sistema de incentivos como las políticas y programas de recompensas económicas o simbólicas que motivan a los empleados a crear y compartir el conocimiento; la estructura organizacional como el grado de implantación y apego de reglas, procedimientos, políticas y estándares; y la estrategia como el foco de la GC hacia las tecnologías o las personas.

Con relación al área *procesos* de gestión del conocimiento, este trabajo adapta los siguientes conceptos, con base en las propuestas de los autores más representativos (Ruggles, 1997, 1998; Alavi y Leidner, 2001; Holsapple y Joshi, 2002; Sabherwal y Sabherwal, 2005; Lee y Lee, 2007; Zhao, 2010); son ellos:

- La creación de conocimiento es el desarrollo de nuevos conocimientos y procedimientos a partir de patrones, relaciones y significados en datos, información y conocimiento previo.
- La recopilación de conocimiento es la adquisición y el registro de los datos, información,

conocimiento en un medio del que se pueden recuperar posteriormente.

- Compartir conocimiento es intercambiar las mejores prácticas entre unidades de una misma organización o entre organizaciones, es dar acceso a las personas que deberían tener acceso a datos, información o conocimiento.
- El uso del conocimiento es llevar datos, información, conocimiento a la tarea que crea valor para una organización.

Finalmente, en el área de *tecnologías* para la GC, a medida que las organizaciones trabajan para desarrollar y mejorar su sistema de GC, este también cambia de un sistema cerrado, tal como un trabajo en grupo (*groupware*), o sistema de flujo de trabajo, a un sistema de intercambio de conocimiento en toda la empresa, con más tecnologías inteligentes y, finalmente, a un sistema de intercambio global (Lee y Kim, 2001).

Para entender las variables propias de esta área, se entenderá por *servicios de GC* a las aplicaciones que usa la empresa, tales como: procesamiento de textos, hojas de cálculo, *software* de presentación y correo electrónico; páginas amarillas; intranet; portal corporativo; bases de datos internas; *datawarehouse*; centros de datos (*datamarts*); *groupware*; *workflow*; lecciones aprendidas; inteligencia competitiva; simuladores; minería de datos; sistemas expertos; inteligencia artificial e inteligencia de negocios. Se entenderá por *infraestructura tecnológica*, la inversión en tecnologías de la información y la comunicación (TIC) que la organización aplica o tiene planificada para soportar las actividades de GC, tales como: instrumentos para la captura; creación y uso compartido de las mejores prácticas; creación de directorios de conocimiento corporativo; localizadores de expertos; páginas amarillas; sistemas de gestión de habilidades; creación de comunidades o redes de conocimiento. Finalmente, se define la *actitud hacia las TIC* como la disposición que tienen las personas de la organización hacia un

uso escéptico, conservador, vanguardista o innovador de las tecnologías que apoyan las iniciativas de GC.

MODELOS DE MADUREZ DE GESTIÓN DE CONOCIMIENTO (GC) INTERPRETATIVOS

Los modelos de madurez que se proponen desde esta perspectiva son de naturaleza evolutiva, es decir, comprenden una serie de etapas en las que el nivel de complejidad se incrementa de una a otra, en busca de la perfección. Se deben considerar como modelos de refuerzo que tienen condiciones operativas para maximizar satisfactoriamente los cambios en las organizaciones. Los modelos de madurez, en particular los de naturaleza evolutiva, se caracterizan por la presencia de escenarios óptimos múltiples, que se refieren normalmente a las etapas de desarrollo en el modelo de madurez.

Una propuesta de este tipo de modelos (Desouza, 2006) está conformada por cinco niveles o etapas para evaluar los esfuerzos en GC de la organización, cuya madurez puede describirse en una escala progresiva: predispuesta, reactiva, apreciativa, organizada y optimizada. Los dos componentes de administración del conocimiento que se asignan a la escala de madurez para este trabajo son: significados y acción, donde la gestión de los significados es la manera como se generan y se comparten los significados para el logro de las actividades de la organización, en tanto que la gestión de las actividades se refiere al uso de fuentes de información y de conocimiento que permitan la evaluación de las actividades organizacionales.

En el nivel más básico de este modelo de madurez, *el predispuesto*, la organización no tendrá una capacidad adecuada para responder o atender a la información proveniente de los entornos internos y externos. Algunas entidades en su interior se podrán especializar en escuchar y responder a la

información de los ambientes, pero estarán limitadas al nivel local.

En el nivel *reactivo*, la organización responde a la presión externa para mejorar la administración del conocimiento; por ejemplo, pone en marcha estrategias para atender y responder las señales en el dominio seleccionado. La organización aprende a manejar mejor la información procedente de las fuentes seleccionadas.

En el nivel *apreciativo* comienza a valorar la necesidad de entablar acuerdos interdisciplinarios y de análisis transversal para conseguir una mejor apreciación para las fuentes de información, los análisis utilizados para procesarla y los actos de significado y de gestión de la acción.

En el nivel *organizado* presenta una arquitectura organizada alrededor de la administración de los significados y la administración de la acción. La organización será capaz de llevar a cabo todas las actividades: percepción, disposición para actuar, respuesta guiada, mecanismos, respuestas complejas, adaptación y creación, lo que se puede atribuir a la presencia de una estructura holística de GC.

Finalmente, en el nivel *optimizado*, se observan similitudes entre los conceptos de personalidad y desarrollo de carácter en la gestión del conocimiento. Con el fin de operar este nivel, la organización se beneficiará de la apertura a la mejora continua y se apoyará en las prácticas y habilidades actuales de los diversos componentes de GC.

METODOLOGÍA

La medición de la madurez de la GC se realizó en trece empresas que cumplen con el criterio de selección: ser gran empresa y haber implementado iniciativas de GC desde hace por lo menos 5 años. La investigación es correlacional transversal multivariable de campo, para lo cual se utilizó un instru-

mento de recolección de la información ya validado en un trabajo previo realizado en siete grandes empresas en la ciudad de Medellín (Durango, 2010). Adicionalmente, se utilizó el análisis clúster para determinar los rangos de los cinco niveles de madurez, con miras a la clasificación de las empresas. Luego se construyó la base de datos en Excel, asignando un valor de uno a cinco a las cinco opciones de respuesta, uno correspondiente al nivel inicial de la escala de madurez, dos para conciencia, tres para definido, cuatro para gestionado y cinco para optimizado. Además, se promediaron las dieciocho respuestas por empresa, pertenecientes a los niveles operativo, administrativo y gerencial, correspondientes a seis áreas funcionales (tabla 2).

Posteriormente, se procedió a relativizar las variables propias de las cuatro áreas, asignando un valor de prioridad a cada una de ellas, el cual se multiplica por su calificación y se divide por la sumatoria de todas las ponderaciones en el interior de cada una de las dimensiones (Lema, 2002). El valor de prioridad asignado fue de 4 para el área procesos de GC, 3 para el área de tecnologías de apoyo a la GC, 2 al de organización y personas, y 1 a los aspectos interpretativos de la GC. Dicha relativización de las variables se realiza con el ánimo de hacerlas semicuantitativas, para que soporten cualquier análisis multivariado, ya que inicialmente provienen de una escala cualitativa tipo Likert (tabla 3).

Tabla 2. Tabulación de respuestas promedio por variable en cada empresa

Empresas	Organización y personas					Procesos				Tecnología			Interpretativo	
	Confianza	Habilidades	Sistemas e incentivos	Estructura	Estrategia	Creación	Recopilación	Compartir	Aplicación	Aplicaciones	Infraestructura	Actitud hacia las TIC	Gestión de significados	Gestión de la acción
1. Casa Luker	2,72	3,78	2,67	2,89	3,00	0,67	2,61	2,89	2,50	1,67	2,17	2,67	1,72	1,83
2. Davivienda	2,83	3,17	2,22	3,11	2,94	0,50	2,39	2,44	2,61	1,50	2,39	2,33	2,22	1,83
3. Cooperativa de Caficultores	3,56	3,50	2,33	2,11	3,17	0,72	2,61	2,61	2,44	1,39	2,33	2,06	1,28	1,89
4. Comfamiliares	3,17	3,56	1,28	1,83	1,89	0,61	2,67	2,44	2,61	1,56	2,22	2,28	1,06	1,22
5. Suministro de materiales técnicos	3,39	3,78	2,33	1,61	2,00	1,17	2,17	2,61	1,50	0,89	1,28	1,94	1,78	1,67
6. Empresa sector textil manufactura	4,11	3,94	2,22	2,33	2,06	0,89	2,67	2,67	1,72	0,72	2,94	2,83	1,39	2,78
7. Financiera X	3,44	4,00	2,28	1,72	2,50	0,83	2,28	2,61	1,83	1,56	1,67	1,72	0,61	1,83
8. Institución de educación superior	3,22	3,56	2,61	2,33	2,17	1,00	2,22	2,28	1,50	1,33	2,72	1,44	1,39	1,67
9. Telecomunicaciones	3,72	3,89	2,94	2,94	2,83	0,89	2,17	2,17	3,00	1,06	2,22	1,94	1,78	2,39
10. Financiera Z	3,28	3,56	2,61	2,33	2,22	1,50	2,44	2,28	1,50	1,33	2,56	1,44	1,17	1,78
11. Manufactura electrodomésticos	2,56	3,78	2,11	2,28	1,83	1,11	2,61	2,44	2,28	1,33	2,06	2,11	1,17	1,89
12. Corrugados Del Darién	3,61	4,00	2,50	1,67	2,33	0,28	2,94	2,89	2,67	1,39	2,06	2,67	1,50	1,67
13. C.I Banacol	3,11	3,44	2,06	1,46	3,00	3,28	2,94	4,17	3,33	2,33	3,17	3,72	3,28	3,11

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Variables semicuantitativas del modelo de madurez de GC

EMPRESAS	Organización y personas					Procesos				Tecnología			Interpretativo	
	Confianza	Habilidades	Sistemas e incentivos	Estructura	Estrategia	Creación	Recopilación	Compartir	Aplicación	Aplicaciones	Infraestructura	Actitud hacia las TIC	Gestión de significados	Gestión de la acción
Casa Luker	0,54	0,76	0,53	0,58	0,60	0,27	1,04	1,16	1,00	0,50	0,65	0,80	0,17	0,18
Davivienda	0,57	0,63	0,44	0,62	0,62	0,20	0,96	0,98	1,04	0,45	0,72	0,70	0,22	0,18
Cooperativa de Caficultores	0,71	0,70	0,47	0,42	0,63	0,29	1,04	1,04	0,98	0,42	0,70	0,62	0,13	0,19
Comfamiliares	0,63	0,71	0,26	0,37	0,38	0,24	1,07	0,98	1,04	0,47	0,67	0,68	0,11	0,12
Suministro de materiales técnicos	0,68	0,76	0,47	0,32	0,40	0,47	0,87	1,04	0,60	0,27	0,38	0,58	0,18	0,17
Empresa sector textil manufactura	0,82	0,79	0,44	0,47	0,41	0,36	1,07	1,07	0,69	0,22	0,88	0,85	0,14	0,28
Financiera x	0,69	0,80	0,46	0,34	0,50	0,33	0,91	1,04	0,73	0,47	0,50	0,52	0,06	0,18
Institución de educación superior	0,64	0,71	0,52	0,47	0,43	0,40	0,89	0,91	0,60	0,40	0,82	0,43	0,14	0,17
Telecomunicaciones	0,74	0,78	0,56	0,59	0,57	0,36	1,24	0,87	1,20	0,32	0,67	0,58	0,18	0,24
Financiera Z	0,66	0,71	0,52	0,47	0,44	0,47	0,98	0,91	0,60	0,40	0,77	0,43	0,14	0,18
Manufactura electrodomésticos	0,51	0,76	0,46	0,46	0,37	0,44	1,04	0,98	0,91	0,40	0,62	0,63	0,12	0,19
Corrugados del Darién	0,72	0,80	0,50	0,33	0,47	0,11	1,18	1,16	1,07	4,17	6,17	8,00	1,50	1,67
C.I Banacol	0,62	0,69	0,41	0,29	0,60	0,66	0,59	0,83	2,80	0,47	0,63	3,60	0,66	4,20

Fuente: elaboración propia.

Con las variables relativizadas se construye, por cada una de las empresas y en función de cada una de las cuatro dimensiones, el índice de valor de importancia relativizado (IVIR); un indicador adimensional que muestra el grado de importancia estadística que tiene un dato en un grupo o contexto, según la totalidad de las características de las variables estudiadas (Lema, 2002).

Para calcular el IVIR se suman los valores de las variables pertenecientes a cada una de las dimensiones por cada una de las empresas, y de este modo se construye el índice de valor de importancia (IVI). Luego se le asigna un peso a cada una de las dimensiones, los cuales se multiplican por su correspondiente IVI, se suman los resultados y se dividen entre la sumatoria de las ponderaciones (tabla 4).

Tabla 4. IVI e IVIR de cada una de las empresas

Empresas	IVI				IVIR
	Organización y Personas	Procesos	Tecnología	Interpretativo	
1. Casa Luker	3,01	3,47	1,95	0,36	2,61
2. Davivienda	2,86	3,18	1,87	0,41	2,44
3. Coop. Caficultores Manizales	2,93	3,36	1,73	0,32	2,48
4. Comfamiliares	2,34	3,33	1,82	0,23	2,37
5. Suministro materiales técnicos	2,62	2,98	1,23	0,34	2,12
6. Empresa sector textil manufactura	2,93	3,18	1,95	0,42	2,48
7. Financiera X	2,79	3,02	1,48	0,24	2,24
8. Institución de educación superior	2,78	2,80	1,65	0,31	2,20
9. Telecomunicaciones	3,23	3,67	1,57	0,42	2,63
10. Financiera Z	2,80	2,96	1,60	0,32	2,25
11. Manufactura	2,51	3,38	1,65	0,31	2,38
12. Corrugados del Darién	2,82	3,51	18,33	3,17	7,79
13. C.I Banacol	2,62	4,88	4,70	4,86	4,37

Fuente: elaboración propia.

Este procedimiento se deja en este punto, para dar inicio al análisis clúster que busca clasificar las observaciones de acuerdo con su grado de homogeneidad e identificar los rangos de los cinco niveles de la escala de madurez. Para ello se aplicó la técnica no jerárquica *K-means*, que resulta pertinente cuando se conoce de antemano el número de grupos o conglomerados. En este caso se usó la versión 20 del SPSS, agrupando las observaciones en cuatro conglomerados, porque se asume que ninguna de las empresas se encuentra en un nivel inicial, dado que el estudio se realizó con aquellas que han implementado iniciativas de GC por lo menos con 5 años de antigüedad.

La técnica *K-means* se aplica de manera independiente a cada una de las dimensiones y a sus respectivas variables, asumiendo que las empresas no tienen un nivel de madurez homogéneo. En ocasiones, algunas tienen fortalezas en procesos, pero pueden presentar debilidades en tecnologías o en otras áreas, y viceversa.

Consecutivamente, se suman los valores que arroja el análisis clúster de las variables de cada dimensión, para generar el IVI de cada uno de los cuatro conglomerados (ver tabla 5), el cual se utiliza para clasificarlos de menor a mayor en conciencia, definido, gestionado y optimizado.

Tabla 5. IVI de los conglomerados por cada una de las dimensiones del modelo de madurez de GC

Dimensión	Conglomerados			
	Clúster 1	Clúster 2	Clúster 3	Clúster 4
Organización y personas	2,82	2,8	3,06	2,43
Procesos	3,51	3,02	3,50	3,36
Tecnología	18,33	1,63	1,75	1,73
Interpretativa	3,17	0,34	0,36	0,27

Fuente: elaboración propia.

Lo anterior sirve de base para estimar los rangos de los cinco niveles de la escala de madurez (ver tabla 6) y determinar en cuál se encuentran las empresas, al ubicar en alguno de ellos el IVI de las cuatro dimensiones.

Si a la tabla 5 se le ponen los pesos dados en la relativización de las variables se obtiene la tabla 7.

Con base en la tabla 7 se puede calcular el IVIR conglomerado para cada área clave, sumando el producto de los IVI de cada área por su respectivo

peso y dividiendo entre la suma de los pesos, o sea entre 10. Así se obtienen los valores de la tabla 8.

La tabla 9 se obtiene a partir de la tabla 8, ordenando los cuatro IVIR conglomerados en cinco rangos o niveles de madurez.

Seguidamente, comparando los IVIR obtenidos para cada empresa en la tabla 4 y ubicándolas en los cinco rangos de madurez definidos en la tabla 9, se determina la ubicación de cada empresa en cada nivel de madurez (tabla 10).

Tabla 6. Rangos de los niveles de madurez por cada una de las dimensiones del modelo de madurez de gestión de conocimiento

Áreas clave	Inicial	Consciencia	Definido	Gestionado	Optimizado
Organización y Personas	$0 \leq n < 2,43$	$2,43 \geq n < 2,8$	$2,8 \geq n < 2,82$	$2,82 \geq n < 3,06$	$n \geq 3,06$
Procesos	$0 \leq n < 3,02$	$3,02 \geq n < 3,36$	$3,36 \geq n < 3,50$	$3,50 \geq n < 3,51$	$n \geq 3,51$
Tecnología	$0 \leq n < 1,63$	$1,63 \geq n < 1,73$	$1,73 \geq n < 1,75$	$1,75 \geq n < 18,33$	$n \geq 18,33$
Interpretativo	$0 \leq n < 0,27$	$0,27 \geq n < 0,34$	$0,34 \geq n < 0,36$	$0,36 \geq n < 3,17$	$n \geq 3,17$

Fuente: elaboración propia.

Tabla 7. IVI de los conglomerados con sus pesos relativos

Áreas clave	IVI conglomerados				
	Peso	Clúster 1	Clúster 2	Clúster 3	Clúster 4
Organización y Personas	2	2,82	2,80	3,06	2,43
Procesos	4	3,51	3,02	3,50	3,36
Tecnología	3	18,33	1,63	1,75	1,73
Interpretativo	1	3,17	0,34	0,36	0,27
	10				

Fuente: elaboración propia.

Tabla 8. IVIR conglomerado

Áreas clave	IVIR conglomerado
Organización y Personas	2,22
Procesos	5,35
Tecnología	7,03
Interpretativo	0,41

Fuente: elaboración propia.

Tabla 9. Construcción de los rangos de madurez por áreas clave para cada nivel de madurez

Nivel de madurez	Rango de madurez
Inicial	$0 \leq n < 0,41$
Consciencia	$0,41 \geq n < 2,22$
Definido	$2,22 \geq n < 5,35$
Gestionado	$5,35 \geq n < 7,03$
Optimizado	$n \geq 7,03$

Fuente: elaboración propia.

Finalmente, la posición de cada empresa en cada área clave (tabla 11) se logra si se ubican los IVI resultantes de la tabla 4 en los rangos de los niveles de madurez por cada área clave obtenidos en la tabla 6.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Área clave Organización y Personas

La única empresa que se encuentra en el nivel inicial en esta área es la número 4: Comfamiliares, lo que de acuerdo con el Modelo General de GC significa que no es aun consciente de la necesidad de GC. Ubicadas en el nivel de madurez *consciente* están cinco empresas, que representan, el 38,5% de la población objeto de estudio, correspondiente a dos empresas comercializadoras, una entidad financiera X, una institución de educación superior y

una empresa de manufactura. Los directivos están conscientes de la necesidad de GC. Por otra parte, está otra institución financiera (denominada Z, por reserva de su nombre), así como Corrugados del Darién — clasificadas en el nivel de madurez *definido*—, donde se llevan a cabo acciones de sensibilización en GC, se pone en marcha una estrategia básica de GC, se han definido roles individuales de GC o se han activado sistemas de incentivos. Cuatro empresas se ubican en el nivel de madurez *gestionado*, estas son: Casa Luker, Davivienda, Cooperativa de Caficultores de Manizales y una empresa del sector textil, donde la GC es incorporada dentro de la estrategia general de la organización, es evaluada en los estándares organizacionales y hay una formación avanzada en el tema. La empresa mejor ubicada, en el nivel de madurez *optimizado*, es de telecomunicaciones, ubicada en Medellín, donde la cultura de compartir el conocimiento esta institucionalizada.

Tabla 10. Ubicación de cada empresa en cada nivel de madurez

Nivel de madurez	Empresa
Inicial	
Conciencia	5, 8
Definido	1, 2, 3, 4, 6, 7, 9, 10, 11
Gestionado	13
Optimizado	12

Fuente: elaboración propia.

Tabla 11. Ubicación de cada empresa según área clave

Áreas clave	Nivel de madurez				
	Inicial	Conciencia	Definido	Gestionado	Optimizado
Organización y Personas	4	5, 7, 8, 11, 13	10, 12	1, 2, 3, 6	9
Procesos	5, 8, 10	2, 4, 6, 7	1, 3, 11,		9, 12, 13
Tecnología	5, 7, 9, 10	8,11	3	1, 2, 4, 6, 13	12
Interpretativo	4, 7	3, 8, 10, 11	5	1, 2, 6, 9	12, 13

Fuente: elaboración propia.

Área de Procesos de gestión de conocimiento y tecnología

En el caso de las empresas número 5 (distribución comercial), número 8 (institución de educación superior) y número 10 (Financiera Z), los hallazgos hechos de acuerdo con la información suministrada permiten categorizarlas en un estado de madurez inicial con relación a los procesos de creación, recopilación, organización, transferencia y aplicación del conocimiento, de la siguiente manera:

- Las personas desarrollan nuevos conocimientos sin que la organización defina en esta materia reglas, procedimientos, políticas y estándares.
- No existen procesos formales para identificar, adquirir y registrar los datos, la información y el conocimiento.
- No hay estructura formal para clasificar el conocimiento.
- El intercambio, la exteriorización, la interiorización de conocimiento y la formación son actividades individuales.

El conocimiento es utilizado solo por el individuo para llevar a cabo una actividad basada en conocimiento. El conocimiento que se produce, por lo general, no está disponible para otras personas.

Las empresas número 5 (distribución comercial) y número 10 (Financiera Z) también se ubican en la categoría *inicial* con relación a los *aspectos tecnológicos* que apoyan los procesos de GC, compartiendo esta ubicación con las empresas número 7 (Financiera X) y número 9 (telecomunicaciones). Las características de una organización en dicho estado muestran las siguientes condiciones en su infraestructura tecnológica, en sus prácticas de GC y en su actitud hacia las TIC:

- La organización no cuenta con TIC para llevar a cabo actividades de GC y la existente no se usa para este propósito.
- Las aplicaciones de GC usan procesamiento de textos, hojas de cálculo, *software* de presentación y correo electrónico.

LAS PERSONAS SON ESCÉPTICAS, SIN CONOCIMIENTO BÁSICO DE LAS TI

En la categoría *conciencia* o repetible del modelo de madurez para el área de procesos de GC, se encuentran las empresas número 2 (Davivienda), número 4 (Comfamiliares), número 6 (empresa del sector textil manufactura) y número 7 (Financiera X). Lo cual puede significar lo siguiente:

- Las personas desarrollan nuevos conocimientos y documentan lo que es indispensable para la realización de sus tareas.
- Se documentan los conocimientos indispensables para la realización de tareas repetitivas.
- Se investiga qué procesos se tienen y se requieren para clasificar el conocimiento y la información.
- La organización le da importancia a los diversos mecanismos para compartir y difundir conocimientos, pero aún no ha elaborado un plan de transferencia.

En esta misma categoría (*conciencia*) del modelo de madurez, pero para el área de tecnología, se encuentra las empresas número 8 (institución de educación superior) y número 11 (manufactura). Lo cual puede interpretarse de la siguiente manera:

- En algunas áreas de la organización se usan las TIC existentes para iniciativas o proyectos piloto de GC.
- Las páginas amarillas e intranets son las aplicaciones propias de GC.

investigación |

- En su actitud hacia las TIC son conservadores, con conocimiento básico de la TI, o en periodo de aprendizaje o entrenamiento inicial.

Las empresas número 1 (Casa Luker), número 3 (Cooperativa de Caficultores de Manizales) y número 11 (Manufactura) comparten el nivel definido en el área de procesos. Para el área procesos ubicarse en este nivel puede interpretarse de la siguiente manera:

- Las personas desarrollan nuevos conocimientos mediante métodos y estrategias definidas por la organización.
- Se han formalizado los procesos para la gestión de contenidos y de la información.
- Se selecciona el conocimiento que se posee en los procesos que se van a trabajar según su importancia y aplicación.
- La organización implementa un plan para la transferencia de conocimientos.
- El conocimiento es usado por el equipo de tomadores de decisión mediante el uso del conocimiento individual.

Adicionalmente, la empresa número 3 (Cooperativa de Caficultores de Manizales) se encuentra en este mismo nivel en la dimensión tecnología. Para el área tecnología, ubicarse en el nivel definido puede interpretarse de la siguiente manera:

- La organización tiene una infraestructura básica de GC que puede ser accedida a través de la intranet o portal corporativo.
- Bases de datos internas, almacenes normalizados (*data warehouse*, centros de datos (*data marts*), *group ware*, *work flow*).
- Adoptadores tempranos, con un nivel medio de conocimiento o dominio de TI en las actividades de GC

La única empresa que se encuentra en el nivel gestionado en el área de tecnología es C. I. Banacol, lo cual se puede interpretar de la siguiente manera:

- Medición cuantitativa de los procesos de GC (es decir, el uso de métricas).
- En toda la empresa las aplicaciones de GC están perfectamente integrados a los procesos de negocio de la empresa.
- Transferencia interna de conocimiento, venta de conocimiento, lecciones aprendidas, inteligencia competitiva.
- Promotores, con un nivel medio y fuerte de conocimiento o dominio de TI en las actividades de GC en toda la organización.

Las únicas empresas en el nivel de madurez *optimizado* para el área de *procesos* de GC es la empresa número 9 (telecomunicaciones), la número 12 (Corrugados del Darién) y la número 13 (C. I. Banacol), lo cual puede ser interpretado de la siguiente manera:

- Las personas desarrollan nuevos conocimientos respondiendo a las demandas del entorno, y la organización mejora permanentemente los métodos y estrategias para el desarrollo de nuevos conocimientos.
- Retroalimentación y planes de mejoramiento a los procesos de identificación, adquisición y selección del conocimiento.
- Se reestructura la clasificación de los activos de conocimiento que se ha optimizado.
- El proceso de transferencia de conocimiento es constantemente revisado y mejorado, y puede adaptarse fácilmente a las nuevas necesidades del negocio.
- El proceso de aplicación del conocimiento a sus actividades misionales es constantemente revisado y mejorado

Adicionalmente, la empresa número 12 (Corrugados del Darién) se ubica en el nivel optimizado en el área tecnología. Esta ubicación podría ser interpretada de la siguiente manera:

- La infraestructura tecnológica para las aplicaciones de GC integrada a los procesos de negocio se mejora continuamente.
- Las aplicaciones de GC usan sistemas expertos, inteligencia artificial o la inteligencia de negocios.
- La actitud hacia las TIC los caracteriza como innovadores, con conocimientos avanzados de la TI y sus aplicaciones actuales y potenciales.

Área interpretativa de la gestión de conocimiento

Desde el enfoque interpretativo se asume que el conocimiento es una construcción de la experiencia humana y de las prácticas sociales de conocimiento, por lo cual, en esta se ahonda en aspectos subjetivos e intersubjetivos de las personas o sujetos que hacen parte de las organizaciones.

Las empresas número 4 (Comfamiliares) y número 7 (Financiera X) se encuentran en el nivel inicial del enfoque interpretativo, lo cual puede evidenciar lo siguiente:

- Los individuos crean significados pero estos son incompletos y rara vez son compartidos de forma efectiva.
- Habrá un vacío en la generación y la aplicación de conocimiento, cuyo resultado serán acciones poco calibradas.
- Las acciones se derivan de los palpitos individuales, y no hay retroalimentación ni la posibilidad de monitorear su efectividad.

Las empresas número 3 (Cooperativa de Caficultores de Manizales), número 8 (institución de educación superior), número 10 (Financiera Z)

y número 11 (manufactura) se encuentran en el nivel de conciencia del enfoque interpretativo, lo cual puede evidenciar que:

- Los significados son compartidos dentro de los centros y emerge un lenguaje común.
- Los significados son también intercambiados, comparados, debatidos (retroalimentación), buscando mejorar las métricas que anteceden y se requieren para las acciones.
- La gestión de la retroalimentación de las acciones será restringida en estos centros.
- Las acciones calibradas dentro de los centros se basan en los significados, lo cual aumenta sus niveles de eficiencia y flexibilidad.

La empresa número 5 (Suministro de Materiales Técnicos) se encuentra en el nivel definido, lo cual puede tener la siguiente significancia:

- Los significados son compartidos en las funciones de la organización.
- Este proceso demanda traductores para llegar a acuerdos en la sintaxis y la terminología.
- En los centros se comienza a incorporar experiencias externas en las prácticas de trabajo. Los centros en alianza ejecutan acciones más comprensivas y obtienen retroalimentación de sus acciones más allá del contexto (desde afuera de los centros).
- Ello repercute en la eficiencia y genera cambios en aras de mayor efectividad

Las empresas número 1 (Casa Luker), número 2 (Davivienda) y número 6 (empresa sector textil) se encuentran en el nivel gestionado del enfoque interpretativo, lo cual tiene la siguiente significancia en la GC para estas organizaciones:

- Los significados basados en lo analítico son profundos y se comparten con los miembros de la organización.

investigación |

- La organización gestiona la diversidad en los lenguajes organizacionales, al tiempo que promueve diálogos basados en significados.
- La organización diseña acciones únicas basadas en nuevos significados.
- Se habilita un repositorio de nuevas acciones, facilitando la reutilización del conocimiento existente.
- La retroalimentación es efectiva y ayuda a la organización a la evaluación de sus acciones.

Las empresas número 12 (Corrugados del Darién) y número 13 (C. I. Banacol), se encuentran en el nivel optimizado del enfoque interpretativo, lo cual tiene la siguiente significancia para ambas organizaciones:

- Se habilitan mecanismos para revisar constantemente los significados generados.
- Existe el compromiso de entrenar a los individuos para que conserven sus habilidades, así como el compromiso de mantener mecanismos compatibles y eficientes.
- Las acciones son revisadas periódicamente; las operaciones de la organización se mantienen al día.
- Las métricas para la evaluación de las acciones son mejoradas continuamente, buscando que sea en tiempo real.
- La organización cuenta con repositorio de acciones que es preciso seguir, el cual es actualizado regularmente.

CONCLUSIONES

- El modelo de madurez de la GC es sistemático y apropiado para la evaluación de las áreas clave, lo cual permite mostrar los resultados de la medición del nivel de madurez de manera global o de forma independiente para

cada una de las áreas clave. Esto asimismo hace posible precisar que la empresa Corrugados del Darién, seguida de la empresa de telecomunicaciones y de C. I. Banacol son las que están mejor ubicadas en las cuatro áreas de GC consideradas.

- Esta metodología proporciona un algoritmo de cálculo que permite semicuantitativizar variables cualitativas provenientes de una escala Likert, y obtener en cada clúster definido previamente, el índice de valor de importancia (IVI), al igual que el valor global del IVI (o sea el IVIR) para las cuatro dimensiones y para cada empresa objeto del estudio. Este algoritmo es similar al propuesto en el Modelo Navegador del Conocimiento (KNM, en su sigla en inglés).
- Los datos cualitativos analizados y utilizados para la construcción de un modelo exploratorio son significativos, ya que se obtienen de los niveles operativo, administrativo y gerencial, que desde hace cinco o más años han implementado prácticas relacionadas con la GC.
- El instrumento en su conjunto está diseñado para posicionarse como un instrumento de autoevaluación fácilmente entendible, que posteriormente pueda ser puesto en línea para su comparabilidad con empresas que se configuren como de talla mundial.

TRABAJOS FUTUROS

Luego de diseñado el modelo y aplicado en una versión preliminar, como parte de una segunda fase de la investigación, se está realizando durante el 2013 el mismo trabajo, pero ampliando la muestra a por lo menos 30 empresas, para proponer posteriormente un modelo exploratorio propiamente dicho para grandes empresas colombianas. Posteriormente, se trabajará la relación madurez de GC e innovación en productos académicos universitarios.

FINANCIAMIENTO

Este artículo es producto de la investigación *Madurez de la gestión del conocimiento en grandes*

empresas del país, realizada en 2012, la cual ha sido avalada y financiada como proyecto de mediana cuantía por la Funlam.

REFERENCIAS

- Alavi, M. y Leidner, D. E. (2001). Review: Knowledge Management and Knowledge Management Systems: Conceptual Foundations and Research Issues. *MIS Quarterly*, 25 (1), 107-136.
- Bloom, B., Englehart, M., Furst, E., Hill, W. y Krathwohl, D. (1956). Taxonomy of Educational Objectives: The Classification of Educational Goals. En: *Handbook I: Cognitive domain*. Nueva York, Toronto: Longmans, Green.
- Davenport, T. y Grover, V. (2001). Special Issue: Knowledge Management. *Journal of Management Information Systems*, 31 (7), 7-10.
- Davenport, T. y Prusak, L. (1998). *Working Knowledge: How Organizations Manage what they Know*. Estados Unidos: Harvard Business School Press.
- Desouza, K. (2006). *Knowledge Management Maturity Model: Theoretical Development and Preliminary Empirical Testing* (tesis doctoral). University of Illinois at Chicago.
- Durango, C. (2010). *Construcción de una herramienta para el diagnóstico de la madurez de los procesos de gestión de conocimiento*. Informe avance Funlam, junio de 2010. Documento inédito.
- Durango, C. y Arias, J. (2010). Madurez de los procesos y tecnologías de gestión del conocimiento en empresas industriales de Antioquia. En *Memorias Acacia 2012*, Atizapán, México.
- Holsapple, C. W. y Joshi, K. D. (2002). Knowledge Manipulation Activities: Results of a Delphi study. *Information & Management*, 39 (6), 477-490
- Holzner, B. y Marx, J. (1979). *Knowledge Application: The Knowledge System in Society*. Boston: Allyn & Bacon.
- Hsieh, P. J., Lin, B. y Lin, C. (2009). The Construction and Application of Knowledge Navigator Model (KNM TM): An Evaluation of Knowledge Management Maturity. *Expert Systems with Applications: An International Journal*, 36 (2), 4087-4100.
- Kast, F. y Rosenzweig, J. (1988). *Administración en las organizaciones. Enfoque de sistemas y de contingencias*. México: McGraw-Hill/ Interamericana de México.
- Lee, Y. y Lee, S. (2007). Capabilities, Processes, and Performance of Knowledge Management: A Structural Approach. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing*, 17 (1) 21-41.
- Lee, J. y Kim, Y. (2001). A Stage Model of Organizational Knowledge Management: A Latent Content Analysis. *Expert Systems with Application*, 20 (4), 299-311.

- Lema, A. (2002). *Elementos de estadística multivariada*. Medellín: Silvano.
- Nonaka, I. (1991). The Knowledge Creating Company. *Harvard Business Review*, 69 (6), 96-104.
- Paulk, M., Curtis, B., Chrissis, M. y Weber, C. (1993). *Capability Maturity Model for Software*, Version 1.1. Technical Report CMU/SEI-93-TR-024. Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University.
- Pee, L., Teah, H. y Kankanhalli, A. (2006). Development of a General Knowledge Management Maturity Model. Ponencia presentada en Korean Knowledge Management Society Conference (pp. 17-18), Seúl, Corea del Sur.
- Pentland, B. T. (1995), Grammatical Models of Organizational Processes. *Organization Science*, 6, 541-556.
- Quintas, P., Lefrere P. y Jones, G. (1997). Knowledge Management: A Strategic Agenda. *Long Range Planning*, 30, 385-391.
- Ramaprasad, A. y Ambrose, P. (1999). The Semiotics of Knowledge Management. *Proceedings*, WITS, Charlotte, NC.
- Ruggles, R. (1997). *Knowledge Tools: Using Technology to Manage Knowledge Better*. Recuperado de <http://www.businessinnovation.ey.com/mko/html/toolsrr.html>
- Ruggles, R. (1998). The State of the Notion: Knowledge Management in Practice. *California Management Review*, 40 (3), 80-89.
- Saussure, F (1916). *Course in General Linguistics*. Nueva York: McGraw-Hill Book Company.
- Sabherwal, R. y Sabherwal, S. (2005). Knowledge Management Using Information Technology: Determinants of Short-Term Impact on Firm Value. *Decision Sciences*, 36 (4), 531-567.
- Trist, E. (1981). *The Evolution of Socio-Technical Systems*. Toronto, Ontario: Quality of Working Life Centre.
- Zhao, J. (2010). School Knowledge Management Framework and Strategies: The New Perspective on Teacher Professional Development. *Computers in Human Behavior*, 26, 168-175.

Durabilidad y acústica del concreto con escoria de cubilote como reemplazo del agregado fino

Durability and acoustics of concrete with slag of cupola furnace as fine aggregate replacement

RICARDO ALFREDO CRUZ HERNÁNDEZ

Ingeniero civil, doctor en Ciencias Técnicas, profesor de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Director del Grupo de Investigación en Estructuras y Materiales de Construcción, Colombia. Contacto: racruz@uis.edu.co

CARLOS MAURICIO PICO CORTÉS

Ingeniero civil, especialista en Análisis y Diseño de Estructuras, investigador de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Contacto: carlos.pico1@correo.uis.edu.co

LUDWING PÉREZ BUSTOS

Ingeniero civil, magíster en Ingeniería Civil, investigador de la Universidad Industrial de Santander, docente de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Contacto: jupebu26@hotmail.com

Fecha de recepción: 18 de julio de 2013

Clasificación del artículo: investigación

Fecha de aceptación: 30 de abril de 2014

Financiamiento: Vicerrectoría de Investigación y Extensión, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga

DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.1.a02>

Palabras clave: agregado fino de escoria, carbonatación, coeficiente de absorción acústica, reacción álcali-agregado, sulfatación.

Keywords: Alkali-aggregate reactions, carbonation, slag as fine aggregate, sound absorption coefficient, sulfation.

RESUMEN

En este trabajo se evaluó el comportamiento del concreto con escoria de horno de cubilote (EHC), triturada en porcentajes de sustitución de arena del 0, 10, 15 y 20%, sometido a ataques químicos acelerados de carbonatación, sulfatación y reac-

ción álcali-agregado (RAA). Se determinaron las características de absorción del sonido del material a través del coeficiente de absorción acústica (α) y el índice de reducción de ruido (NRC). La carbonatación se evaluó por medio de una cámara cerrada con 70% de concentración de dióxido de carbono y condiciones de humedad relativa entre

50 y 70%. Los resultados mostraron que la profundidad de penetración de CO_2 es menor mientras mayor es el porcentaje de sustitución. Para acelerar el ataque por sulfatos, se sumergieron probetas en solución acuosa de sulfato de sodio anhidro (Na_2SO_4) 1N con ciclos de humedecimiento y secado. Se determinó que el deterioro presentado en la pasta de concreto es directamente proporcional al porcentaje de sustitución. La aceleración de la RAA en el concreto se realizó sumergiendo probetas en una solución acuosa de hidróxido de sodio (NaOH) durante dieciséis días. Se concluyó que la inclusión de EHC no es favorable por RAA. La medición del coeficiente de absorción acústica se realizó a través del método de tubo de impedancia, relacionando valores máximos y mínimos de amplitud de onda estacionaria. Los resultados mostraron que concretos de EHC con mayores sustituciones de arena por escoria son favorables para la absorción de ruidos en las edificaciones.

ABSTRACT

In this paper, it was evaluated the performance of concrete with crushed slag of cupola furnace (SCF) as sand replacement in percentages of 0%,

* * *

INTRODUCCIÓN

La tecnología de materiales avanza constantemente en la búsqueda de estructuras cada vez más durables y confortables. Nuevas exigencias ambientales y tendencias comerciales vienen motivando, entre otras, a la industria del concreto a disminuir su impacto, reduciendo la emisión de CO_2 y el consumo de materia prima natural (Anastasiou, Georgiadis y Stefanidou, 2014). La tendencia actual es el uso de materiales alternativos en la fabricación de concreto, por la ventaja económica que esto puede representar, además

10%, 15% and 20%, subjected to accelerated chemical attacks of carbonation, sulfation and alkali-aggregate reaction (AAR). The sound absorption characteristics of the material were determined through the sound absorption coefficient (α), and the noise reduction coefficient (NRC). Carbonation was evaluated through a closed camera with the 70% concentration of carbon dioxide and conditions of relative humidity between 50% and 70%. The results indicated that the penetration depth of CO_2 is lower when greater the percentage of substitution is. To accelerate the attack by sulfates, specimens were immersed in aqueous solution of sodium sulfate anhydrous (Na_2SO_4) 1N with cycles of wetting and drying. It determined that the impairment presented in concrete paste is directly proportional to the percentage of sand replacement. The acceleration of the AAR in the concrete was carried out by immersing specimens in an aqueous solution of sodium hydroxide (NaOH) for 16 days. The test concluded that the inclusion of SCF is not favorable for AAR. The measurement of sound absorption coefficient was taken by the method of impedance tube, relating minimum and maximum values of stationary wave amplitude. The results showed that SCF with higher sand replacement are favorable for the noise absorption in buildings.

del mejoramiento de algunas de sus propiedades. Se ha incrementado la durabilidad del concreto utilizando cenizas volantes (Blissett y Rowson, 2012) y escorias, sin detrimento de su resistencia. Incluso, se han obtenido mejores propiedades en comparación con concretos con cemento Portland (Mohammed y Pofale, 2012; Zakaria y Cabrera, 1996).

En los últimos años se han desarrollado investigaciones tendientes a ampliar el uso de los concretos con agregados alternativos, evaluando otras propiedades como las acústicas, térmicas y de re-

sistencia al fuego. Se han evaluado las características acústicas de concretos, particularmente porosos (Kim y Lee, 2010; Doutres, Salissou, Atalla y Panneton, 2010; Park, Seo y Jun, 2005), celulares, espumosos (Ramamurthy, Kunhanandan e Indu Siva, 2009) y se han comparado con concretos normales. Además, se han realizado estudios relacionados con el aislamiento acústico de muros (Leiva, Solís-Guzman, Marrero y García Arena, 2013), placas de concreto (Pastor, García, Quintana y Peña, 2014) y pavimentos rígidos (Tiwari, Shukla y Bose, 2004). Doutres (2010) evaluó las propiedades acústicas de materiales porosos utilizando el método de tubo de impedancia con tres micrófonos y comparó los resultados obtenidos con otros métodos directos e inversos, entre ellos el método del tubo de impedancia que se usó en esta investigación.

Por otra parte, alrededor del mundo se han realizado aportes respecto a la utilización de la escoria como sustituto del cemento. La escoria ha sido utilizada como agregado grueso, con el fin de obtener concretos aligerados (Zaetang, Wongsa, Sata y Chindaprasirt, 2013), aunque puede llegar a ser un material más denso que otras alternativas (Naik, 2002). Baricová (2010) evaluó la resistencia a la compresión y encontró que un reemplazo de arena del 100% es inadecuado, pero un reemplazo del 20%, además de tener una resistencia a la compresión similar a la de un concreto normal, favorece el aumento de la resistencia a la flexión.

Esta investigación contribuye al estudio de la durabilidad del concreto, por medio de la caracterización de la EHC triturada y su inclusión como agregado fino. Se evalúa el comportamiento de durabilidad del material mediante ataques químicos como sulfatación, carbonatación y reacción álcali-agregado. Además, se analiza el coeficiente de absorción de sonido y el índice de reducción de ruido del concreto con diferentes porcentajes de sustitución de arena por EHC.

METODOLOGÍA

Se realizó la dosificación de diseño de mezcla por volumen, utilizando el método estandarizado por el Instituto Americano del Concreto (ACI 221) con base en una resistencia de diseño de 14 Mpa (2000 psi), relación agua/cemento de 0,68 y 28 días de curado. Se fabricaron probetas cilíndricas para cada uno de los ensayos de durabilidad, con 10 cm de diámetro y 20 cm de longitud. Los porcentajes de sustitución de escoria por agregado fino fueron de 0, 10, 15 y 20%, bajo las condiciones de la norma NTC 1377. Para los ensayos acústicos se fabricaron muestras con forma de disco, de 10 cm de diámetro y 2,5 cm de espesor para los mismos porcentajes de sustitución.

Caracterización física

Tanto el agregado grueso como el agregado fino y la escoria EHC se caracterizaron a partir de los ensayos descritos en la NTC 92, 176 y 237, los cuales permitieron calcular el peso unitario, la gravedad específica, el porcentaje de absorción y el porcentaje de vacíos. La granulometría de la arena, la EHC y el módulo de finura se determinaron según la NTC 77.

Caracterización química

Se realizó el ensayo de Energía Dispersiva Espectroscópica de Rayos X (EDX) a tres muestras de EHC (escogidas al azar) antes de ser triturada. Se realizó, además, el ensayo de Difracción de Rayos X (DRX) con el objetivo de descartar reacciones nocivas y confirmar los resultados del ensayo de EDX. Se tomaron muestras de concreto con sustitución del 20% de escoria por arena, concreto sin sustitución y exclusivamente EHC. Las muestras fueron pulverizadas en un mortero de ágata y reducidas a un tamaño de 38 μ m (400 mesh). El espécimen seleccionado de cada muestra fue montado en un porta de aluminio mediante

la técnica de llenado frontal. La toma de datos se realizó en un difractor de polvo, marca Bruker, modelo Advance con geometría Da-Vinci bajo las condiciones descritas en la tabla 1.

Tabla 1. Condiciones para la caracterización química de las probetas

Voltaje	40	[kV]
Corriente	30	[mA]
Rendija de divergencia	0,6	[mm]
Rendija soler primario	2,5	[°]
Muestreo	0,01526 - 2θ	[°]
Rango de medición	3,5-70 - 2θ	[°]
Radiación	CuKα1	
Filtro	Níquel	
Detector	LynxEye	
Tipo de barrido	A pasos	
Tiempo de muestreo	0,4	Seg

Fuente: elaboración propia.

El análisis cualitativo de las fases presentes en la muestra se realizó mediante comparación del perfil observado con los perfiles de difracción reportados en la base de datos del International Centre for Diffraction Data (ICDD). El análisis cuantitativo de las fases encontradas para la muestra de concreto con sustitución de arena por escoria se realizó mediante el refinamiento del perfil por el método Rietveld.

Ensayo de sulfatación

Para este ensayo se preparó una solución acuosa de sulfato de sodio anhidro (Na_2SO_4) con una concentración de 80 g/l, equivalente al 7,77% de concentración, teniendo en cuenta la densidad del sulfato ($2,68 \text{ g/cm}^3$). Este procedimiento se realizó 48 horas antes de la inmersión de las probetas. Se utilizó esta concentración con el fin de acelerar el ataque de sulfatación del concreto en condiciones más críticas que las de servicio. Las

probetas se sumergieron en dos recipientes, cada uno con 1000 g de Na_2SO_4 disueltos en 12,5 litros de agua. Se hizo la lectura del peso de las probetas pasados 28 días de curado y 30 días de secado. Se efectuaron siete ciclos de 48 horas, cada ciclo compuesto por las etapas de inmersión, secado y enfriamiento. La inmersión se realizó durante 24 horas para cada ciclo. Se secaron las probetas al horno con un tiempo de 8 horas por ciclo a 105°C , con posterior enfriamiento al ambiente por 16 horas. Durante el ensayo se midió la variación de la masa de las probetas, tanto seca (al horno) como húmeda (s.s.s.).

Ensayo de la reacción álcali-agregado

Se realizó la lectura del peso de las probetas pasados los 28 días de curado y los 120 días de secado, empleando una balanza digital. Se sumergieron las probetas en agua a 80°C durante 12 horas y posteriormente se trasladaron a una solución de soda cáustica (NaOH) con concentración ml normal, equivalente a 40 g por cada 900 ml de agua a 80°C , preparada con anticipación de 48 horas. Se utilizó un recipiente con diferencias de nivel en su base, que garantizó la difusión de la soda cáustica en la parte inferior de las probetas. La duración total de la inmersión fue de 16 días. Las probetas solo se extrajeron de la solución mientras se realizaba el control de variación de masa, el cual se efectuó con balanza digital, cada 2 días en estado saturado superficialmente seco. Pasados los 16 días se evaluó la resistencia a compresión de las probetas utilizando el equipo MTS 637 Hydraulic Wedge Grip. Para los dos ensayos descritos anteriormente se realizó, además, una inspección visual de los posibles cambios en el aspecto exterior de las probetas.

Ensayo de carbonatación acelerada

Se utilizó un equipo que incrementa artificialmente la velocidad de reacción por medio del

aumento de la concentración de CO₂ en una atmósfera controlada. Para su puesta en marcha, la cámara requirió la alimentación de CO₂, aire seco y aire húmedo. La fuente de CO₂ es un tanque comercial de 25 kg con medidor de presión. El aire que ingresa a la cámara tiene como fuente el aire atmosférico, el cual es capturado por un compresor para aumentar la presión y dirigir el flujo. El ensayo de exposición al CO₂ consistió en someter probetas de concreto secas (al ambiente por 240 días), con diferentes porcentajes de sustitución de arena por escoria en la cámara de carbonatación. La tabla 2 muestra las condiciones de humedad, temperatura y concentración para que se presente carbonatación.

Tabla 2. Condiciones de la cámara para la carbonatación acelerada del concreto

Humedad relativa [%]	50-70
Temperatura [°C]	25
Concentración [%]	70
Tiempo del ensayo [hrs]	15

Fuente: elaboración propia.

Se secó totalmente la cámara, se llenó de agua el recipiente que alimenta la caja de acero inoxidable para la correcta medición de humedad y se ingresaron las probetas. Se fijó el valor de la histéresis de humedad en 65%. El controlador de tiempo se estableció en 15 horas, teniendo en cuenta la alta concentración. Posteriormente, se energizó la cámara y se abrió la válvula del tanque de CO₂ a una presión de 250 psi, que garantizó el flujo constante. Se permitió solo el paso de CO₂, sin entrada de aire a la cámara, hasta alcanzar el valor de histéresis; luego se abrió la válvula de aire seco para su estabilización. Se fijó el flujo de aire húmedo inicial en cero, debido a la humedad relativa del ambiente, la cual varió entre 80 y 85%. Al descender el valor de la humedad relativa hasta menos del 75%, se abrió la válvula

de aire húmedo. Se garantizó la concentración del 70% periódicamente con el medidor de concentración de CO₂. Al finalizar las 15 horas de carbonatación, se cerró el paso de CO₂ y se dejó la cámara en operación por una hora más, solo con flujo de aire seco para poder extraer las probetas de forma segura. Se realizó un ensayo de tracción indirecta a las probetas sometidas a carbonatación acelerada, según la NTC 722. Aprovechando la forma de la falla, se aplicó fenolftaleína al 1% en solución etílica para determinar las zonas con pH básico (las no carbonatadas presentan color fucsia) y las zonas con pH ácido (las carbonatadas mantienen el color del concreto), ya que el CO₂ es un compuesto ácido y el concreto es un compuesto básico. Se realizaron las mediciones en cada probeta, registrando los valores máximos y mínimos de profundidad de carbonatación X para establecer el coeficiente de carbonatación K y así estimar una edad de vida útil de cada probeta, el cual se asumió como el tiempo que tarda el CO₂ en difundirse dentro del concreto, hasta llegar al acero de refuerzo. Se tomó una profundidad X de 40 mm, ya que el refuerzo mínimo para vigas y columnas en armadura principal, estribos y espirales es de 40 mm, según la norma *NSR-10* (C.7.7.1).

Evaluación de las propiedades acústicas

El índice de absorción del sonido (NRC) es el valor que indica qué tanto sonido absorbe determinado material y puede determinarse a partir de la ecuación (1)

$$NCR = \frac{\sum \alpha}{n} \quad (1)$$

El coeficiente de absorción del sonido (α) del concreto modificado se determinó por medio del ensayo del tubo de impedancia (ver figura 1). El equipo consiste en un tubo cerrado de PVC con sección transversal circular de 10 cm de diámetro, provisto de un parlante ubicado en el extremo opuesto a la

investigación

muestra y un sistema interno de micrófono móvil unidireccional de 18 mm de diámetro.

El ensayo tiene como fundamento físico la teoría de ondas estacionarias en un tubo cerrado. El límite superior de frecuencias que es preciso utilizar en el ensayo y el diámetro del tubo están relacionados por la desigualdad de la ecuación (2), según la norma ASTM C 384.

$$f < 0,586 = \frac{vs}{d} \quad (2)$$

En la ecuación (2) f es la frecuencia máxima permitida en el ensayo medida en Hertz, vs es la velocidad del sonido (343 m/s) y d es el diámetro del tubo (0,107 m). Las frecuencias utilizadas en

el ensayo fueron: 250, 315, 400, 630, 800, 1000, 1250 y 1600 Hz, todas menores de 1878,5 Hz.

El ensayo se realizó con los parámetros de la ASTM C 384, utilizando el tubo de impedancia, un osciloscopio marca Tektronic de referencia TDS 200 2B y un generador de señales marca Protek de referencia 9205^a (ver figura 2a y 2b). Las muestras de concreto con EHC se ponen en un extremo del tubo de impedancia, el parlante con su soporte en el otro extremo y el micrófono desplazándose a lo largo del tubo por medio del sistema de varilla móvil. Enseguida se generan las señales y se miden las magnitudes de la presión en los nodos y antinodos con el micrófono de prueba.

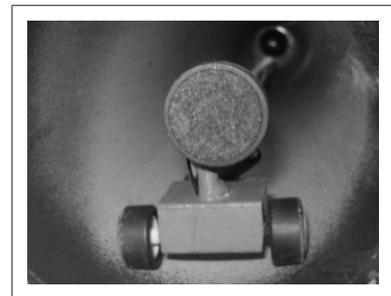


Figura 1 (a-b). Tubo de impedancia

Fuente: elaboración propia.

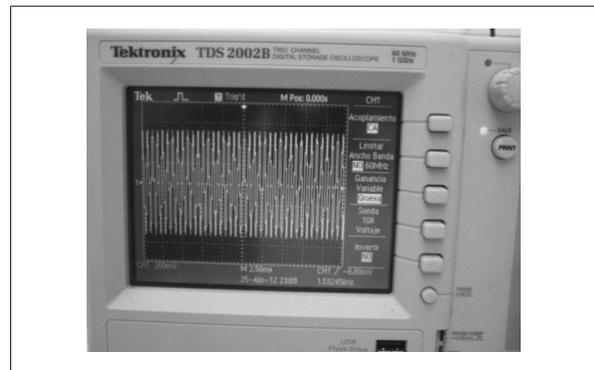


Figura 2 (a-b). Generador de señales y osciloscopio en el desarrollo del ensayo

Fuente: elaboración propia.

RESULTADOS

Caracterización física

La tabla 3 muestra los resultados obtenidos del peso unitario, el porcentaje de vacíos (NTC 92), la gravedad específica y el porcentaje de absorción del agregado grueso (NTC 176), arena y escoria (NTC 237). El porcentaje de humedad se calculó según la INV E - 122. Se determinó además,

la curva granulométrica del agregado fino, tanto para la arena (figura 3a) como para la EHC (figura 3b) y el módulo de finura mediante la NTC 77.

El sistema de clasificación unificado de suelos (USCS) indicó que la arena utilizada es de tipo SP. Su módulo de finura fue de 2,073 y se encuentra en el rango de “arenas finas”. Según el USCS, la escoria triturada utilizada es de tipo SW. Su módulo de finura fue de 3,413, por lo que se concluye que se trata de una “arena gruesa”.

Tabla 3. Gravedades específicas y pesos unitarios de los agregados

Gravedades específicas y pesos unitarios	Ag. grueso	Ag. fino	EHC triturada
Gravedad específica real [g/g]	2,72	2,71	2,40
Gravedad específica aparente [g/g]	2,61	2,58	2,35
Gravedad específica aparente S.S.S [g/g]	2,65	2,63	2,37
Peso unitario del agregado S.S.S compactado [kg/m ³]	1477,79	1652,33	1727,43
Peso unitario del agregado S.S.S. suelto [kg/m ³]	1345,56	1392,98	1437,94
Absorción [%]	1,56	1,87	0,85
Vacíos [%]	44,29	37,21	27,10
Humedad [%]	0,49	0,83	0,54

Fuente: elaboración propia.

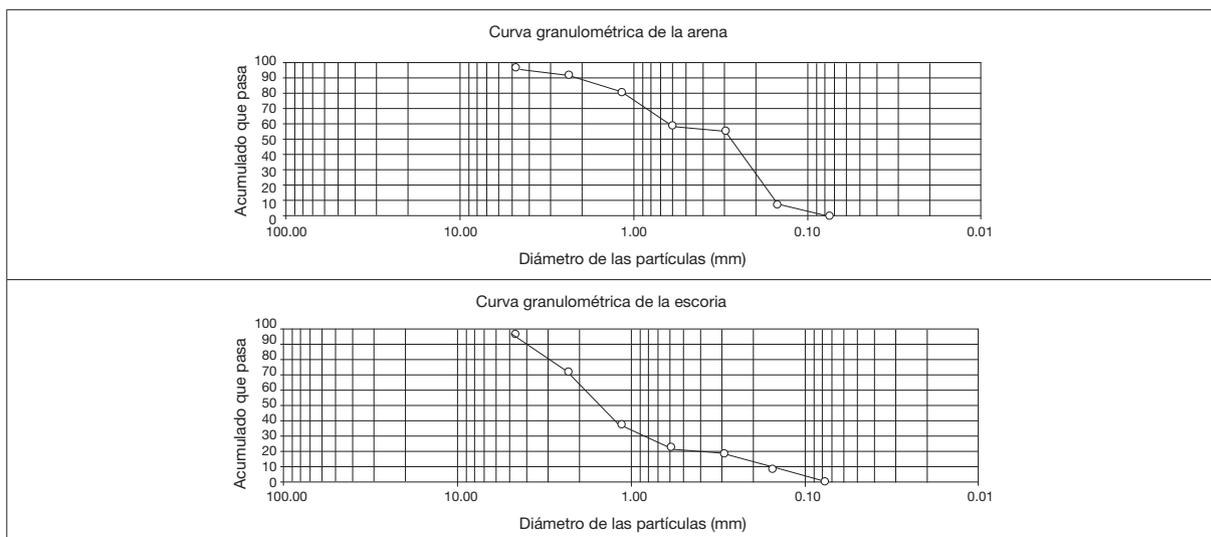


Figura 3. a) Curva granulométrica de la arena **b)** Curva granulométrica de la escoria de horno de cubilote triturada

Fuente: elaboración propia.

Caracterización química

En la figura 4 se observa que según el método de análisis de energía dispersiva espectroscópica de rayos X (EDX), los elementos que principalmente componen la EHC son silicio y calcio.

Las fases de la EHC no modifican cualitativamente la conformación de fases principales del concreto con reemplazo del 20%, ya que la mayoría no son cuantificables debido a su baja proporción. Sin embargo, el porcentaje de sílice en forma de agregado aumenta, por lo que resulta determinante. Este planteamiento se verifica por medio del análisis cuantitativo (tabla 4).

Se comprobó la influencia de los elementos principales de la EHC en las fases cristalinas

del material compuesto. Se determinó un alto contenido de sílice en forma de agregado, lo cual, potencialmente puede causar un efecto de arenas expansivas al contacto con el agua (ver figura 5).

Ensayo de sulfatación

En la figura 6 se observa que los últimos ciclos de humedecimiento y secado causaron un desprendimiento de material y el surgimiento de una capa de sulfato solidificado alrededor de las probetas, generado por el ascenso del sulfato hacia la superficie debido a acciones capilares y a la cristalización de sales por evaporación. Esta acción resultó ser la causa principal del daño presentado en las probetas (ver figura 7).

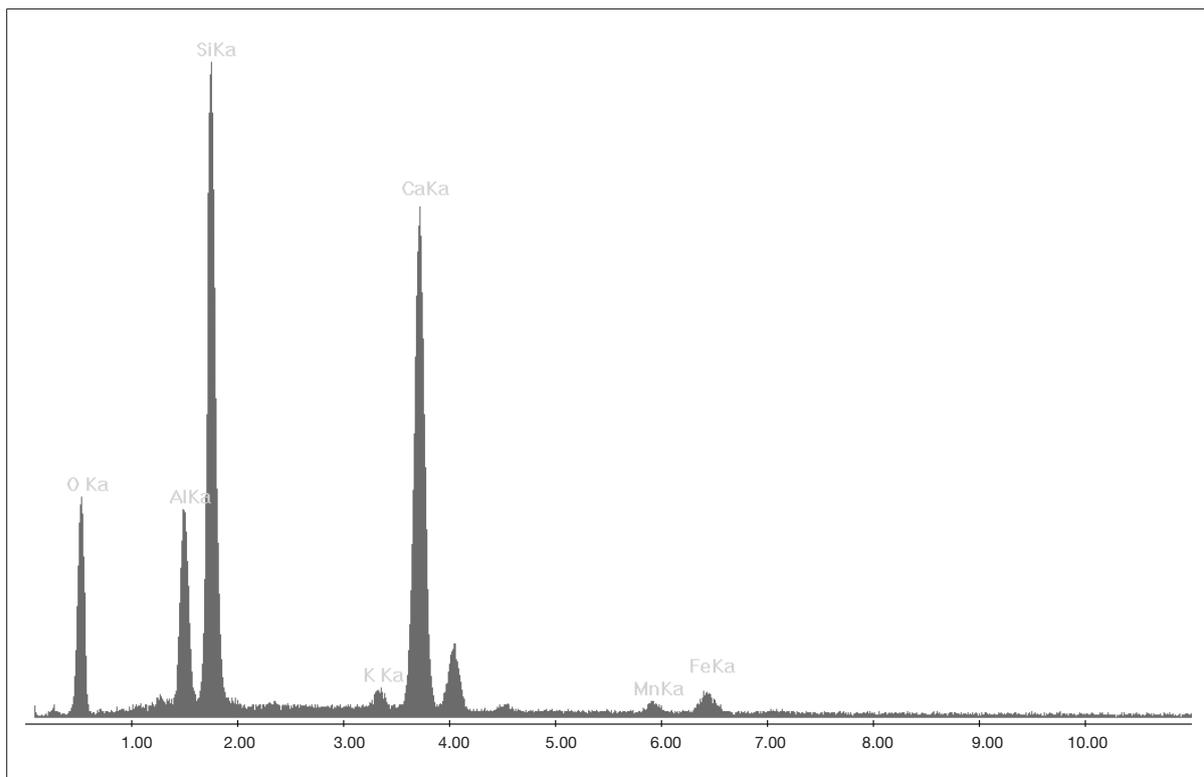


Figura 4. Espectro de rayos x de la EHC

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Análisis DRX cuantitativo del concreto con sustitución de agregado fino por escoria al 20%

	Fase	Nombre	Porcentaje cuantitativo (D. E.)
Cristalinos	Si O ₂	Cuarzo	22,1 (0,2)
	Ca CO ₃	Calcita	35,8 (0,3)
	Ca (OH) ₂	Portlandita	2,0 (0,0)
	Ca (CO ₃)	Vaterita	5,3 (0,1)
	Al ₂ (Si ₂ O ₅) (OH) ₄	Caolinita	2,6 (0,1)
	(Fe, Al) PO ₄ · 3 H ₂ O	Koninckita	N.C
	Fe ₃ Si	Gupeita	N.C
	Ca ₃ Si O ₅	Hatruirita	5,0 (0,2)
	Mn S	Sulfuro de Manganeso	N.C
	K Al Si ₃ O ₈	Microclina	N.C
	K Al ₂ (Si ₃ Al) O ₁₀ (OH) ₂	Moscovita	13,8(0,3)
	Na (Al Si ₃ O ₈)	Albita	4,6 (0,2)
	(Mg, Fe) ₆ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	Clinocloro	2,4 (0,1)
Total Cristalino			93,6
Amorfos y otros			6.4

Nota: N.C = no cuantificable (debido a su baja proporción). D.E. = desviación estándar.

Fuente: elaboración propia.

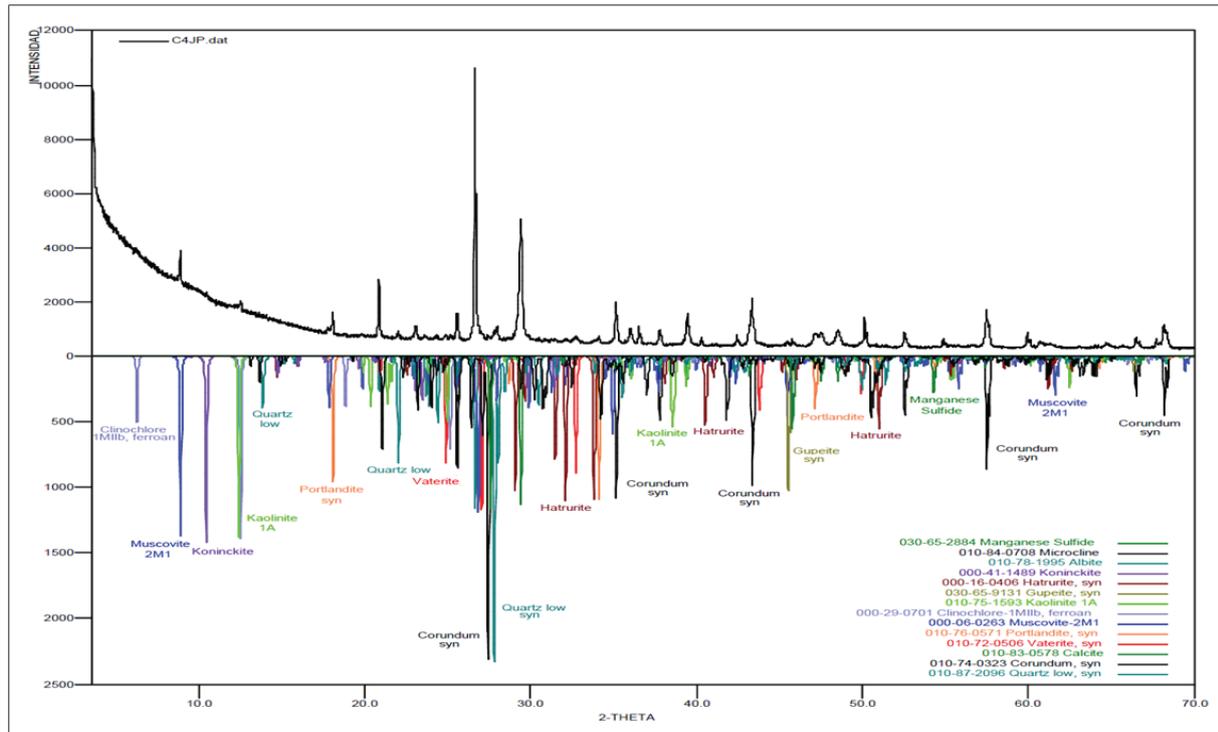


Figura 5. Espectro de rayos X del material compuesto

Fuente: elaboración propia.

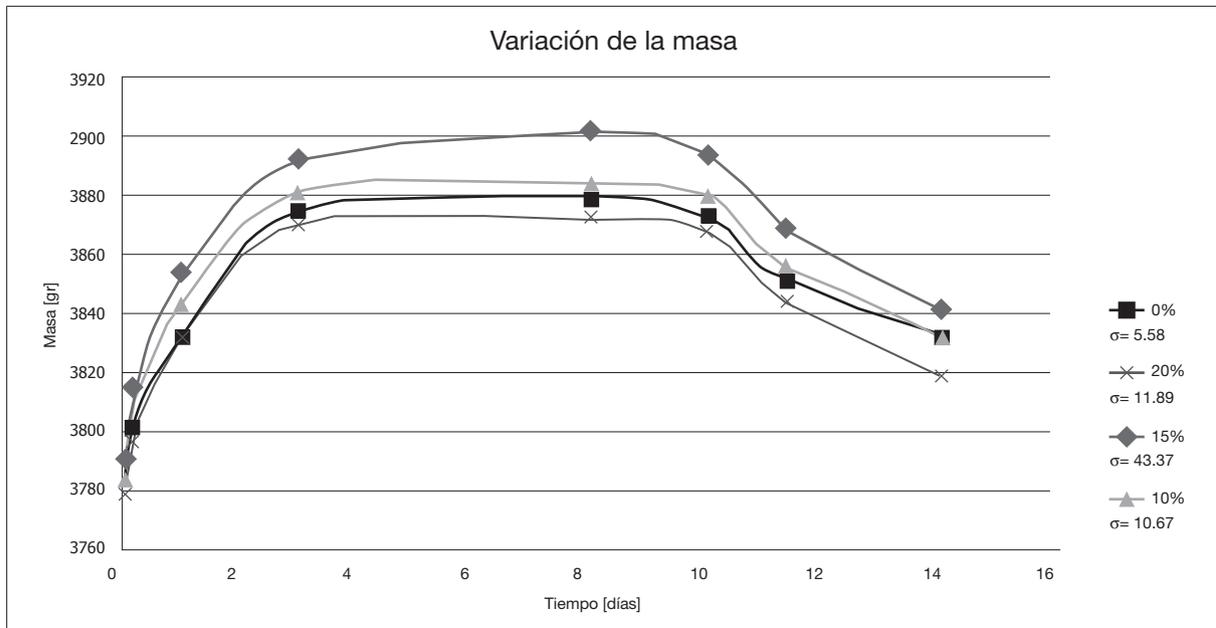


Figura 6. Variación de la masa húmeda de las probetas sometidas a sulfatación

Fuente: elaboración propia.

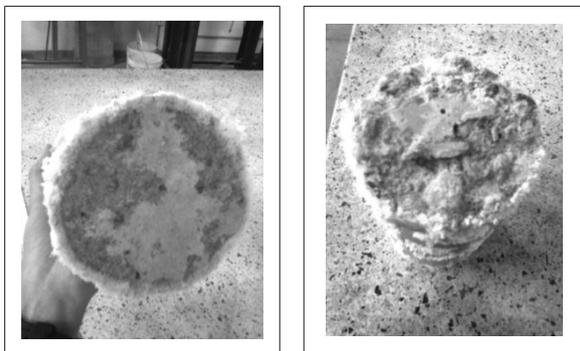


Figura 7. a) Cristalización de sales b) Daño generado en una probeta con sustitución del 20%

Fuente: elaboración propia.

Ensayo de la reacción álcali-agregado

En este ensayo no se establecieron etapas de secado, no se presentó una variación considerable por saturación de poros y se determinó que las

probetas con el 20% de sustitución de arena por EHC tuvieron el mayor porcentaje de aumento de masa, como lo muestra la figura 8.

La variación de la masa indica que hay mayor difusión de la solución de soda cáustica en el concreto a mayor reemplazo de escoria por arena. Este fenómeno se relaciona con la reacción entre los álcalis del cemento y los agregados con alto contenido de sílice. La reacción induce una expansión de la estructura del concreto con posibles agrietamientos internos. Las probetas mostraron cambios en la textura de la superficie, volviéndose resbaladiza.

Los resultados del ensayo de resistencia a la compresión muestran que las probetas con porcentaje de sustitución del 20% presentaron mayor disminución de la resistencia que las probetas con menor porcentaje de sustitución (ver figura 9).

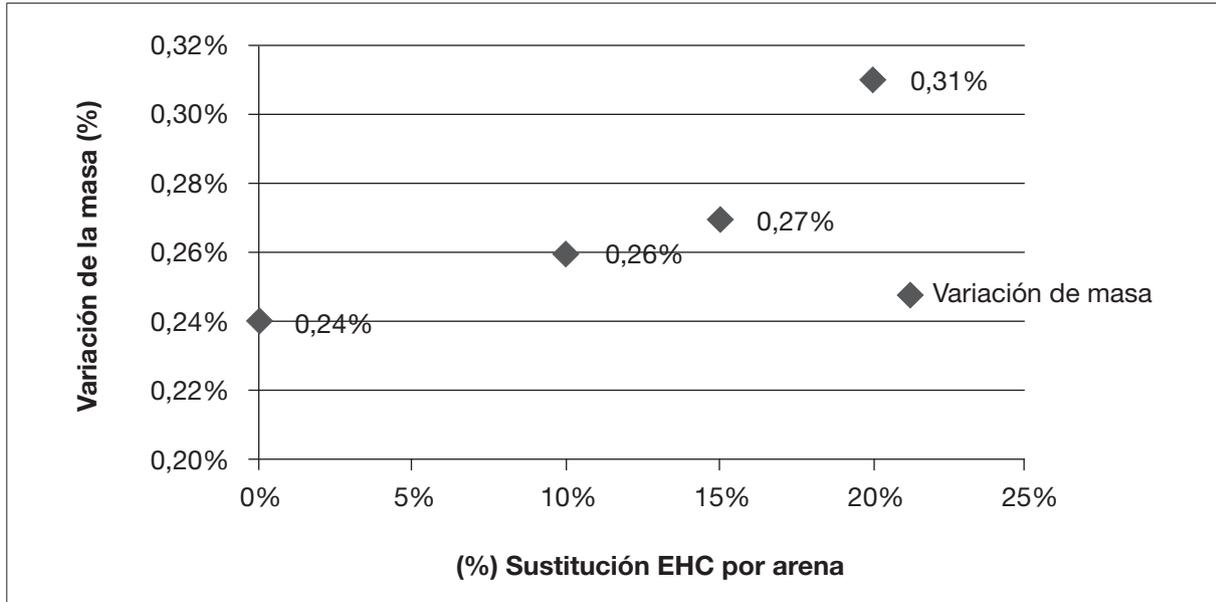


Figura 8. Porcentaje de variación de la masa respecto al porcentaje de sustitución

Fuente: elaboración propia.

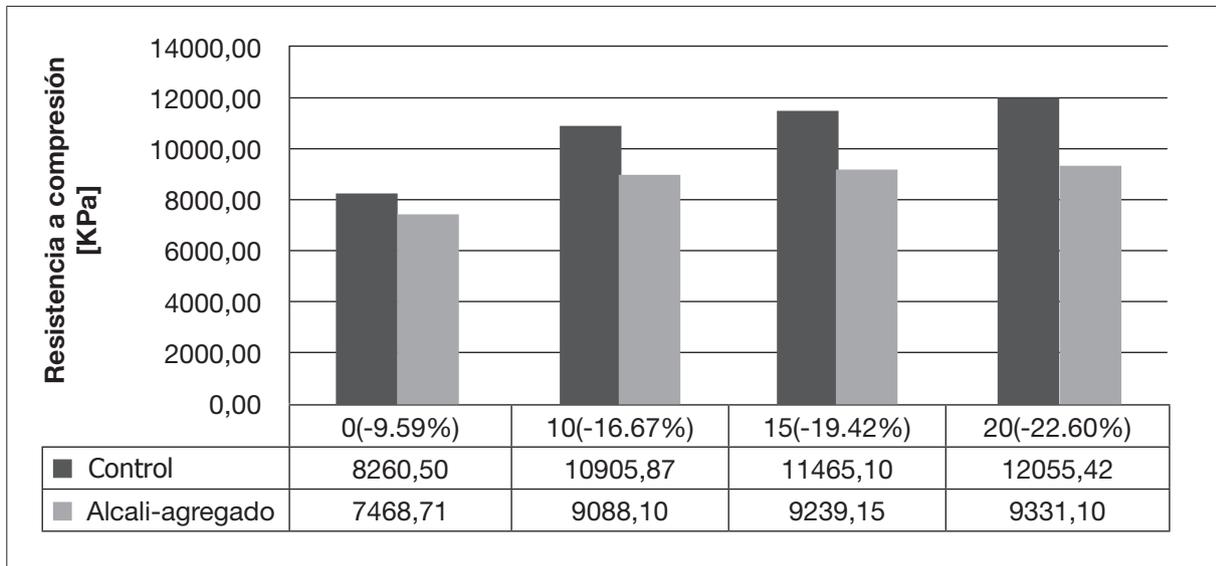


Figura 9. Resultados del ensayo de resistencia a la compresión posterior al de RAA

Fuente: elaboración propia.

Ensayo de carbonatación acelerada

En la figura 10 se observan los resultados obtenidos de la medición de la profundidad de penetración por medio del análisis de pH.

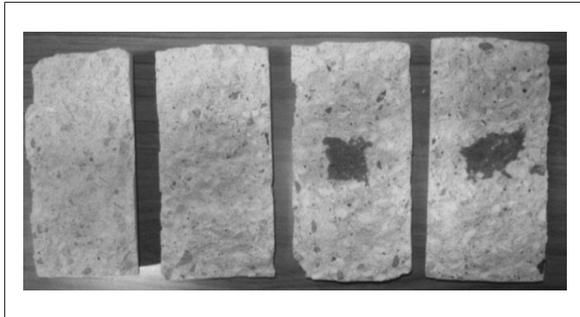


Figura 10. Profundidades de carbonatación para 0, 10, 15 y 20% de sustitución

Fuente: elaboración propia.

A la zona donde no se presenta color fucsia se le llama zona carbonatada, puesto que esta solución es incolora en pH inferiores a 8,5. Para valores de pH superiores a 9,5 se torna de color púrpura y entre 8,5 y 9,5 el indicador adquiere una coloración de color rosa al rojo-púrpura (Moreno, Domínguez, Cob y Duarte, 2004). En cuanto al pH, en las probetas con el 0% de sustitución se evidenció una difusión completa del CO₂, fueron carbonatadas completamente con pH menor de 8,5; las probetas con sustitución del 10% se carbonataron completamente con un pH entre el 8,5 y el 9,5, y las probetas con sustitución del 15 y 20% fueron carbonatadas pero no completamente, estas tuvieron zonas no carbonatadas con un pH mayor de 9,5.

El coeficiente de carbonatación se determinó a partir de $X = K\sqrt{t}$, utilizando $x = 40$ mm, que es el recubrimiento mínimo exigido en la NSR (10) para vigas y columnas (figura 11 y 12). El tiempo de vida útil estimado para una estructura de concreto de EHC con diferentes porcentajes de sustitución se calculó mediante la expresión $\tau_i = \tau_c \frac{C_{s1}}{C_{s2}}$

(ver figura 13). Se realizó una transformación del tiempo de vida útil con concentración del 70% a un tiempo de vida útil, a una concentración del medio ambiente 0,03918% de concentración CO₂ (CO₂, 2011).

Ensayo acústico por el método del tubo de impedancia: se determinó el coeficiente de absorción acústica ($\alpha = 1 - |r|^2$) y el índice de reducción de ruido (NRC) del concreto modificado con EHC. El coeficiente de absorción para los rangos de frecuencias entre 400 y 1200 Hz de los concretos modificados con EHC a los diferentes porcentajes, es más alto que el del concreto normal, siendo el mejor valor el de la sustitución al 20%. Esto indica que el concreto modificado es mejor absorbente del sonido para este rango de frecuencias, como se observa en la figura 14. Igualmente, la capacidad de material de absorción del sonido se puede expresar a través del coeficiente de reducción de ruido NCR. Los resultados muestran claramente que el concreto modificado, en particular aquel al 20%, tiene mejores resistencias al sonido (12% mejor) que el concreto sin modificar, como se observa en la figura 15.

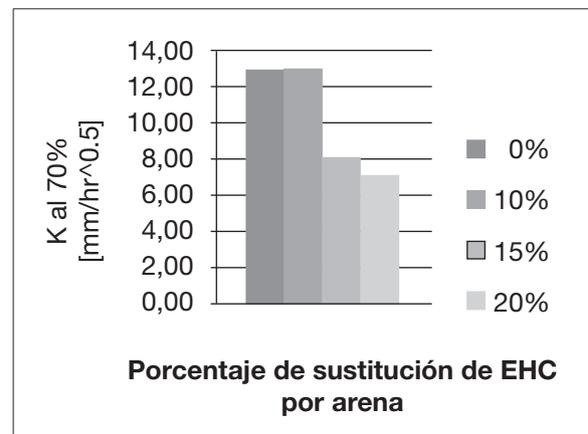


Figura 11. Coeficiente de carbonatación [K] para una concentración del 70%

Fuente: elaboración propia.

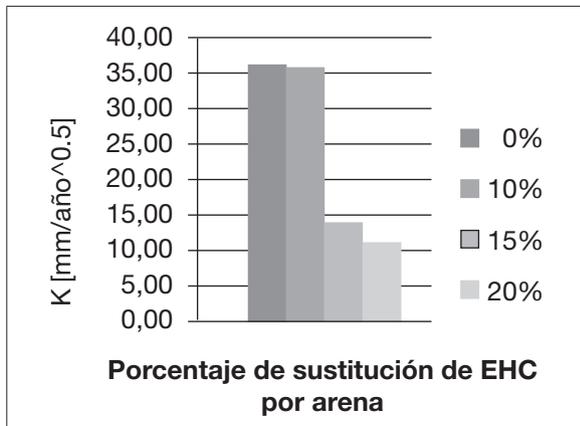


Figura 12. Coeficiente de carbonatación [K] a concentración ambiente [0,039 %]

Fuente: elaboración propia.

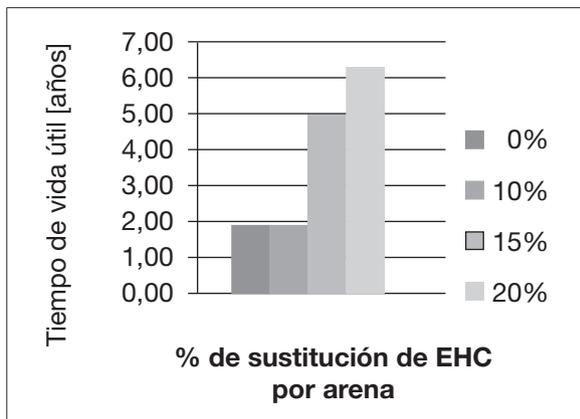


Figura 13. Tiempo de vida útil estimado para una estructura de concreto de EHC

Fuente: elaboración propia.

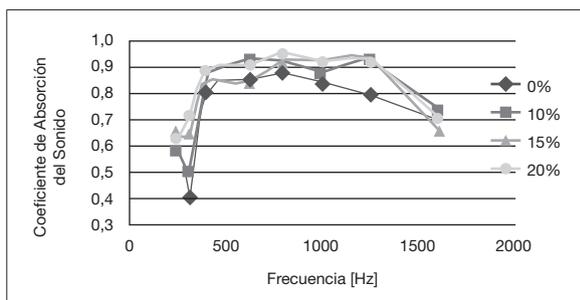


Figura 14. Coeficiente de absorción acústico medido a distintas frecuencias

Fuente: elaboración propia.

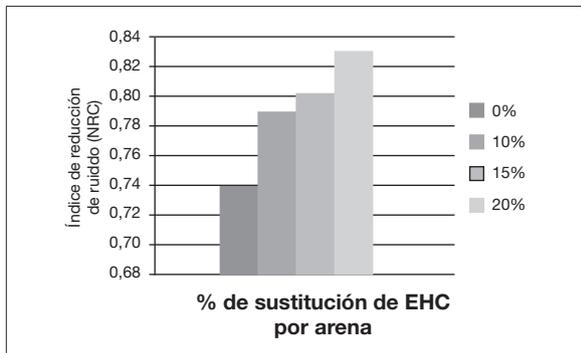


Figura 15. Índice de reducción de ruido (NRC) para diferentes sustituciones de escoria por arena

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

La clasificación granulométrica realizada permitió caracterizar a la EHC como arena gruesa bien gradada con pocos finos. Se obtuvieron ciertas diferencias en sus propiedades físicas y granulometría respecto de los agregados.

Según el ensayo de EDX, los elementos que principalmente componen la EHC son sílice y calcio, los cuales también están presentes en el concreto convencional en diferentes compuestos, por lo que a priori son materiales químicamente compatibles.

El ensayo de DRX comprueba que las fases de la EHC no influyen cualitativamente en la conformación de fases principales del material compuesto; sin embargo, contribuyen al aumento de sílice en forma de agregado, lo que puede producir un efecto de arenas expansivas en ambientes húmedos.

No es recomendable la utilización del concreto de EHC como agregado fino para elementos sometidos a medios húmedos con sulfatos, sobre todo si se presentan ciclos de humedecimiento y secado, pues se determinó que con porcentaje de

sustitución del 20% ocurrió una pérdida de masa de 2,47%, contra un 1,07% de pérdida sin reemplazo. El desprendimiento de la pasta fue proporcional al porcentaje de sustitución, y fue causado por la cristalización de sales en la superficie de las probetas.

Existe influencia de la reacción entre los álcalis del cemento y el agregado fino de EHC en la difusión de la solución de soda cáustica en concretos con mayor porcentaje de EHC (0,31% de aumento de masa para el 20%, versus 0,24% sin EHC), por su alto contenido de sílice. La reacción induce una expansión de la estructura del concreto, con posibles agrietamientos internos. No se recomienda utilizar EHC como agregado fino en medios acuosos donde haya presencia inminente de la reacción álcali-agregado.

El agregado fino de EHC favorece la disminución de la difusión de CO₂ en el concreto. Las probetas con 20% de sustitución indicaron que la edad de vida útil de estructuras de concreto reforzado con

este porcentaje de EHC es aproximadamente 10 veces mayor que la de estructuras de concreto sin escoria en ambientes carbonatados.

La escoria de horno de cubilote como agregado fino contribuye a la absorción acústica del concreto. A mayor porcentaje de sustitución de escoria por arena, mayor es el índice de reducción de ruido (NRC). Se presentó un índice de 0,83 para el concreto modificado al 20% de sustitución en comparación con el NRC de 0,74 correspondiente al concreto sin modificar, lo que podría ser ventajoso al fabricar elementos para el aislamiento acústico con concretos base EHC.

FINANCIAMIENTO

Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la Universidad Industrial de Santander, proyecto 5561 “Uso de la escoria de procesos metalúrgicos como agregado del concreto para la fabricación de elementos de construcción no estructurales- Fase I”.

REFERENCIAS

- Anastasiou, E., Georgiadis, K. y Stefanidou, M. (2014). Utilization of Fine Recycled Aggregates in Concrete with Fly Ash and Steel Slag. *Construction and Building Materials*, 50, 154-161.
- Baricová, D., Pribulová, A. y Demeter, P. (2010). Comparison of Possibilities the Blast Furnance and Cupola Slag Utilization by Concrete Production. *Archives of Foundary Engineering*, 10 (1), 15-18.
- Blissett, R. S. y Rowson, N. A. (2012). A Review of the Multi-Component Utilisation of Coal Fly Ash. *Fuel*, 97, 1-23.
- CO₂ Now (2011). *Earth's CO₂*. Recuperado de <http://co2now.org/>
- Doutres, O., Salissou, Y., Atalla, N. y Panneton, R. (2010). Evaluation of the Acoustic and Non-Acoustic Properties of Sound Absorbing Materials Using a Three-Microphone Impedance Tube. *Applied Acoustics*, 71 (6), 506-509.
- Kim, H. K. y Lee, H. K. (2010). Acoustic Absorption Modeling of Porous Concrete Considering the Gradation and Shape of Aggregates and Void Ratio. *Journal of Sound and Vibration*, 329 (7), 866-879.
- Kim, H. K. y Lee, H. K. (2010). Influence of Cement Flow and Aggregate Type on the Mechanical and Acoustic Characteristics of Porous Concrete. *Applied Acoustics*, 71, 607-615.

- Leiva, C., Solís-Guzman, J., Marrero, M. y García Arena, C. (2013). Recycled Blocks with Improved Sound and Fire Insulation Containing Construction and Demolition Waste. *Waste Management*, 33 (3), 663-671.
- Mohammed, N. y Pofale, A. D. (2012). Experimental Investigation of Using Slag as an Alternative to Normal Aggregates (Coarse and Fine) in Concrete. *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 3 (1), 117-127.
- Moreno, E., Domínguez, G., Cob, E. y Duarte, F. (2004). Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración. *Ingeniería*, 8 (2), 117-130.
- Naik, T. (2002). Greener Concrete Using Recycled Materials. *Concrete International*, 24 (7), 45-49.
- Park, S. B., Seo, D. S. y Jun, L. (2005). Studies on the Sound Absorption Characteristics of Porous Concrete Based on the Content of Recycled Aggregate and Target Void Ratio. *Cement and Concrete Research*, 35 (9), 1846-1854.
- Pastor, J. M., García, L. D., Quintana, S. y Peña, J. (2014). Glass Reinforced Concrete Panels Containing Recycled Tyres: Evaluation of the Acoustic Properties of for their Use as Sound Barriers. *Construction and Building Materials*, 54, 541-549.
- Ramamurthy, K., Kunhanandan, E. K. y Indu Siva, G. (2009). A Classification of Studies on Properties of Foam Concrete. *Cement and Concrete Composites*, 31, 388-396.
- Tiwari, V., Shukla, A. y Bose, A. (2004). Acoustic Properties of Cenosphere Reinforced Cement and Asphalt Concrete. *Applied Acoustics*, 65, 263-275.
- Zaetang, Y., Wongsas, A., Sata, V. y Chindaprasirt, P. (2013). Use of Lightweight Aggregates in Previous Concrete. *Construction and Building Materials*, 48, 585-591.
- Zakaria, M. y Cabrera, J. G. (1996). Performance and Durability of Concrete Made with Demolition Waste and Artificial Fly Ash-Clay Aggregates. *Waste Management*, 16, 151-158.

Resistencia de una conexión empernada solicitada a cizalladura doble paralela a la fibra para estructuras de guadua angustifolia

Bolted joint strength under parallel to grain double shear in guadua angustifolia structures

FABIÁN AUGUSTO LAMUS BÁEZ

Ingeniero civil, magíster en Ingeniería - Estructuras, doctor en Ingeniería - Ciencia y Tecnología de Materiales, docente de la Universidad de La Salle. Bogotá, Colombia. Contacto: falamus@unisalle.edu.co

MAYRA ALEJANDRA PLAZAS BERNAL

Ingeniera civil, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Contacto: maplzasb@correo.udistrital.edu.co

PATRICIA LUNA TAMAYO

Ingeniera civil, magíster en Estructuras, candidato a doctor en Ingeniería Civil, docente de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Contacto: plunat@unal.edu.co

Fecha de recepción: 29 de julio de 2013

Clasificación del artículo: investigación

Fecha de aceptación: 15 de agosto de 2014

Financiamiento: Universidad de La Salle

DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.1.a03>

Palabras clave: materiales de construcción, Guadua angustifolia, conexión empernada, cizalladura doble.

Keywords: Building materials, Guadua angustifolia, bolted joint, double shear

RESUMEN

En una conexión empernada de estructuras que usan *Guadua angustifolia* como material principal de soporte, la resistencia a la cizalladura doble paralela a la fibra puede verse influenciada por una amplia lista de parámetros, entre ellos la resistencia al aplastamiento, la resistencia al corte paralelo a la fibra de la pared del canuto y el área de contacto entre los elementos que conforman

la conexión. En este documento se presentan los resultados experimentales para la resistencia a la cizalladura doble paralela a la fibra, cuando el elemento se encuentra solicitado a compresión, con diferentes diámetros de culmo. Por otra parte, se estudia la influencia del diámetro del perno y el espesor de la pared del culmo en la resistencia de la conexión. Los ensayos fueron realizados sobre especímenes de guadua rolliza con diámetros variables entre los siete y catorce centímetros en

los que se emplearon pernos de 3/8, 1/2 y 3/4". La guadua ensayada provenía de las cercanías de Armenia en Colombia. Se encontró que la resistencia a la cizalladura paralela a la fibra es proporcionada en gran medida por la resistencia de la guadua a la compresión paralela a la fibra.

ABSTRACT

In a bolted joint structure using *Guadua Angustifolia* Kunth as a main support material, the strength under double shear parallel to the grain could be influenced by an extensive list of parameters including parallel to grain crushing strength, parallel to grain shear strength of the

wall and the contact area between elements in the joint. This paper presents experimental results for double shear strength parallel to grain, when the element is loaded under compression, for different culm diameters. Moreover, we studied the influence of the bolt diameter and culm thickness in the joint resistance. The tests were conducted on specimens of *Guadua angustifolia* with variable diameters between seven and fourteen centimeter where bolts of 3/8, 1/2 and 3/4" diameter were used. The *Guadua* tested came from the outskirts of Armenia in Colombia. It was found that the the major amount of the double shear strength parallel to grain in the joint is provided by parallel to fiber crushing resistance of the *Guadua*.

* * *

INTRODUCCIÓN

En Colombia, a partir de la entrada en vigencia del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010), la *Guadua angustifolia* ha sido reconocida como material principal para la construcción del sistema de resistencia sísmica de edificaciones. Por otra parte, se conoce que una de las principales dificultades en el diseño de una estructura de *Guadua angustifolia* consiste en la selección y el diseño de las conexiones (Lamus y Takeuchi, 2002), puesto que si bien es cierto que se han desarrollado algunas investigaciones que exploran el comportamiento mecánico de determinados tipos de uniones (Camacho y Páez, 2002; Clavijo y Trujillo, 2000; Lamus, 2008; Prieto, 2004), aún no se cuenta con la información suficiente con respecto a la relación entre la resistencia de dichas conexiones y los parámetros de los elementos que las conforman, tales como su geometría y las propiedades mecánicas de los materiales.

En el reglamento NSR-10 se han especificado algunos valores máximos para la resistencia de las

conexiones emperradas y aunque se trata de un primer acercamiento al problema, es claro que se requiere un mayor estudio para llegar a tener unos parámetros de diseño que le permitan al ingeniero estructural predecir la resistencia de estas conexiones, a partir de las condiciones geométricas y las características mecánicas de los culmos de guadua y los pernos de acero.

En este documento se presentan los resultados relacionados con la influencia del espesor de la pared del canuto y el diámetro del perno en la resistencia a cizalladura doble paralela a la fibra, en una conexión emperrada. Estos resultados hacen parte de un proyecto macro que tiene como objetivo estudiar el comportamiento estructural de edificaciones construidas con *Guadua angustifolia* usando conexiones emperradas.

MATERIALES

La *Guadua angustifolia* usada en esta investigación provenía del Quindío (Colombia), y de acuerdo con el proveedor, su edad en el momento

del corte oscilaba entre los 4 y los 5 años. Para la obtención de los especímenes se aprovechó el culmo de guadua desde la cepa hasta la sobrebasa, obteniéndose diámetros entre 7 y 14 cm. Para la obtención de los especímenes de ensayo se procuró que existiera una distribución lo más uniforme posible de diámetros dentro de la muestra, tanto para los ensayos de caracterización como para los ensayos sobre las probetas de las conexiones.

En una primera etapa de caracterización se realizaron ensayos de compresión y cortante paralelo a la fibra con base en el procedimiento establecido en la norma NTC5525 (Icontec, 2007), siendo determinado el contenido de humedad para todas las muestras en el momento de la falla. En la tabla 1 se presentan los resultados para la resistencia a compresión paralela a la fibra, la resistencia a cortante paralelo a la fibra y el contenido de humedad. Por otra parte, para la conexión se usaron pernos de varilla roscada elaborada con acero SAE1020, usando diámetros de 3/8, 1/2 y 3/4".

METODOLOGÍA

Para determinar la resistencia de la conexión empernada a cizalladura doble se realizaron ensayos (Plazas, 2013) sobre 120 especímenes agrupados en cuatro rangos de diámetro, de acuerdo con la tabla 2.

La forma de los especímenes de las conexiones consistía en un canuto cerrado con sus dos nudos adyacentes y con una extensión longitudinal adicional entre 20 y 50 mm en ambos sentidos, como se ilustra en la figura 1. A una distancia L_{SP} igual a 150 mm medida desde el extremo superior del culmo se realizó una perforación perpendicular a su eje, de manera que se pudiera colocar un perno atravesando las dos paredes. Durante la medición de los especímenes se registró tanto la longitud entre nudos L_N como la distancia L_{NP} entre el agujero del perno y el nudo comprimido (figura 1 a) y b)).

Tabla 1. Resultados de los ensayos de caracterización de la Guadua angustifolia

Propiedad	Mínimo	Máximo	Promedio	Desv. Est.
Resistencia a la compresión paralela [MPa]	33,62	53,84	44,18	7,26
Resistencia al corte paralelo [MPa]	3,39	9,75	6,99	2,14
Contenido de humedad [%]	6,98	20,69	9,92	2,74

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Distribución de especímenes por intervalos de diámetros

Intervalo	Diámetro promedio mm		Cantidad	Porcentaje
	Mínimo	Máximo		
1	70	100	30	25
2	100	110	30	25
3	110	130	30	25
4	130	150	30	25
TOTAL			120	100

Fuente: elaboración propia.

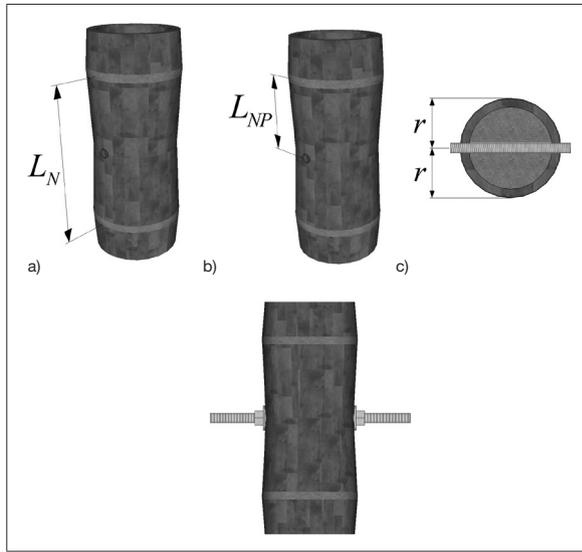


Figura 1. Espécimen de conexión ensayado a cizalladura doble. **(a)** Longitud entre nudos, **(b)** Distancia del perno al nudo, **(c)** Forma de la probeta

Fuente: elaboración propia.

Para cada rango de diámetro del culmo se ensayaron 10 probetas de conexiones elaboradas para cada uno de los tres diámetros de perno seleccionados (3/8, 1/2 y 3/4”). Las perforaciones se realizaron con una holgura de 1/16”, de acuerdo con lo especificado en el reglamento NSR-10.

Los ensayos se llevaron a cabo en el laboratorio de mecánica de materiales de la Universidad de La Salle, usando una máquina universal servo controlada, en la que se implementó un montaje diseñado para el proyecto (figura 2c). Para apoyar los extremos de las varillas se usaron pletinas con una perforación ajustada al diámetro de cada perno (figura 2 b) y d)). La varilla se fijó al culmo de guadua empleando a cada lado un conjunto de una tuerca y dos arandelas: la primera de Neolite con un espesor de 4 mm y la segunda metálica (figura 2a). Finalmente, se usaron tuercas y arandelas para fijar la probeta al montaje (figura 2 b) y d)).

El control del ensayo se hizo por deformación y se usó una velocidad de 1,5 mm/min. Luego de que se presentara la falla en la conexión, se continuó con el ensayo hasta alcanzar un desplazamiento total de 25 mm, o hasta que la conexión perdiera el 50% de la carga pico.

RESULTADOS

Para establecer la influencia del diámetro del perno y el espesor de la pared en la resistencia a cizalladura doble, para cada espécimen se calculó el esfuerzo promedio actuante a compresión σ_c aplicado por el perno sobre la pared de la guadua, usando la ecuación (1).

$$\sigma_c = \frac{P}{A_c} \quad (1)$$

La carga máxima P obtenida en cada ensayo se relaciona con el área a compresión A_c , calculada usando la ecuación (2), como la proyección longitudinal de la zona de contacto entre el perno y la pared del culmo. En este caso, se considera que la transferencia de carga se realiza solo en la dirección paralela al culmo, tal como se ilustra en la figura 3.

$$A_c = 2 t d_p \quad (2)$$

Donde t es el espesor promedio de la pared del culmo y d_p es el diámetro del perno.

En la figura 4 se presentan los valores de carga máxima en función del área a compresión para todos los especímenes. Se han trazado las líneas de tendencia para los tres grupos de diámetros de perno trabajados. El mayor valor de la pendiente, obtenido para los especímenes elaborados con pernos de 3/8”, implica una mayor resistencia a nivel de esfuerzos. La pendiente disminuye a medida que se incrementa el diámetro del perno usado.

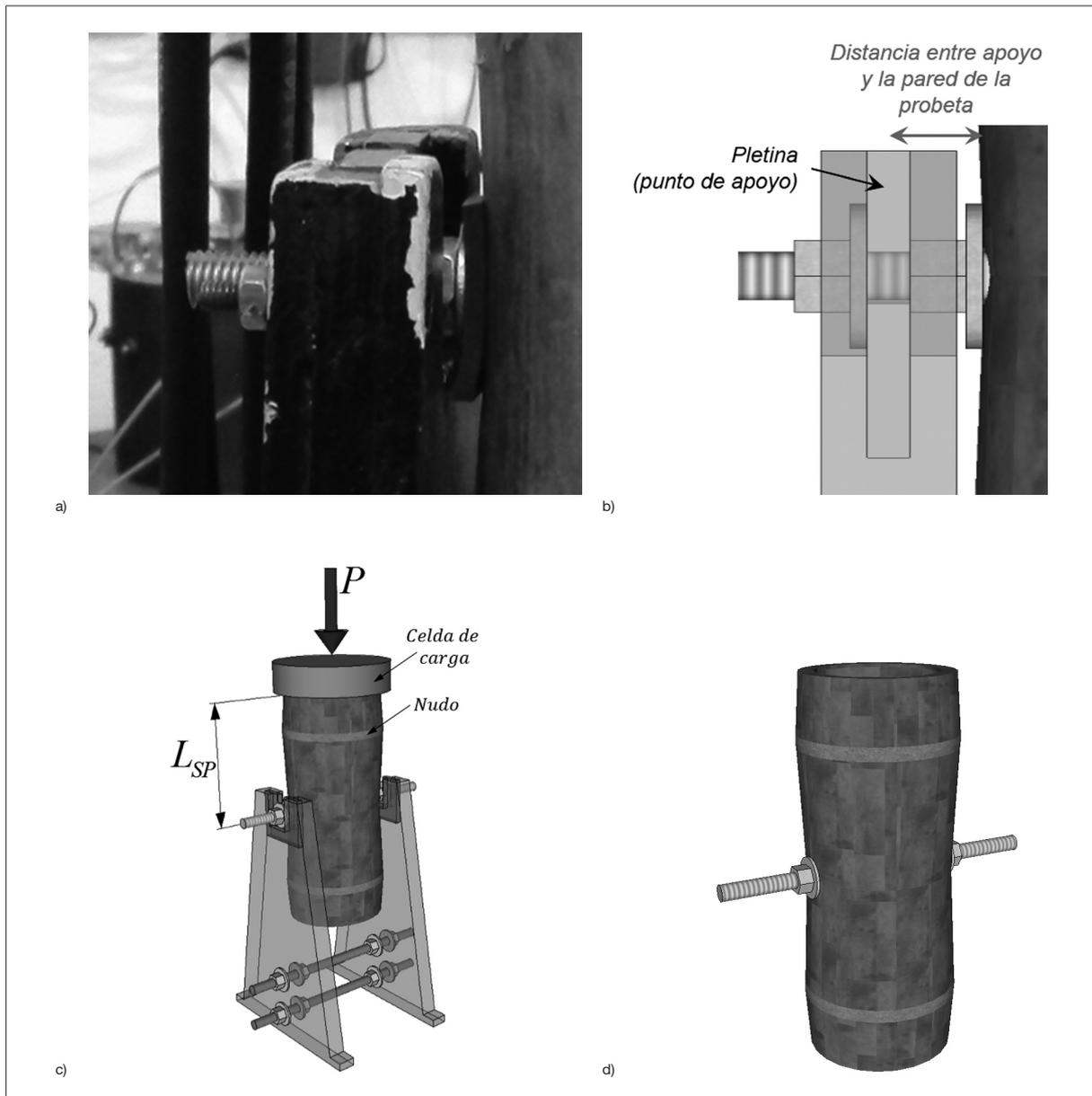


Figura 2. Montaje empleado para el ensayo de cizalladura doble producida por carga paralela al culmo. **a)** Detalle del apoyo, **b)** Esquema del apoyo, **c)** Esquema del montaje, **d)** Esquema de la probeta

Fuente: elaboración propia.

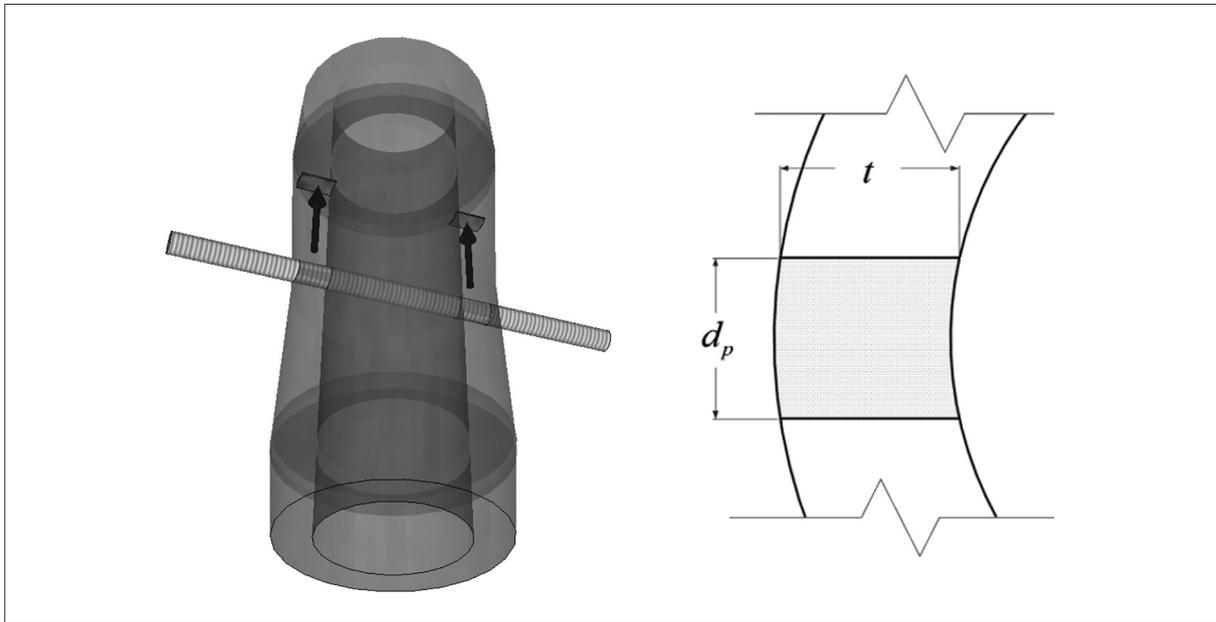


Figura 3. Proyección de la zona de contacto entre el perno y la pared del culmo para el cálculo de la fuerza de compresión

Fuente: elaboración propia.

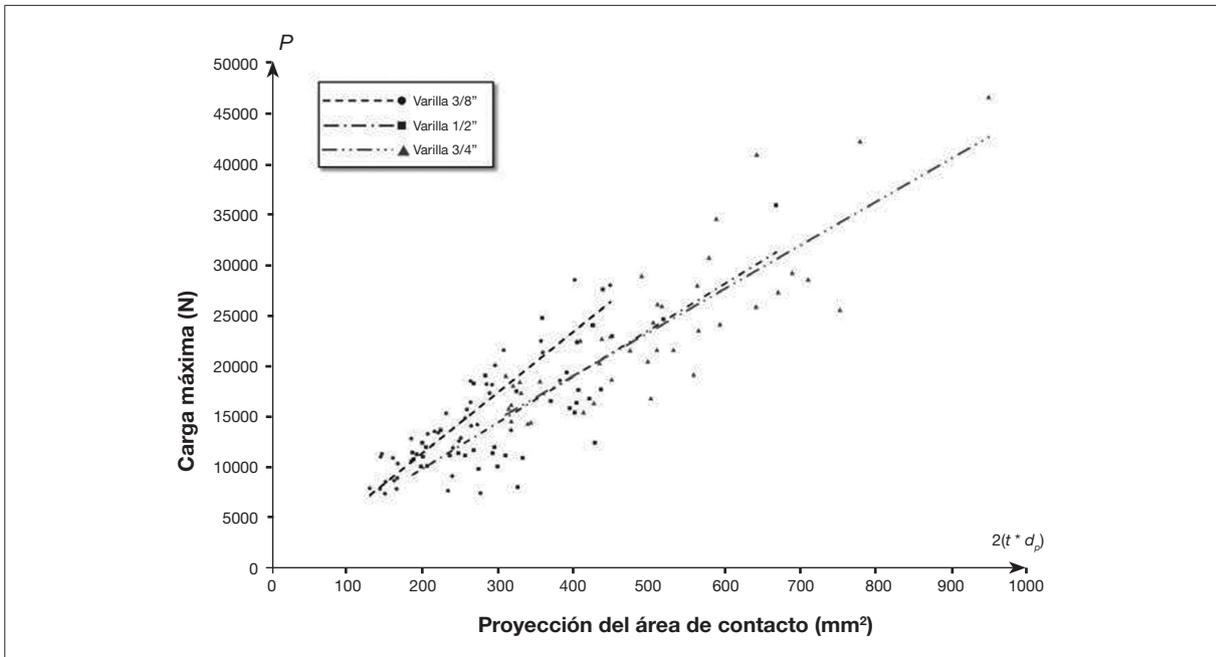


Figura 4. Carga máxima en función del área a compresión para diferentes diámetros de perno

Fuente: elaboración propia.

En la figura 5 se presenta el valor del promedio de los esfuerzos máximos a compresión y la desviación estándar para cada uno de los diámetros de perno. La resistencia decrece con el diámetro del perno; sin embargo, con pernos de mayor diámetro el valor tiende a estabilizarse alrededor del valor para la resistencia a la compresión determinado a partir de los ensayos de caracterización. La zona sombreada representa el intervalo de esfuerzo igual a una desviación estándar por encima y por debajo de la resistencia a la compresión paralela a la fibra. Las líneas punteadas corresponden al máximo y al mínimo valor de dicha resistencia, obtenidos en los ensayos de caracterización.

La figura 6 relaciona la carga máxima para cada espécimen con el espesor de la pared del culmo, para cada grupo de especímenes elaborados con el mismo diámetro de perno.

En la figura 7 se presentan los resultados de resistencia en función del diámetro exterior del canuto D_e , agrupados por diámetro del perno, con el fin de establecer una comparación con los valores propuestos por el reglamento NSR-10. En el reglamento NSR-10 no se encuentran disponibles valores para conexiones con pernos de 3/4", en su lugar se presentan los valores establecidos para pernos de 5/8".

De acuerdo con la figura 7, existe una correlación entre la resistencia a la cizalladura y el diámetro del culmo; sin embargo, el incremento de la resistencia que se presenta como función del diámetro, en realidad se encuentra relacionado con la tendencia a presentarse mayores espesores en culmos de mayor diámetro, como se muestra en la figura 8.

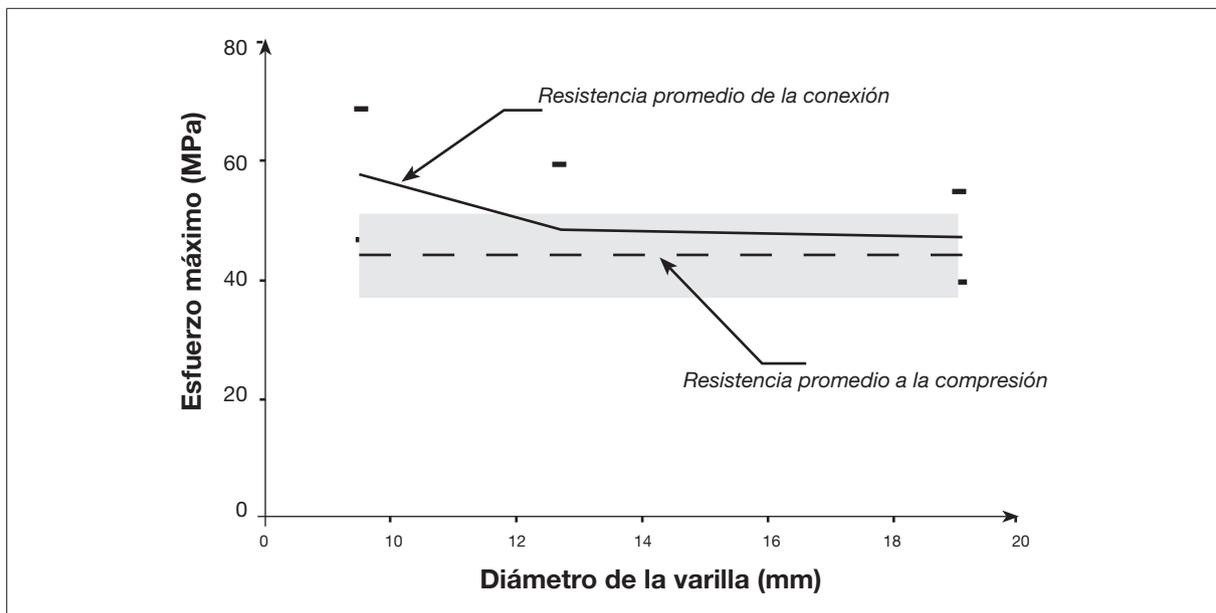


Figura 5. Resistencia a la cizalladura doble en función del diámetro del perno

Fuente: elaboración propia.

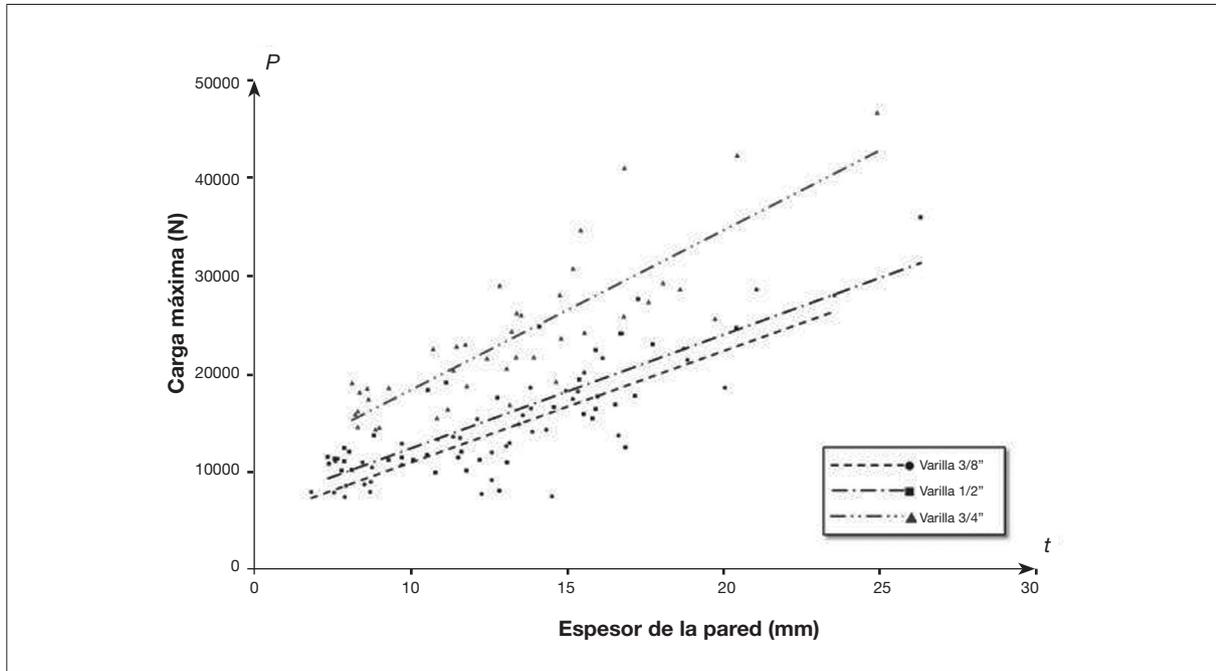


Figura 6. Resistencia a la cizalladura doble en función del diámetro del perno y del espesor de la pared del canuto
Fuente: elaboración propia.

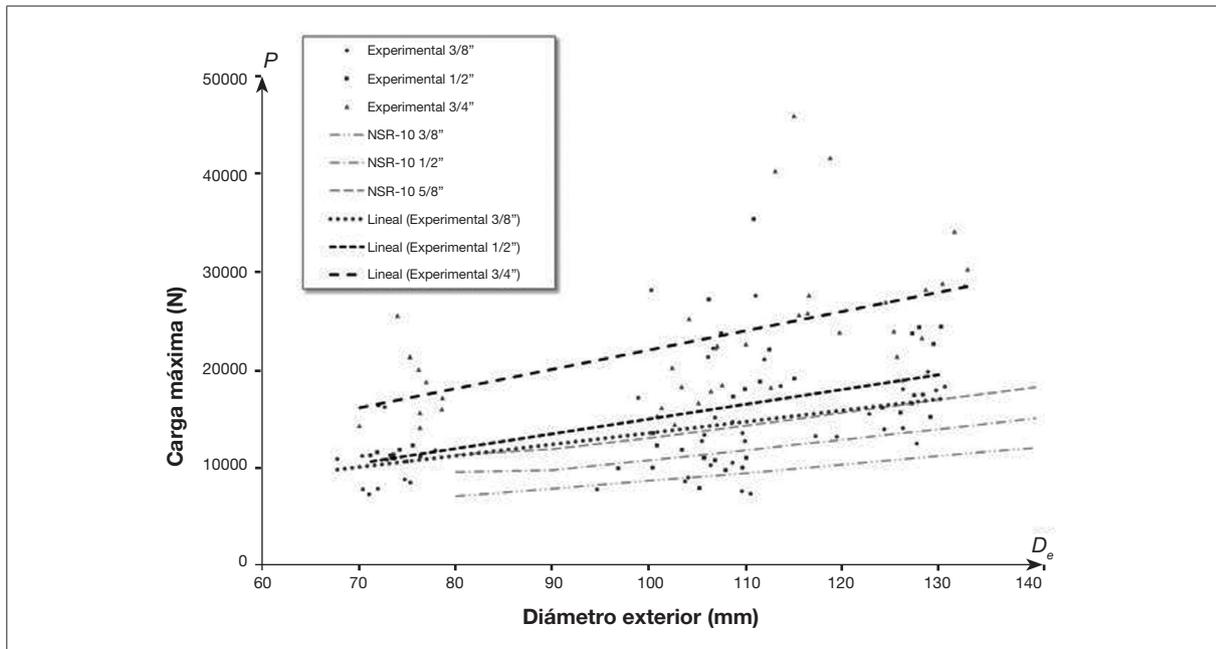


Figura 7. Resistencia a la cizalladura doble en función del diámetro del perno y del diámetro exterior del canuto
Fuente: elaboración propia.

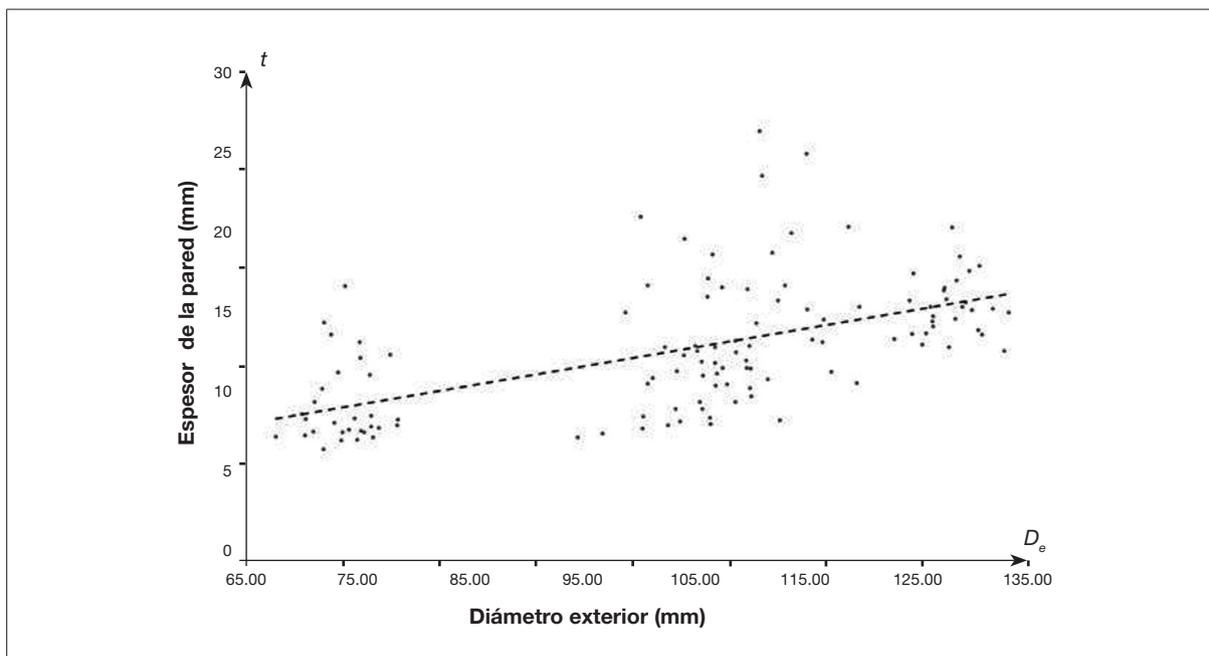


Figura 8. Espesor de la pared del culmo en función del diámetro exterior

Fuente: elaboración propia.

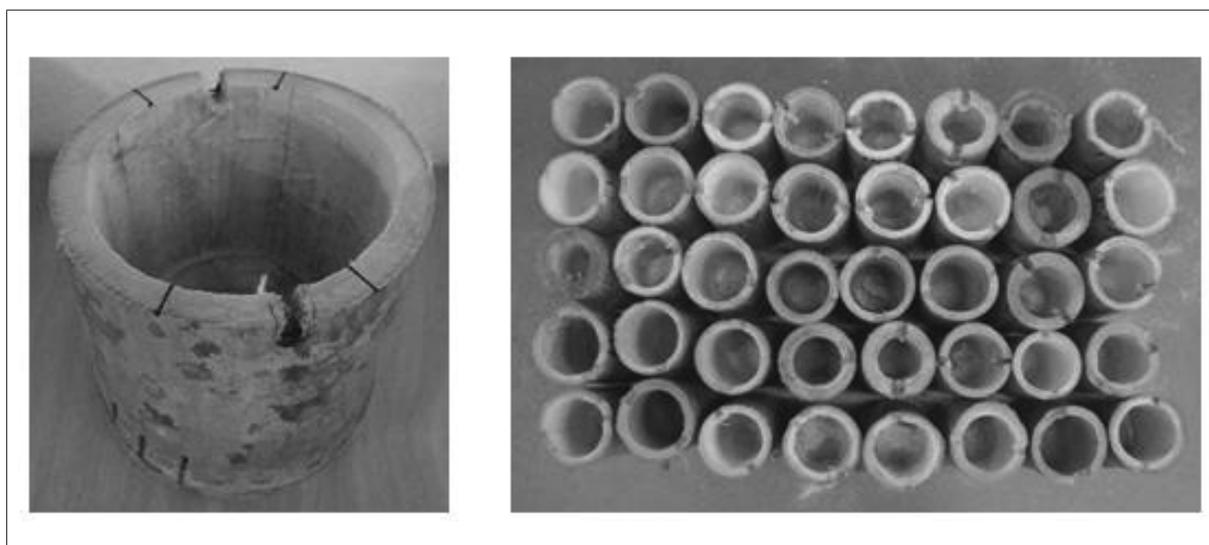


Figura 9. Diferentes espesores de pared en canutos de diámetro similar

Fuente: elaboración propia.

La alta dispersión de los resultados obtenidos experimentalmente se debe en gran parte a que para canutos con diámetros similares se puede tener un amplio rango de espesores de la pared, como se muestra en la figura 9.

CONCLUSIONES

La resistencia de una conexión empernada en *Guadua angustifolia*, solicitada a cizalladura doble paralela a la fibra, está directamente relacionada con la resistencia a la compresión paralela a la fibra y el área de contacto entre el perno y la pared del canuto de guadua.

La resistencia de las conexiones empernadas ensayadas en este trabajo presenta coeficientes de variación del 20% en promedio para los tres diámetros de perno empleados en la conexión.

Las conexiones desarrolladas con pernos de menor diámetro tienden a presentar una mayor resistencia por unidad de área de contacto. Sin embargo, la variación del máximo esfuerzo en función del diámetro del perno indica que este no es el único parámetro que interviene en la resistencia mecánica de la conexión.

La influencia del diámetro externo del culmo en la resistencia mecánica de la conexión está directamente relacionada con la tendencia de la guadua a presentar mayores espesores de pared cuando sus diámetros exteriores son mayores.

Los valores de resistencia a la cizalladura doble paralela a la fibra para una conexión empernada presentados en el reglamento NSR-10 corresponden a una correlación que presenta grandes dispersiones. Por esta razón, pueden ser demasiado conservadores.

Se recomienda modificar los valores establecidos en la tabla G.12.11-2 del reglamento NSR-10 para la resistencia de la conexión a cargas paralelas a la fibra, y establecer un procedimiento de cálculo de la resistencia que dependa directamente del espesor de la pared en lugar del diámetro externo del culmo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Universidad de La Salle por facilitar las instalaciones del laboratorio de mecánica estructural para la realización del programa experimental de esta investigación.

REFERENCIAS

- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*, Bogotá.
- Camacho Páez, H. (2002). *Estudio de conexiones en guadua solicitada a momento flector* (trabajo de grado). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Clavijo, S. y Trujillo, D. (2000). *Evaluación de uniones a tracción en guadua* (trabajo de grado). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Icontec) (2007). *Norma Técnica Colombiana 5525 Métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la Guadua Angustifolia Kunth*. Bogotá: Icontec.
- Lamus, F. (2008). *Calificación de una conexión viga-columna resistente a momento en Guadua* (trabajo de grado). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

investigación |

dua angustifolia (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Lamus, F. y Takeuchi, C. (2009). Determinación de la rigidez de un tipo de conexión viga-columna en *Guadua angustifolia*. *Epsilon*, 13, 193-204.

Plazas, M. (2013). *Estudio sobre la influencia del diámetro del perno en la resistencia*

al corte paralelo a la fibra en conexiones pernadas de Guadua angustifolia (trabajo de grado). Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá.

Prieto, R. (2004). *Optimización de unión en guadua ante fuerza sísmica* (tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

Influence of the void ratio and the confining on the static liquefaction in slopes in changi sand

Influencia de la relación de vacíos y el confinamiento en la licuación estática en taludes de arena de Changi

ALFONSO MARIANO RAMOS CAÑÓN

Ingeniero civil, magíster en Geotecnia, doctor en Ingeniería, profesor asociado de la Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

Contacto: a-ramos@javeriana.edu.co

Fecha de recepción: 21 de febrero del 2014

Clasificación del artículo: investigación

Fecha de aceptación: 15 de agosto del 2014

Financiamiento: Pontificia Universidad Javeriana

DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.1.a04>

Keywords: instabilities in sands, static liquefaction, stress anisotropy.

Palabras clave: anisotropía de esfuerzos, inestabilidades en arenas, licuación estática.

ABSTRACT

A numerical study on the onset of static liquefaction in slopes under undrained conditions of loading was developed based on a general liquefaction flow instability criterion for elastoplastic soils based on the concept of loss of controllability. The criterion is applied to the case of axisymmetric loading to detect the onset of static liquefaction. The criterion is used in conjunction with an elastoplastic model for sands and is tested by means of numerical simulations of element tests. The numerical results are compared with experimental evidence obtaining good agreement. A quantitative study of the influence of the mean pressure, void ratio and the anisotropy of stress on the onset of static liquefaction is presented for the Changi sand. From the analysis of the numerical results, it can be concluded that: a. the mobilized friction angle at the onset of liquefaction is not an intrinsic property of the material, but is a state variable b. Despite of the multiple variables

involved in the process of generation of undrained instability, the state of stresses at the onset of static liquefaction can be conveniently represented by a linear relation between $\Delta q/p_0$ and η_0 . This graphical representation can be used in the practice of geotechnical engineering to quantify the margin of security against the static liquefaction of a sandy slope.

RESUMEN

Se presenta un estudio numérico del inicio de la licuación estática en taludes, bajo condiciones no drenadas de carga, basado en un criterio de inestabilidad general para suelos elastoplásticos, fundamentado en el concepto de pérdida de controlabilidad. Se aplica el criterio al caso de carga axisimétrica, para detectar el punto de inicio de licuación con un modelo elastoplástico para arenas. Se comparan los resultados numéricos con

evidencia experimental, encontrando un buen nivel de concordancia. Se presenta un estudio cuantitativo de la influencia de la presión media, relación de vacíos y la anisotropía inicial de esfuerzos sobre el inicio de la licuación en la arena de Changi. Se concluye que: a) el ángulo de fricción movilizado al inicio de la licuación no es una propiedad del material, sino que es una variable de estado; b) a pesar de las múlti-

ples variables involucradas en el proceso de generación de inestabilidad no drenada, el estado de esfuerzos en el inicio de la licuación estática se puede representar convenientemente por una relación lineal entre $\Delta q/p_0$ y η_0 . Esta representación gráfica se puede usar en la práctica de la ingeniería geotécnica para cuantificar un margen de seguridad contra licuación estática de un talud arenoso.

* * *

INTRODUCTION

Failure of slopes under monotonic undrained conditions of loading is an instability process which occurs in loose sands. It is well known that the behavior of sands is greatly influenced by their initial conditions, such as the initial density and confining pressure (Hyodo, Tanimizu, Yasufuku, & Murata, 1994). A common approach used to tackle issues associated with liquefaction is based on phenomenology. Moreover, the most used methodologies for evaluating the potential of liquefaction are based on field test such as SPT and CPT (Youd *et al.*, 2001). These methodologies disregard important aspects like the anisotropy of stresses in the evaluation of susceptibility of liquefaction. An alternative and more rational way to understand the static liquefaction is based on sets of laboratory tests, and based on these results it's proposed a generalization of the behaviour. For example Wanatowski and Chu (2007) depict a relation between the stress ratio $\eta_L = q_L/p_L$ and void ratio for undrained triaxial tests isotropically and anisotropically compressed (q_L and p_L are the main pressure and the deviatoric stress in the onset of static liquefaction, respectively). On other hand, Chu and Wanatowski (2008) propose a mathematical equation between η_L and the Been-Jefferies critical state parameter ($\psi = e - e_c$). This equation is obtained by assum-

ing that the increase of plastic volumetrics strain is equal to the increase of total volumetric strain and both of them are equal to zero in the peak of deviatoric stress. It means that the dilatancy is zero in the peak of undrained effective stress path. However, Lade (1994) demonstrates that sands subjected to undrained loading show a behavior that must be modelled by a flow rule highly non associative. A similar approximation for detecting the onset of static liquefaction is to characterize the instability line for a specific type of sand. The instability line can be defined as the boundary in which large strains are rapidly generated due to the inability of a soil element to sustain a given stress or load (Chu, Leroueil, & Leong, 2003). The instability line was firstly proposed by Vaid and Chern (1985) defining it as the locus of points at which flow liquefaction is initiated for the same initial void ratio under monotonic undrained triaxial tests. Many researchers have analysed the instability line (Lade, 1994; Chu & Wanatowski, 2008; Chu, Leroueil, & Leong, 2003; Wanatowski & Chu, 2007; Hyodo, Tanimizu, Yasufuku, & Murata, 1994; Andrade, 2009; Andrade, Ramos, & Lizcano, 2013). Andrade (2009) and Ramos, Andrade and Lizcano (2011) using two different elastoplastic constitutive models concluded that the slope of the instability line is not a constant of the material but it is a state parameter.

In this work, a criterion for detecting the onset of static liquefaction derived by Andrade, Ramos and Lizcano (2013) and Ramos, Andrade and Lizcano (2011) was extended to an isotropic elastoplastic constitutive model with kinematic hardening and bounding surface theory (Manzari-Dafalias model). The application of this criterion matches very well with experiments reported in the literature, allowing to generate numerical simulation for different conditions with a high level of confidence. By making use of numerical simulations previously validated with experiments, it is possible to supply the deficiency of the experimental approximation and to have a greater spectrum of the behavior of the sandy slopes subjected to static liquefaction. As result, the influence of void ratio, mean pressure and initial anisotropy on the onset of static liquefaction is investigated. Finally, despite of the multiple variables involved in the process of generation of static liquefaction, the behavior of the sand can be condensed in a linear relation between $\Delta q/p_0$ and η_0 . This kind of relation can be used in the practice of geotechnical engineering to quantify the degree of security of a slope given the initial conditions of stress and void ratio.

The paper is organized as follow. The first section of this paper shows the instability criterion for detecting the onset of static liquefaction using the Manzari-Dafalias elastoplastic constitutive model. The 'Validation' section presents numerical simulations for prediction of static liquefaction and compares them with laboratory experiments. Finally, the influence of the void ratio, mean pressure and the initial stress anisotropy on the onset of static liquefaction is presented based on several simulations conducted with the constitutive model and the instability criterion. Findings from the application of the criterion are highlighted in the 'Conclusions' section.

STATIC LIQUEFACTION CRITERIONS AND CONSTITUTIVE MODEL

For the sake of simplicity, we limit the following derivation to infinitesimal strains and axisymmetric undrained conditions. Assuming a rate form for the constitutive model equation (1), the relation among the effective stress rate and the total strain rate can be written as

$$\begin{Bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{pp} & C_{pq} \\ C_{qp} & C_{qq} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\epsilon}_v \\ \dot{\epsilon}_B \end{Bmatrix} \quad (1)$$

where $\dot{\epsilon}_s = 2/3(\dot{\epsilon}_a + \dot{\epsilon}_r)$ is the volumetric strain rate, and $\dot{\epsilon}_s = 2/3(\dot{\epsilon}_a + \dot{\epsilon}_r)$ is the deviatoric component of the strain rate. Also, $\dot{p} = 1/3(\dot{\sigma}_a + 2\dot{\sigma}_r)$ is the effective pressure rate and $\dot{q} = \dot{\sigma}_a - \dot{\sigma}_r$ is the deviatoric stress rate. We note the usage of Cambridge $p - q$ stress invariants to describe triaxial conditions. Finally, $\dot{\sigma}_a$ is the axial total stress rate and $\dot{\sigma}_r$ is its radial counterpart.

Following the concept of loss of controllability for elemental test conditions (Nova, 1994), the volumetric strain rate and the deviatoric stress rate under triaxial conditions can be controlled giving pressure increments and shear strain increments, equation (2), such that

$$\begin{Bmatrix} \dot{\epsilon}_v \\ \dot{q} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{pp}^{-1} & C_{pq}C_{pp}^{-1} \\ C_{qp}C_{pp}^{-1} & C_{qq} - C_{pq}C_{qp}C_{pp}^{-1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{p} \\ \dot{\epsilon}_s \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Here, we look for the vanishing of the determinant of the matrix relating the controlled variables on the left to the emerging or responding variables on the right. The requirement of singularity implies $C_{qq} / C_{pp} = 0$ which requires

$$C_{qq} = 0 \quad (3)$$

This condition, equation (3), will furnish a general criterion for detecting static liquefaction instability in terms of loss of controllability. Andrade *et al* (2012) demonstrated the similarity of the loss of controllability with the concept of loss of uniqueness and the second order work (Darve & Laouafa, 2000). We will adapt this general criterion to the case of the Dafalias and Manzari (2004) constitutive model. Now, the Dafalias and Manzari (2004) model will be briefly described. For a complete description of the model, interested readers are referred (Manzari & Dafalias, 1997; Dafalias & Manzari, 2004). The constitutive model is framed in the critical state soil mechanics concept (Schofield, 1968), and the elastic response is hypoelastic. The shear and bulk moduli are given by equation (4).

$$G = G_0 p_{at} \frac{(2.97 - e)^2}{1 + e} \left(\frac{p}{p_{at}} \right)^{1/2} \text{ and}$$

$$K = \frac{2(1 + \nu)}{3(1 - 2\nu)} G \quad (4)$$

where G_0 is a constant, ν is Poisson's ratio, e is the current void ratio, and p_{at} is the atmospheric pressure. The elastic region is enclosed by a yield surface in effective stress space which defines a wedge, equation (5).

$$F(\eta, \alpha) = |\eta - \alpha| - m \quad (5)$$

with $\eta = q/p$ as the stress ratio, α as the back stress, and m as a constant defining the width of the wedge so that in $p - q$ space, the wedge has an opening of $2mp$ at any value p . The inclination of the wedge defining the elastic region is given by the back stress, equation (6) whose evolution is governed by a kinematic hardening law

$$\dot{\alpha} = H \dot{\epsilon}_s^p \quad (6)$$

where H is the hardening modulus. To complete the description of the constitutive model, evolution of the hardening modulus H and dilatancy β must still be explained. The hardening modulus, equation (7), is a function of the state of the material whose sign is controlled by its relative distance to the bounding stress, i.e.,

$$H = h(M^b - \eta) \text{ with}$$

$$h = \frac{G_0 h_0 (1 - c_h e)}{|\eta - \eta_{in}|} \left(\frac{p}{p_{at}} \right)^{-1/2} \quad (7)$$

where h is a positive function, M^b is the bounding stress ratio, and h_0 and c_h are positive constants. The evolution of the dilatancy, equation (8), is given by a function similar to that of the hardening modulus, with the sign of the function dictated by its distance to the dilatancy stress so that

$$\beta = A_d (M^d - \eta) \quad (8)$$

with M^d as the dilatancy stress ratio. When the value of h is less than the value of M^d , response is contractive. For all other cases the model predicts dilation. The positive scaling function for dilatancy A_d , equation (9), is affected by changes in fabric such that

$$A_d = A_0 (1 + \langle sz \rangle) \text{ with}$$

$$Z = -Cz \langle -\dot{\epsilon}_v^p \rangle (SZ_{\max} + Z) \quad (9)$$

where A_0 is a positive constant and $s = \pm 1$ according to $\eta = \alpha \pm m$. The brackets $\langle \rangle$ are Macaulay brackets representing as $\langle \text{value} \rangle = \text{value}$ if $\text{value} > 0$ or $\langle \text{value} \rangle = 0$ if $\text{value} \leq 0$. In addition, Z_{\max} represents the maximum possible value of the state parameter z . The model is made to comply with critical state soil mechanics by postulating exponential evolution equations for the bounding and dilatancy stress ratios, equation (10). They are respectively,

$$M^b = M \exp(-n^b \psi) \text{ and}$$

$$M^d = M \exp(-n^d \psi) \quad (10)$$

with n^b and n^d as positive constants. Conceptually, the evolution equations shown above require M^b and M^d to coincide with M as $y \rightarrow 0$, requiring its state to tend to critical state. The state parameter $\psi = e - e_c$ was defined by Been and Jefferies (1985) and measures the distance to the critical state from the current state in void ratio space. Finally, the critical state line is defined in void ratio space according to the relationship proposed by Li and Wang (1998), equation (11)

$$e_c = e_{c0} - \lambda_c \left(\frac{p_c}{p_{at}} \right)^\zeta \quad (11)$$

with e_{c0} as the void ratio at $p_c = 0$ and λ_c and ζ as constants.

In order to present a self-content paper, the derivation of the static liquefaction criterion will be summarized. However its original development was proposed by the same authors of this paper in Andrade, Ramos and Lizcano (2013).

The Dafalias and Manzari (2004) constitutive model can be seen in the matrix form of Equation (1) by re-sorting the additive decomposition of incremental stress-strain relation as follows, equation (12) and equation (13)

$$\dot{\epsilon}_s^e = \frac{\dot{q}}{3G} \quad \dot{\epsilon}_v^e = \frac{\dot{p}}{K} \quad (12)$$

$$\dot{\epsilon}_s^p = \frac{\dot{\eta}}{H} \quad \dot{\epsilon}_v^p = \beta \left| \dot{\epsilon}_s^p \right| \quad (13)$$

Superscripts e and p denote the elastic and plastic part of strains. The increment in stress ratio is calculated as $\dot{\eta} = -\eta / p \dot{p} + \dot{q} / p$, where $\eta = q/p$. Based on the rates of total volumetric and deviatoric strains, equation (1) especially adapted

to the Dafalias and Manzari (2004) constitutive model reads, equation (14)

$$\begin{Bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \end{Bmatrix} = \frac{1}{x} \begin{bmatrix} 3KG + KHp & -3KG\beta \text{sgn}(\dot{\epsilon}_s^p) \\ 3KG\eta & 3GHp - 3KG\beta\eta \text{sgn}(\dot{\epsilon}_s^p) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\epsilon}_v \\ \dot{\epsilon}_s \end{Bmatrix} \quad (14)$$

where, $\chi = 3G + Hp - K\beta\eta \text{sgn}(\dot{\epsilon}_s^p)$. Equation (3), which indicates loss of controllability and the onset of static liquefaction, when especially adapted to the Dafalias and Manzari model is, equation (15)

$$C_{qq} = \frac{3G(Hp - K\beta\eta \text{sgn}(\dot{\epsilon}_s^p))}{x} = 0 \quad (15)$$

which, to be true in general, requires the quantity inside the parenthesis to vanish. In elastoplastic models the hardening modulus H is an indicator of the soil state. Andrade (2009) deduced a critical hardening modulus as a predictor of static liquefaction for an elastoplastic constitutive model with two invariants. From equation (15) a closed form of the hardening modulus that is able to detect the onset of static liquefaction can be derived (Andrade, Ramos, & Lizcano, 2013), equation (16).

$$H_L = \frac{K\beta\eta}{p} \text{sgn} C_{qq} = \dot{\epsilon}_s^p \quad (16)$$

At the moment when the hardening modulus equals the critical hardening modulus ($H - H_L = 0$) instability occurs in the form of static liquefaction.

Validation of the criterion for detecting static liquefaction under anisotropic initial conditions of stress was given in Ramos, Andrade and Lizcano (2011). Ramos, Andrade and Lizcano (2011) developed numerical simulations using the generalized static liquefaction criterion introduced in equation (3) and adapted to the Manzari-Dafalias model utilizing the limiting hardening modulus encapsulated in equation (16). The anisotropic

initial conditions of stress is representative of the conditions of stress in a slope which can be represented in the $q - p$ space of stress by mean of $q \neq 0$ and $p \neq 0$. Wanatowski and Chu (2007) report a comprehensive set of triaxial and biaxial tests in Changi sand under both, isotropically and anisotropically compressed, and sheared under undrained conditions of loading. These sets of experiments generated a great opportunity to check the performance of the criterion (Eq.16) to detect the onset of static liquefaction. Parameters for the elastoplastic constitutive model were calibrated based on the sets of experiments reported by Leong, Chu and the (2000) (table 1).

Table 1. Material Parameters for the Manzari-Dafalias Model for Changi sand

	Constant	Changi Sand
Elasticity	G_0	125
	ν	0.05
Critical State	M	1.35
	λ_c	0.0919
	E_{c0}	0.963
	Ξ	0.4
Yield Surface	m	0.05
Plastic Modulus	h_0	5
	C_h	0.8
	n^b	1.1
Dilatancy	A_0	1.54
	n^d	3.5
Dilatancy-fabric	Z_{max}	4
	C_z	600

Source: Leong et al. (2000).

(Ramos, Andrade and Lizcano (2011) simulated two isotropically compressed triaxial tests CU ($p_0 = 150$ kPa, $q_0 = 0$ kPa, $e_c = 0.916$); ($p_0 = 150$ kPa, $q_0 = 0$ kPa, $e_c = 0.888$) and three triaxial compression test anisotropically compressed under a k_0 stress path K0U ($p_0 = 191.22$ kPa, $q_0 = 152.83$ kPa, $e_c = 0.899$; ($p_0 = 199.57$ kPa,

$q_0 = 147.78$ kPa, $e_c = 0.922$); ($p_0 = 199.93$ kPa, $q_0 = 183.28$ kPa, $e_c = 0.88$) using the elastoplastic constitutive model and the parameters of the table 1. Onset of liquefaction is obtained by mean of the application of the critical hardening modulus. Reasonable agreement between the experiment and the simulation was reported by Ramos, Andrade and Lizcano (2011).

RESULTS

Once verified the performance of elastoplastic constitutive model as well as the criterion for detecting the onset of static liquefaction under both, isotropic and anisotropic initial conditions by mean of comparisons with experiments under triaxial conditions of loading (Ramos, Andrade, & Lizcano, 2011), a number of simulations were carried out in order to study the influence of the void ratio, the confining pressure, and the initial stress ratio $\eta_0 = q_0/p_0$ on the onset of static liquefaction. Figure 1a depicts the stress ratio in the onset of static liquefaction $\eta_L = q_L/p_L$ versus the void ratio for six different mean pressures and the same initial stress ratio $\eta_0 = q_0/p_0$.

From figures 1a and 1b it is possible to observe that for a given η_0 , the higher the mean pressure, the lower the stress ratio at the onset of static liquefaction η_L . However, it was observed that the deviatoric stress q_L is larger for larger mean pressure. If the mean pressure is kept constant, the looser the sand, the lower η_L . Also, it is observed that for the same void ratio, the stress ratio at the onset of static liquefaction η_L is different. This means that η_L is not a constant of the material, what was originally proposed by Vaid and Chern, (1985) in terms of a constant mobilized friction angle. Using an elastoplastic constitutive model with kinematic hardening, Andrade (2009) and Ramos, Andrade and Lizcano (2011) demonstrated that η_L is not constant but state variable.

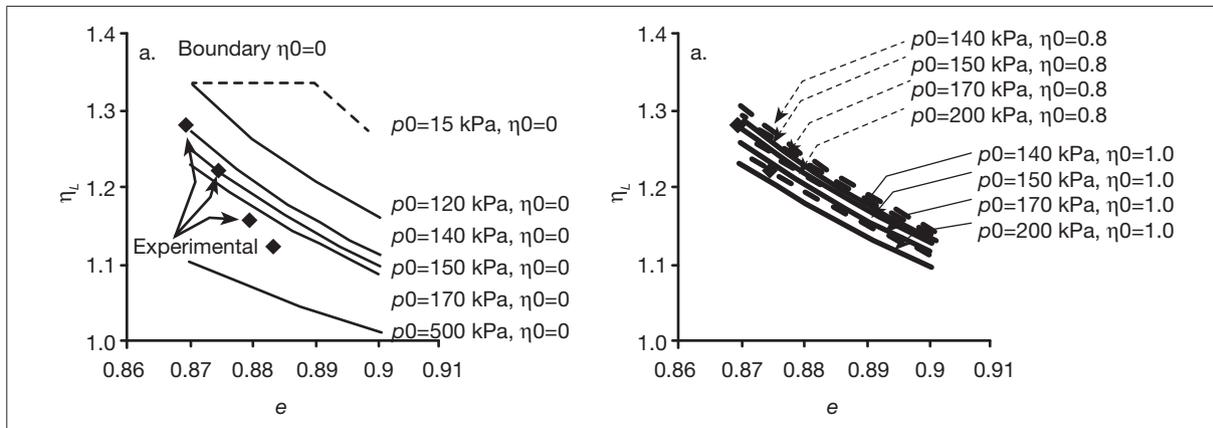


Figure 1. Influence of the mean pressure and the initial void ratio on the onset of flow. **a)** Initial conditions $\eta_0 = 0$. Mean pressures of the experiments developed by Wanatowski and Chu (2007) are in the range of $p_0 = 150$ kPa to $p_0 = 200$ kPa. Source: Ramos, Andrade and Lizcano (2011) **b)** Initial stress conditions $\eta_0 = 0.8$ and $\eta_0 = 1.0$

Source: own work.

Also, an upper boundary in the figure 1a is found for $\eta_0 = 0$. A similar upper limit can be derived for different values of η_0 . It is not possible to indefinitely diminish the mean pressure in order to get a higher value of η_L keeping constant the void ratio. Points above the upper boundary will show a strain hardening behavior. This upper boundary is given by the lower mean pressure that a sample can support in order to develop static liquefaction for a given void ratio. The curve for $p_0 = 15$ kPa – $\eta_0 = 0$ is also a boundary which separates the behavior between the static liquefaction and strain hardening.

An explanation for the upper boundary can be given by resorting to the critical state parameter $\psi = e - e_c$ proposed by Been and Jefferies (1985). The state parameter is a measurement of the distance between the current void ratio and the void ratio in the critical state for a given value of mean pressure. Negative values of ψ are expected for strain hardening materials, and positive values are for strain softening. Materials with the ability to suffering static liquefaction have always $\psi > 0$. Let's suppose a material with a given initial

void ratio and a confining pressure such that ψ is larger than zero. As the mean pressure decreases, the state variable ψ also reduces. If the confining pressure is enough low, ψ can become negative, i.e. when the mean pressure diminishes, the material can change of having a contractive behavior to dilative one, and the material will not tend to undergo static liquefaction.

The upper boundary has values near to 1.35 for h_0 , which is the slope of the critical state line in the qp space of stress. This means that for low values of mean pressure p , the onset of static liquefaction η_L is located very near to the critical state line. The critical state line departs from the origin the qp space of stress. The aspects previously mentioned could indicate that the instability line across the origin of coordinates. However, the strain softening behavior is limited by a certain value of mean pressure larger than zero for a given void ratio. In this case, the sample changes its behavior and it begins to build up negative pore pressures, indicating that the material has strain hardening behavior. Therefore, the instability line could be projected onto the origin of coordinates in the qp

space of stress for small values of mean pressure, although it will not have a geometric place in the origin in the qp space of stress.

Wanatowski and Chu (2007) presented a line connecting the experimental points of figure 2a which relates the void ratios and the stress ratio at the onset of static liquefaction η_L in triaxial test for mean pressures ranging between $p_0 = 150 - 200$ kPa. They argue in favour of that linear relation because of the narrow range of mean pressures used for the experiments. Each experiment corresponds to a different mean pressure. This means that a curve joining the experimental points would be crossed by curves of constant p_0 , as shown in 2a. Consequently, there is not only one line in the $\eta_L - e$ space, but, a family of curves for different mean pressures for each initial conditions of stress η_0 . This hypothesis was confirmed with the experiments performed by Wanatowski and Chu (2007). On the other hand, the instability line can be easily constructed with the data from figure 1 by drawing a vertical cross section at a given void ratio (i.e. $e = 0.89$). It is possible to observe that the instability line is not a straight line, as it was proposed by Vaid and Chern (1985), but it is a curve, i.e. the mobilized friction angle at the onset of static liquefaction is not a constant. This clearly means that the instability line is not an intrinsic property of the material. Andrade (2009) and Ramos, Andrade and Lizcano (2011) demonstrated that the ratio of stress at the onset of liquefaction η_L is not a constant for two different elastoplastic constitutive models. Figure 2 shows a plot of the ratio of deviatoric stress Δq normalized with initial mean pressure p_0 versus initial void ratio for different initial stress ratios η_0 . Δq is defined as $q_L - q_0$.

One might assimilate that the larger η_0 , the steeper the slope for a given depth i.e., constant mean pressure p_0 . Different values of η_0 are representative of the anisotropy of the initial stress. By comparison of different η_0 for a given void ratio and mean pressure in the figure 2, it is observed that

the larger η_0 , the lower normalized increment of deviatoric stress $\Delta q/p_0$. This means that a steeper slope will have the chance of experimenting static liquefaction with a lower increment of deviatoric stress. It is easier that a steeper slope static liquefied experiments static liquefaction than a smooth slope. Therefore, the anisotropy of stress η_0 plays an important role in the stability of sandy slopes. In addition, concordantly with the trend observed in the figure 1, one can see that for a given η_0 and an initial void ratio, the larger the mean pressure, the lower the ratio of normalized deviatoric stress. This means that for an homogeneous slope (both void ratio and slope constant), the deeper, the lower the ratio of normalized deviatoric stress $\Delta q/p_0$. However, the deviatoric stresses q_L needed to produce static liquefaction are higher.

Conversely, the higher the initial stress η_0 , the lower the influence of the mean pressure. This means that a slope with high inclination will suffer static liquefaction under similar values of normalized ratio of deviatoric stress $\Delta q/p_0$ independently of the mean pressure. (Note that the curves for $\eta_0 = 1$ are closer to each other than the curves for $\eta_0 = 0$).

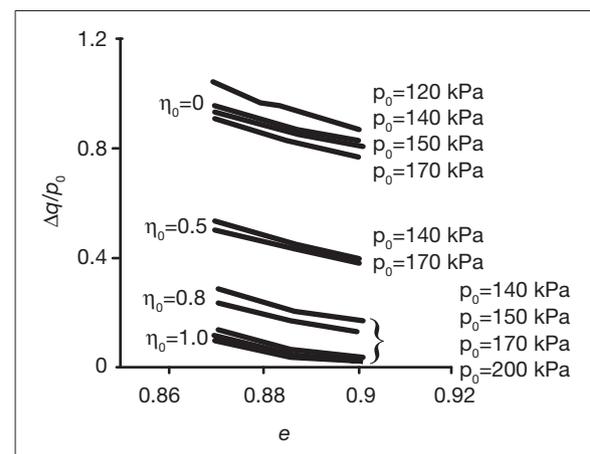


Figure 2. Influence of the anisotropy of the initial stress η_0 and the confining pressure p_0 on the onset of static liquefaction

Source: own work.

By definition, $\Delta q/p_0$ cannot reach negative values because $q_L \geq q_0$ and $p_0 > 0$. When $\Delta q/p_0 = 0$, it means that the material is intrinsically unstable: no additional deviatoric stress needs to be applied to unleash static liquefaction. In this case, the initial stresses are located inside the zone of potential instability proposed by Lade (1994). This zone is called “potential” because the state of the material can be inside this zone under drained conditions, i.e. the formation process of the slope can lead to an in situ stress state that may lie within the potential instability zone. However, if external forces are applied fast enough and cause an undrained loading process, the material will undergo instability in the form of static liquefaction. Also, it is worth noting that due to the negative slope in the curves of figure 3, a material is intrinsically unstable if it has high values of η_0 (slopes with high inclinations) and if it is in a very loose state. When the void ratio is increased, a lower value of normalized ratio of deviatoric stress $\Delta q/p_0$ is necessary in order to produce static liquefaction under constant mean pressure and initial stress ratio. This would mean that it is necessary to develop lower deviatoric stresses in softer material than in a denser material under the same conditions of

both inclination of the slope and depth. Results of figure 2 previously analyzed show a general panorama of the behavior of sandy slopes with possible static liquefaction. An alternative way to represent the aforementioned analyzed data is shown in figure 3.

Figure 3 shows the normalized deviatoric stress ratio $\Delta q/p_0$ versus the initial stress ratio $\eta_0 = q_0/p_0$ for different void ratios and mean pressures p_0 . Additional to the remarks previously made, some additional observations can be proposed. Through comparison between figures 3a and 3c, it can be seen that the higher the mean pressure, the lower the influence of the void ratio. The separation between the curves for a given void ratio is narrower in figure 3c than in figure 3a. A more important aspect can be derived from figure 3. All the variables studied in this work are included in figure 3 (anisotropy of stresses, void ratio and mean pressure) and despite the somehow intricate behavior of the samples at the onset of static liquefaction, the results might be condensed in a straight line. For this range of mean pressures and void ratios, the possibility of static liquefaction does not show great variability, because the influ-

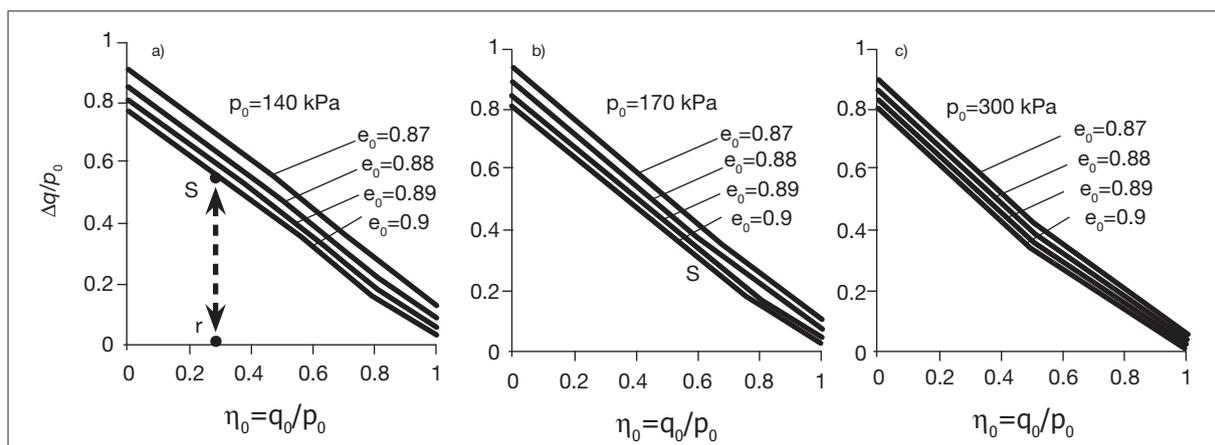


Figure 3. Onset of static liquefaction in terms of normalized deviatoric stress q/p_0 versus initial stress ratio $\eta_0 = q_0/p_0$ for different void ratios. **a)** $p_0 = 140$ kPa; **b)** $p_0 = 170$ kPa; **c)** $p_0 = 300$ kPa

Source: own work.

ence of the mean pressure is hidden when both, the abscissas and the ordinates are normalized. These types of graphs can be used as an indicator of the degree of safety of the slope because the abscissas are the initial conditions of stresses and the ordinates give the stresses needed to cause the instability by means of static liquefaction. Based on the know ledge of some basic characteristics of the slope, for example inclination, unit weight, ground water level and depth of the layer that one would like to analyse, it is possible to estimate the initial stress state h_0 . For example, we assume that for a given slope and a given layer for analysis, a point r in the abscissa of figure 3a can be located. Then, the distance $\Delta q/p_0$ measured along the vertical line linking the point r and the ordinate of the correspondenting void ratio curve (point s) would help to estimate the maximum over burden pressure that can be quickly and monotonically applied to the slope before reaching instability in the form of static liquefaction. Then, $\Delta q/p_0$ could be used as an indicator of the slope's margin of safety.

CONCLUSIONS

Once, both the constitutive model and the liquefaction criterion have been successfully tested, the following remarks can be stated:

There is no a unique relationship between the stress ratio at the onset of static liquefaction $\eta_L = q_L/p_L$ and the void ratio. This relationship depends not only on the mean pressure but also on the initial anisotropy of stresses.

Numerical and experimental evidence show that the well known instability line proposed by Vaid and Chern (1985) and Lade (1994) is not a straight line, but a curve in the $p - q$ stress space which can be projected from the origin for Changi sand. This means that η_L is not an intrinsic property of the material. Therefore, it is not possible to assume that the mobilized friction angle at the onset of static of liquefaction is constant.

A quantification of the influence of the void ratio, mean pressure and anisotropy of stresses on the onset of static liquefaction for Changis and is presented. A similar procedure can be used for any sandy material. This methodology, based on the loss of controllability, takes into account more aspects that influence the undrained response, than simplified methods based only on phenomenology.

The most important novel aspect tackled in this paper is that despite many factors that influence the onset of static liquefaction, the behavior of the analysed sand might be condensed and described approximately by a straight line in a normalized graph of $\Delta q/p_0$ versus η_0 . This type of plot can be used in the practice of geotechnical engineering as an indicator of slope margin of safety against static liquefaction.

ACKNOWLEDGMENTS

The first author acknowledges the financial support given to this work by Pontificia Universidad Javeriana- Colombia. Grant number 004709 "Instabilities in granular matter".

REFERENCES

Andrade, J. (2009). A Predictive Framework for Liquefaction Instability. *Geotechnique*, 59 (8), 673-682.

Andrade, J. E., Ramos, A., & Lizcano, A. (2013). Criterion for Flow Liquefaction Instability. *Acta Geotechnica*, 8 (5), 525-535.

- Been, K. & Jefferies, M. (1985). State Parameter for Sands. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 22 (6).
- Chu, J., & Wanatowski, D. (2008). Instability Conditions of Loose Sand in Plane Strain. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134 (1), 136-142.
- Chu, J., Leroueil, S. & Leong, W. (2003). Unstable Behaviour of Sand and its Implications for Slope Instability. *Canadian Geotechnical Journal*, 40, 873-885.
- Dafalias, Y., & Manzari, M. (2004). Simple Plasticity Sand Model Accounting for Fabric Change Effects. *Journal of Engineering Mechanics*, 130 (6), 622-633.
- Darve, F. & Laouafa, F. (2000). Instabilities in Granular Materials and Application to Landslides. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, 5 (8), 627-652.
- Hyodo, M., Tanimizu, H., Yasufuku, N. & Murata, H. (1994). Undrained Cyclic and Monotonic Triaxial Behaviour of Saturated Loose Sand. *Soils and Foundations*, 34 (1), 19-32.
- Lade, P. (1994). Instability and Liquefaction of Granular Materials. *Computers and Geotechnics*, 16 (2), 123-151.
- Leong, W., Chu, J., & Teh, I. (2000). Liquefaction and Instability of a Granular Fill. *Geotechnical Testing Journal*, 23 (2), 178-192.
- Manzari, M. & Dafalias, Y. (1997). A Critical State Two-Surface Plasticity Model for Sands. *Géotechnique*, 47 (2), 255-272.
- Nova, R. (1994). Controllability of the Incremental Response of Soil Specimens Subjected to Arbitrary Loading Programs. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 5(2), 193-201.
- Ramos, A., Andrade, J. E., & Lizcano, A. (2011). Numerical Simulations of the Instability Line. *DYNA*, 78 (2), 24-30.
- Schofield, C. (1968). *Critical State Soil Mechanics*. Nueva York: McGraw-Hill.
- Vaid, Y., & Chern, J. (1985). Cyclic and Monotonic Undrained Response of Saturated Sands. Advances in the Art of Testing Soils under Cyclic Conditions. *ASCE*, 120-147.
- Wanatowski, D., & Chu, J. (2007). Static Liquefaction of Sand in Plane Strain. *Canadian Geotechnical Journal*, 44 (3), 299-313.
- Wood, M. (1994). Strain Softening and State Parameter for Sand Modelling. *Géotechnique*, 44 (2), 335-339.
- Youd, T., Idriss, I., Andrus, R., Arango, I., Castro, G., Stokoe, K. *et al.* (2001). Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127 (10), 817-833.

Comportamiento a fatiga de mezclas asfálticas colombianas con adición de pavimento reciclado al 100%

Fatigue behavior of asphalt mixtures colombian with addition recycled pavement asphalt to 100%

NEIDY BETSSEY PATIÑO BOYACÁ

Ingeniera civil, auxiliar de investigación del Grupo Geotecnia de la Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.

Contacto: U1100865@unimilitar.edu.co

OSCAR JAVIER REYES-ORTIZ

Ingeniero civil, magíster en Ingeniería Civil, doctor en Ingeniería, profesor titular de la Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.

Contacto: oscar.reyes@unimilitar.edu.co

JAVIER FERNANDO CAMACHO-TAUTA

Ingeniero civil, magíster en Ingeniería Civil, doctor en Ingeniería, profesor asociado de la Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.

Contacto: javier.camacho@unimilitar.edu.co

Fecha de recepción: 29 de agosto de 2013

Clasificación del artículo: investigación

Fecha de aceptación: 2 de mayo de 2014

Financiamiento: Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad Militar Nueva Granada

DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.1.a05>

Palabras clave: asfalto, granulometría, ley de fatiga, pavimento asfalto reciclado (RAP), rigidez.

Keywords: fatigue law, gradation asphalt, recycled asphalt pavement (RAP) and stiffness.

RESUMEN

Esta investigación se desarrolló con el objetivo de establecer el comportamiento a fatiga de mezclas asfálticas con granulometrías MD20 del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) y MDC 2 del Instituto Nacional de Vías (Invias), con adición de granular reciclado de pavimento flexible (RAP) con asfaltos de penetración 60/70 y 80/100. La primera etapa consistió en caracterizar el asfalto

y el RAP además de calcular el porcentaje óptimo de asfalto para adicionar a las mezclas con RAP 100%. A continuación, se fabricaron probetas trapezoidales con las diferentes granulometrías y tipos de asfalto, para finalmente ser ensayadas a fatiga a diferentes deformaciones. Entre los resultados encontrados se determinó que las mezclas analizadas tienen una alta rigidez, aunque esta varía según el asfalto utilizado, y que la mezcla con

mejor vida a fatiga respecto a las estudiadas es la MDC-2 con asfalto 80/100.

ABSTRACT

This research was conducted in order to establish the fatigue behavior of asphalt mixtures with gradations MD20 Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) and MDC 2 of The Instituto Nacional de Vías (INVIAS), with addition of recycled granular flexible pavement (RAP) with asphalt of

penetration 60/70 and 80/100. The first step was to characterize the asphalt and RAP as well as calculate the optimum percentage of asphalt to be added to 100% RAP mixtures. Then samples were fabricated with different trapezoidal gradations and asphalt, to be tested finally fatigue at different deformations. Among the results found, it was determined that the tested mixtures have a high stiffness; although, it varies depending on the asphalt mix used and that the best fatigue life with respect to those studied is the MDC-2 with bitumen 80/100.

* * *

INTRODUCCIÓN

Los pavimentos deteriorados se pueden recuperar mediante el proceso de fresado, y el material obtenido se puede usar para fabricar nuevas mezclas asfálticas, siendo esta una técnica económica y medioambiental muy rentable. Este procedimiento aprovecha el material desechado no renovable y genera la utilización de árido virgen en menor porcentaje (Marantzidis y Giraldo, 2011). En países europeos el uso de pavimentos asfálticos reciclados (RAP) es una práctica común. Según estudios de la EAPA, cada año se reutilizan y reciclan alrededor de 50 millones de toneladas (EAPA, 2008). Asimismo, en Estados Unidos consideran el reciclado de pavimentos en caliente como una práctica habitual, que presenta resultados satisfactorios cuando se ejerce un adecuado control en el proceso de fabricación (Nguyen, 2013; Abakovic et ál., 2010).

A pesar de que en varios países se ha implementado el uso de RAP, esto no se realiza en altos porcentajes, debido a su calidad y la influencia en la seguridad vial. En Estados Unidos, la National Asphalt Pavement Association (NAPA) afirma que las mezclas que contienen altos porcentajes de RAP (30-40%) se pueden producir, aunque la restricción para su fabricación radica en que

la rigidez aumenta a mayor contenido de RAP (Newcomb, Brown y Epps, 2007). Otros investigadores encontraron que el 40% de RAP, es el contenido máximo permitido para resistir deformaciones permanentes y agrietamientos por fatiga (Chen, Chu y Lin, 2007).

El diseño de mezclas que contienen RAP pretende igualar la calidad de las formuladas con materiales procedentes de cantera; sin embargo, algunos estudios realizados en pavimentos con RAP muestran que el daño más frecuente es la fatiga (Reyes, Camacho y Vargas, 2012). Por esta razón, investigadores de la Universidad de Tennessee encontraron que el aumento de la fragilidad y la disminución del índice de dureza por la incorporación de RAP compromete la vida a fatiga de mezclas en caliente, ya que la energía requerida para fracturar estas mezclas disminuye a medida que aumenta el porcentaje de RAP (Shu, Huang y Vukusavljevic, 2008). Además, la Universidad Tecnológica de Hassan señala que la relación entre la resistencia a la fatiga y la rigidez depende del espesor de capa; por tanto, para las capas delgadas de pavimento, la resistencia a la fatiga disminuye cuando aumenta la rigidez (Hassan, 2009). Asimismo, el comportamiento a fatiga parece mejorar con el aumento en la proporción de rejuvenecedores, lo que per-

mite aumentar el contenido de RAP sin cambiar el comportamiento de las mezclas, dando ciclos más largos de vida a fatiga y reduciendo la temperatura necesaria para tener una adecuada trabajabilidad (Widyatmoko, 2008; Silva, 2012; Tabaković, Gibney, Cilchrist y McNally, 2006; Colbert, y Zhanping, 2012).

Dado que el contenido de RAP en la fabricación de nuevas mezclas asfálticas es una de las principales variables en la resistencia a fatiga de la mezcla, investigadores de la Universidad Politécnica de Cataluña han realizado diferentes estudios experimentales para caracterizar el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas que contienen altos contenidos de RAP, y han encontrado que es posible utilizar hasta 60% de pavimento reciclado en fabricación de mezclas, sin modificar significativamente las leyes de fatiga con respecto a mezclas patrón (Miro, Valdés, Martínez, Segura y Rodríguez, 2011; Valdés, Pérez, Miro, Martínez y Botella, 2011). Asimismo, investigadores de la Universidad de La Coruña constatan que las mezclas asfálticas en caliente tipo gruesas, con 50% de áridos reciclados, tienen una resistencia a la fatiga similar a las fabricadas con 100% de áridos de cantera (Pérez, Galelgo, Toledano, Taibo y Garrido, 2007).

Con base en investigaciones desarrolladas en el mundo, se planteó esta investigación, cuyo objetivo principal fue determinar el comportamiento a fatiga de mezclas asfálticas con curvas granulométrías MD-20 del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) (IDU, 2011) y MDC-2 del Instituto Nacional de Vías (Invias) (Invias, 2007), con adición de RAP al 100% y así plantear la posibilidad de usar RAP en altos porcentajes en Colombia, con el propósito de ayudar a un desarrollo sostenible, ya que esta práctica ha sido poco o nada empleada en el país.

METODOLOGÍA Y MATERIALES

La investigación se desarrolló siguiendo la metodología que se presenta en la figura 1, iniciando con la caracterización del RAP y de los asfaltos de penetración 60/70 y 80/100 utilizados en el estudio. Acto seguido, se determinó por centrifugación el contenido de asfalto del pavimento reciclado. Posteriormente, se obtuvo el valor óptimo de asfalto para adicionar a la mezcla con RAP 100%, con base en los mejores valores de flujo, estabilidad y densidad de las probetas con granulometrías MD20 del IDU y MDC-2 del Invias en su franja media (ver figura 2). A continuación se fabricaron los especímenes y se ejecutaron los ensayos de fatiga con muestras trapezoidales, a diferentes niveles de deformación. Finalmente, se obtuvieron las leyes de fatiga y se establecieron conclusiones y recomendaciones del uso de RAP al 100% en las mezclas asfálticas del estudio.

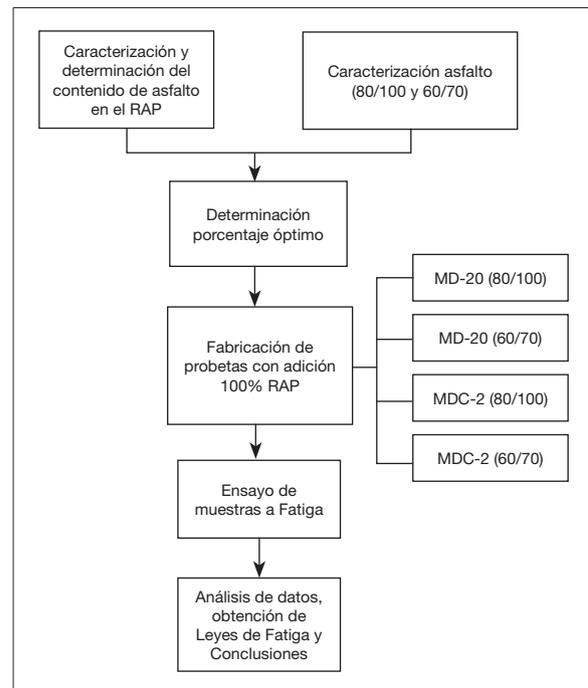


Figura 1. Diagrama de la metodología de la investigación

Fuente: elaboración propia.

Características del asfalto

Las características de los asfaltos empleados en la investigación se relacionan en la tabla 1.

Contenido de asfalto de pavimentos asfálticos reciclados

El contenido de asfalto que presentaba el pavimento reciclado se determinó mediante centrifugación, según la norma ASTM D-2172 (ASTM, 2013). Los resultados aparecen en la tabla 2. Se estableció que en promedio contiene 6,18%.

Diseño de mezcla con pavimentos asfálticos reciclados

Para determinar el porcentaje que era preciso adicionar de asfalto para las mezclas fabricadas con RAP al 100%, se fabricaron muestras con adición de 2, 3, 4 y 5% de asfalto. En las figuras 3 y 4 se observan los resultados de estabilidad, flujo y densidad, parámetros estos que sirvieron para establecer el 3% como óptimo.

Tabla 1. Ensayos de caracterización de los asfaltos

Ensayo	Norma	Asfalto 1 (60/70)	Asfalto 2 (80/100)
Penetración (1/10 mm)	ASTM D 5-97	63	89
Ductilidad (cm)	ASTM D 113-99	120	133
Viscosidad (poises)	ASTM D 2170-95	1500	1250
Punto de ablandamiento (°C)	ASTM D 36-95	47° C	52° C
Punto de llama e ignición (°C)	ASTM D 3143-98	235° C y 245° C	220° C y 225° C

Fuente: elaboración propia.

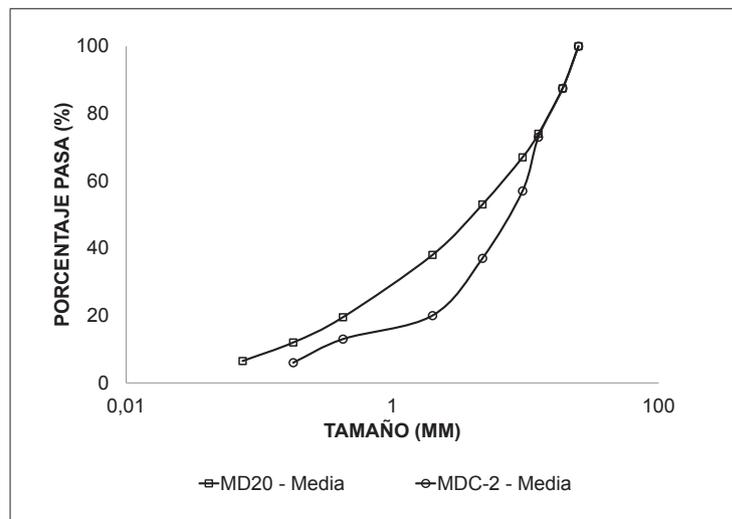


Figura 2. Curvas granulométricas MD20 de IDU y MDC- 2 del Invias

Fuente: IDU (2011) e Invias (2002).

Tabla 2. Contenidos de asfalto en RAP

Pesos de las muestras	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Peso inicial (g)	1200,03	1201,01	1200,13	1202,23	1200,52
Peso final (g)	1126,86	1127,32	1125,98	1129,2	1123,8
Porcentaje asfalto (%)	6,10	6,14	6,18	6,07	6,39

Fuente: elaboración propia.

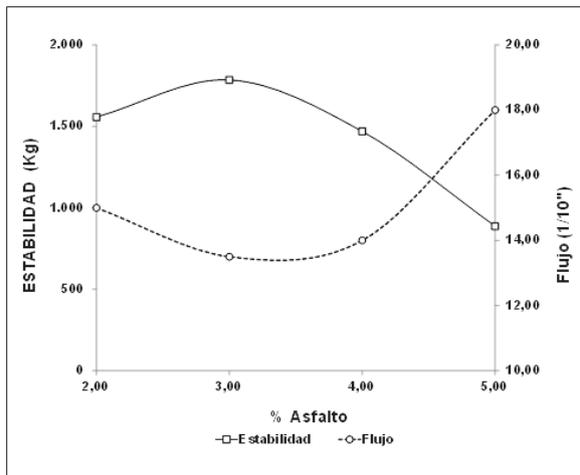


Figura 3. Estabilidad y flujo de las mezclas con 100% RAP

Fuente: elaboración propia.

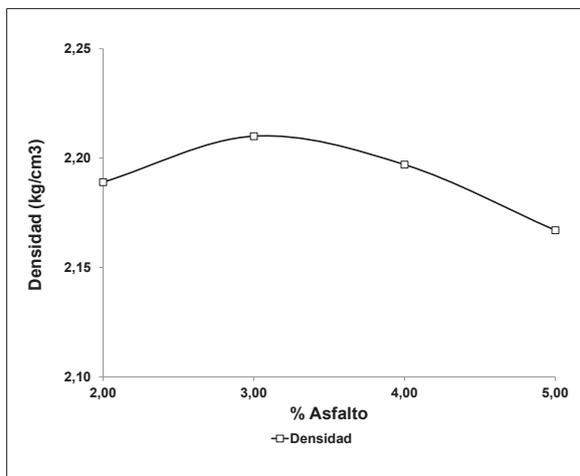


Figura 4. Densidad de las mezclas con 100% RAP

Fuente: elaboración propia.

Ensayos de fatiga

Los ensayos a fatiga de las mezclas asfálticas fabricadas con las granulometrías MD20 y MDC-2, los asfaltos de penetración 60/70 y 80/100 y el RAP al 100% se realizaron en primera instancia con la evolución de la carga con los ciclos, estableciendo el criterio clásico de falla al 50% de la carga inicial. Además, se tuvieron en cuenta los factores de corrección por las variaciones en las dimensiones de las probetas (base mayor, base menor y altura). Se obtuvieron los siguientes resultados:

En la figura 5 se observa la evolución de la carga con los ciclos en el ensayo a fatiga, de la mezcla MD20 con asfalto 60/70, a tres diferentes niveles de deformación (500, 450 y 300 μm). De las curvas de carga se evidenció que en los primeros ciclos su comportamiento es muy similar, con una pendiente constante y casi horizontal. Pasado un nivel de ciclos, la carga decrece de manera brusca y se presenta el fallo. Este comportamiento es similar para los tres niveles de deformación; solo existe la diferencia en el número de ciclos del fallo, siendo que a mayor deformación se tienen menos ciclos de vida.

En las figuras 6, 7 y 8, curvas de evolución de carga contra ciclos de las mezclas con granulometría MD 20 con asfalto 80/100, MDC-2 con asfalto 60/70 y MDC-2 con asfalto 80/100, respectivamente, se observó el mismo comportamiento de las curvas que con granulometría MD 20 con asfalto 60/70, donde en los primeros ciclos se presenta una pendiente casi horizontal y pasado un cierto grupo de ciclos, la pendiente aumenta y se

presenta el fallo. Cada mezcla se ensayó con diferentes niveles de deformaciones.

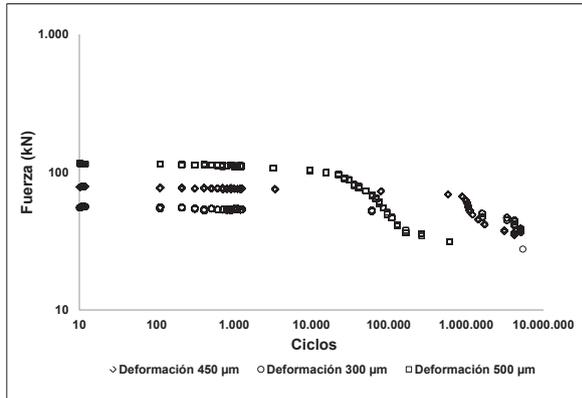


Figura 5. Ciclos versus fuerza de granulometría MD 20 con asfalto 60/70

Fuente: elaboración propia.

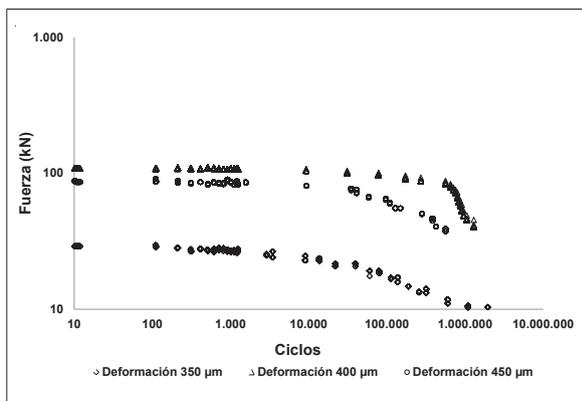


Figura 6. Ciclos versus fuerza de granulometría MD 20 con asfalto 80/100

Fuente: elaboración propia.

ANÁLISIS DE DATOS

A partir de los ciclos obtenidos por el criterio clásico y la deformación correspondiente a cada ensayo, y teniendo en cuenta los factores de corrección, se obtuvieron las leyes de fatiga de cada granulometría del Invias y del IDU con sus respectivos asfaltos de penetración 60/70 y 80/100.

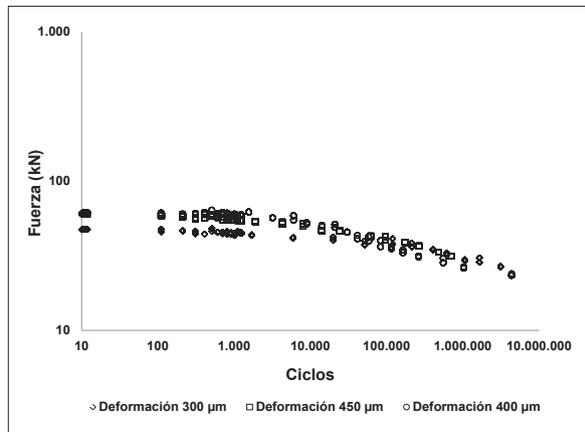


Figura 7. Ciclos versus fuerza de granulometría MDC-2 con asfalto 60/70

Fuente: elaboración propia.

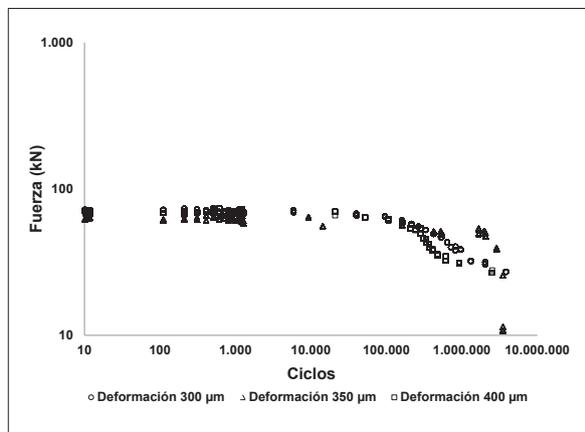


Figura 8. Ciclos versus fuerza de granulometría MDC-2 con asfalto 80/100

Fuente: elaboración propia.

En la figura 9 se observan las leyes de fatiga de las mezclas con granulometría MDC-2 del Invias y asfaltos 60/70 y 80/100, donde se evidencia que los ciclos de carga son diferentes a un mismo nivel de deformación. Se observa que para una deformación dada, la mezcla con asfalto 80/100 soportó un número mayor de ciclos de carga. Por tal motivo esta mezcla tiene un mejor comportamiento a fatiga.

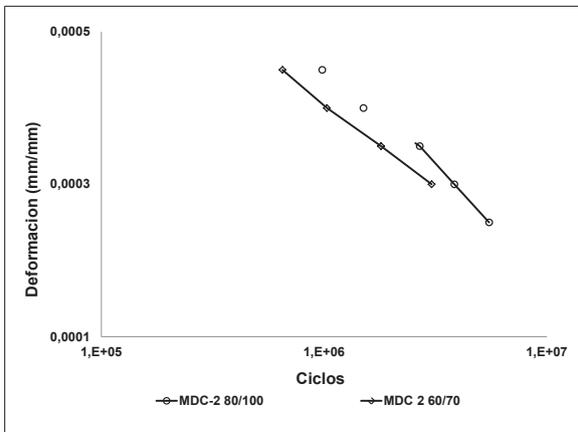


Figura 9. Leyes de fatiga de mezclas con granulometría MDC-2 del Invias y asfaltos 60/70 y 80/100

Fuente: elaboración propia.

En la figura 10, leyes de fatiga de las mezclas con granulometría MD-20 del IDU y asfaltos 60/70 y 80/100, se analiza que el comportamiento a fatiga de las dos mezclas asfálticas es muy similar en cuanto a su pendiente y ciclos de fallo; sin embargo, el asfalto 80/100 presentó un mejor comportamiento, al soportar un mayor número de ciclos de carga a una deformación dada.

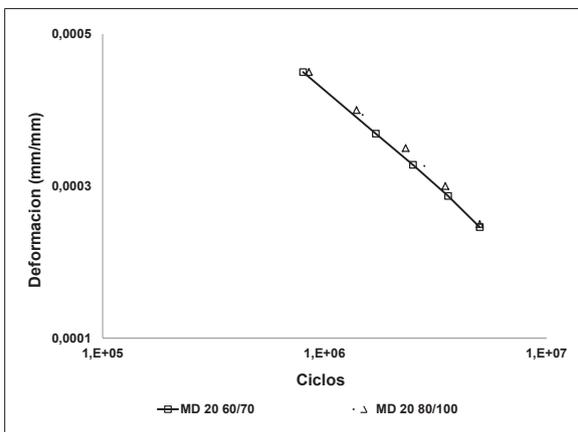


Figura 10. Leyes de fatiga de mezclas con granulometría MD20 del IDU y asfaltos 60/70 y 80/100

Fuente: elaboración propia.

De la figura 11, leyes de fatiga de mezclas con granulometría MD20 del IDU y MDC-2 del Invias con asfalto de penetración 60/70, se puede observar que a menores deformaciones los ciclos tienden a ser similares, pero a valores grandes existe una diferencia significativa, lo cual muestra que la granulometría MD20 soportó mayor número de ciclos; esto evidencia, además, que la granulometría afecta el comportamiento a grandes deformaciones.

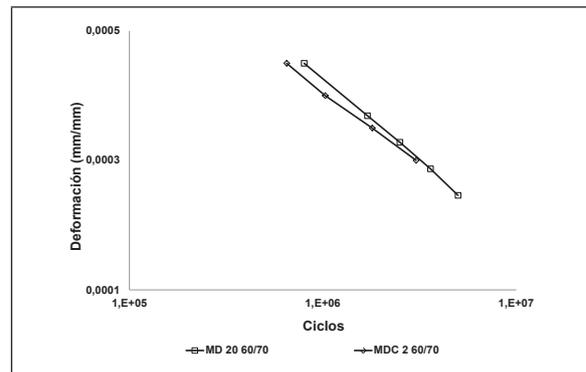


Figura 11. Leyes de fatiga de mezclas con granulometría MD 20 del IDU y MDC-2 del Invias con asfalto de penetración 60/70

Fuente: elaboración propia.

De la figura 12 se observa las leyes de fatiga de mezclas con granulometría MD 20 del IDU y MDC-2 del Invias con asfalto de penetración 80/100, donde los ciclos de carga son muy similares a una misma deformación. Se observa que con el asfalto 80/100 el comportamiento a fatiga no varía mucho para las diferentes granulometrías; sin embargo, se presentan mayores ciclos de vida en la granulometría MD 20.

En la figura 13 se observan todas leyes de fatiga estudiadas, mezclas con granulometría MD20 del IDU y MDC-2 del Invias con los asfaltos de penetración 60/70 y 80/100, donde se presenta una similitud de pendientes en las leyes; sin embargo, la granulometría MDC-2 con asfalto 80/100 tiene mayores ciclos de vida a una deformación dada. Además, la mezcla MDC-2 con asfalto 60/70 presenta la menor resistencia de ciclos de carga; por tanto, se

evidencia que el comportamiento a fatiga no se debe solamente al tipo de granulometría, sino también al tipo de asfalto utilizado. Por otra parte, al comparar todas las leyes de fatiga con respecto a una mezcla asfáltica md20 sin RAP y asfalto 60/70, se evidencia que las mezclas con RAP, con independencia de su granulometría y tipo de asfalto son más rígidas y tienen pendientes mayores. Sin embargo, es importante resaltar que el incremento de las pendientes no es muy elevado, dadas las condiciones del uso de RAP al 100% y que la afectación es menor cuando se emplea asfalto de penetración 80/100.

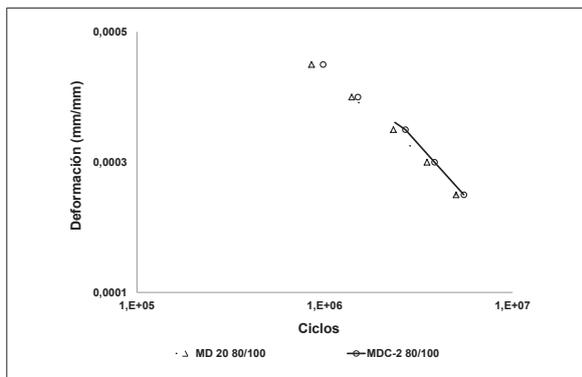


Figura 12. Leyes de fatiga de mezclas con granulometría MD 20 del IDU y MDC-2 del Invias con asfalto de penetración 80/100

Fuente: elaboración propia.

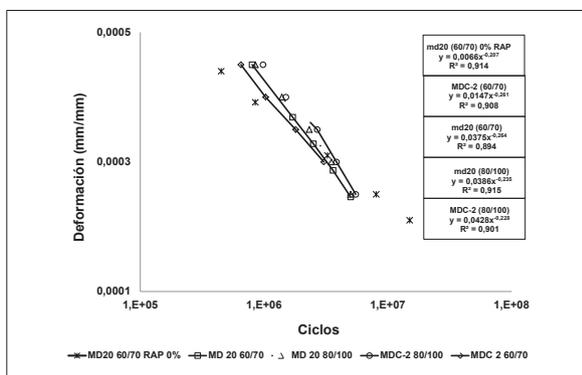


Figura 13. Leyes de fatiga de mezclas con granulometría MD 20 del IDU y MDC-2 del Invias con asfalto de penetración 60/70 y 80/100

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

De las muestras ensayadas a fatiga con reemplazo del material granular por RAP al 100%, con granulometrías MD 20 del IDU y MDC-2 del Invias y fabricadas con asfaltos de penetración 60/70 y 80/100, se puede concluir:

La granulometría MDC-2 con asfalto 80/100 obtuvo el mejor comportamiento a fatiga de las mezclas estudiadas, ya que al tener mayor contenido de finos en su granulometría y ser mezclado con un asfalto blando, proporcionó a la mezcla una mayor trabajabilidad; por tanto, esto generó en la mezcla mayores ciclos de vida.

Sin embargo, el mejor comportamiento a fatiga no se debe solamente al tipo de la granulometría; las mezclas son susceptibles al tipo de asfalto utilizado. Asimismo, no se puede definir cuál de las granulometrías estudiadas tiene el mejor comportamiento a fatiga, ya que en función del tipo de asfalto tienen pendientes similares.

Con el asfalto de penetración 80/100 se obtuvo la mejor resistencia a fatiga para las muestras fabricadas con ambas granulometrías estudiadas, ya que al ser este un asfalto menos viscoso que el asfalto de penetración 60 /70, presenta menor rigidez y tiene mayor capacidad de deformación.

En el estudio comparativo de todas las leyes de fatiga con respecto a una mezcla asfáltica MD 20 sin RAP y asfalto 60/70, se evidencia que las mezclas con RAP, con independencia de su granulometría y tipo de asfalto, son más rígidas y presentan mayores pendientes. Sin embargo, es importante resaltar que el incremento de las pendientes no es muy elevado, debido a las condiciones del uso de RAP al 100% y a que la afectación es menor cuando se emplea asfalto de penetración 80/100.

Finalmente, se concluye que es posible utilizar pavimento reciclado al 100% para las mezclas

asfálticas del estudio. Sin embargo, se deben hacer investigaciones adicionales con otras granulometrías y asfaltos modificados, con el objeto de establecer su viabilidad, no solo en bases asfálticas, sino también en carpetas de rodadura.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Militar Nueva Granada, en especial al Grupo Geotecnia y Vicerrectoría de Investigaciones, por el apoyo recibido por el proyecto IMP-ING 1575.

REFERENCIAS

- Abakovic, A., Gibney, A., McNally, C. y Cilchrist, M. (2010). Influence of Recycled Asphalt Pavement on Fatigue Performance of Asphalt Concrete Base Course. *Journal Materials Civil Engineering*, 22 (6), 643-650.
- American Society for Testing and Materials (ASTM) (2013). *Penetración, ductilidad, viscosidad, punto de ablandamiento y punto de llama y ignición*. Annual Book ASTM Standards, American Society for Testing and Materials.
- Chen, J., Chu, P. y Lin, Y. (2007). Characterization of Binder and Mix Properties to Detect Reclaimed Asphalt Pavement Content in Bituminous Mixtures. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 34 (5), 581-588.
- Colbert, B. y Zhanping, Y. (2012). The Determination of Mechanical Performance of Laboratory Produced Hot Mix Asphalt Mixtures Using Controlled RAP and Virgin Aggregate Size Fractions. *Construction and Building Materials*, 26, 655-662.
- European Asphalt Pavement Association (EAPA) (2008). Arguments to Stimulate the Government to Promote Asphalt Reuse and Recycling. *EAPA*, 14.
- Hassan, R. (2009). Feasibility of Using High RAP Contents in Hot Mix Asphalt. *Proceedings of the 13th International Flexible Pavements Conference*, octubre de 2009.
- Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) (2011). *Especificaciones técnicas generales de materiales y construcción para proyectos de infraestructura vial y de espacio público de Bogotá*. IDU-ET-2011. Bogotá: IDU.
- Instituto Nacional de Vías (Invias) (2007). *Especificaciones generales de construcción para carreteras*. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Marantzidis, I. y Gidado, K. (2011). The Maximization of the Use of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in the Greek Construction Industry. *Proceeding 27th on the Association of Researchers in Construction*, septiembre de 2011 (pp. 1125-1134).
- Miró, R., Valdés, G., Martínez, A., Segura, P. y Rodríguez, M. (2011). Evaluation of High Modulus Mixture Behaviour with High Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Percentages for Sustainable Road Construction. *Construction and Building Materials* 25, 3854-3862.
- Newcomb, D., Brown E. y Epps, J. (2007). *Designing HMA Mixtures with High RAP Content - A Practical Guide*. National Asphalt Pavement Association and US Department of Transportation FHA, Quality Improvement Series 124.
- Nguyen, H. (2013). Effects of Mixing Procedures and Rap Sizes on Stiffness Distribution of Hot Recycled Asphalt Mixtures. *Construction and Building Materials*, 47, 728-742.

- Pérez, I., Gallego, J., Toledano, M., Taibo, J. y Garrido, F. (2007). Caracterización del comportamiento a fatiga de mezclas bituminosas en caliente fabricadas con áridos reciclados. *Anales de la Mecánica de Fractura*, 1, 157-162.
- Reyes, O., Camacho, J. y Vargas, G. (2012). Uso de pavimento reciclado en altas tasas en mezclas asfálticas colombianas. *8 Jornadas Internacionales del asfalto y 5 seminario latinoamericano del asfalto. Corasfaltos* (pp. 1-14), octubre de 2012.
- Shu, X., Huang, B. y Vukosavljevic, B. (2008). Laboratory Evaluation of Fatigue Characteristics of Recycled Asphalt Mixture. *Construction and Building Materials*, 22, 1323-1330.
- Silva, H. (2012). Are Totally Recycled Hot Mix Asphalts a Sustainable Alternative for Road Paving? *Journal Resources, Conservation and Recycling*, 60, 38-48.
- Tabaković, A., Gibney, A., Gilchrist, M. y McNally, C. (2006). Fatigue Resistance of Bituminous Layers Incorporating Reclaimed Asphalt Pavement. *5th International Conference on Research & Practical Applications Using Wastes & Secondary Materials in Pavement Engineering*, febrero de 2006.
- Valdés, G., Pérez-Jiménez, F., Miró, R., Martínez, A. y Botella, R. (2011). Experimental Study of Recycled Asphalt Mixtures with High Percentages. *Construction and Building Materials*, 25 (3), 1289-1297.
- Widyatmoko, I. (2008). Mechanistic-Empirical Mixture Design for Hot Mix Asphalt Pavement Recycling. *Construction and Building Materials*, 22, 77-87.

Evaluación del límite de resistencia a la corrosión fatiga del acero sae 1020 en ambiente ácido

Limit to corrosion fatigue strength evaluation of sae 1020 steel in acidic environment

WILLIAM MAURICIO SANABRIA BECERRA

Ingeniero mecánico, magíster en Metalurgia y Ciencia de los Materiales, docente de la Universidad Antonio Nariño, Tunja, Colombia.

Contacto: wisanabria@uan.edu.co

OSCAR HERNANDO PARDO CUERVO

Químico de alimentos, magíster en Metalurgia y Ciencia de los Materiales, docente de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia. Contacto: oscarhernando.pardo@uptc.edu.co

ROBINSON DE JESÚS TORRES GÓMEZ

Ingeniero metalúrgico, magíster en Metalurgia y Ciencia de los Materiales, docente de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia. Contacto: robinson.torres@uptc.edu.co

Fecha de recepción: 28 de agosto de 2013

Clasificación del artículo: investigación

Fecha de aceptación: 2 de mayo de 2014

Financiamiento: Instituto para la Investigación e Innovación en Ciencia y Tecnología de Materiales (Incitema), Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia

DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.1.a06>

Palabras clave: corrosión fatiga, corrosión filiforme, flexión rotativa, resistencia a la fatiga.

Keyword: corrosion fatigue, fatigue resistance, filiform corrosion, rotating bending.

RESUMEN

En este artículo se muestran los resultados de investigación en cuanto a la determinación del límite de resistencia a la corrosión fatiga para el acero SAE 1020 en condiciones ácidas, tomando como sustancia corrosiva buffer acetato con valores de pH 2, 4 y 6. Los ensayos de fatiga se realizaron

de acuerdo con el modelo de flexión rotativa en cantiléver. Los resultados se contrastaron con el límite de resistencia a la fatiga del material ensayado al aire. Se encontró una significativa reducción del límite a medida que aumenta la acidez de la sustancia; igualmente, se observó corrosión localizada del tipo filiforme sobre la superficie del material, provocada por el efecto aireado de la probeta al estar parcialmente sumergida y en rotación. Los límites

de resistencia a la fatiga se determinan utilizando el método escalera, recomendado por las normas ISO 1143 e ISO 12107, con nivel de confianza del 50% y una probabilidad de falla del 10%. Por último, se analizaron las superficies de fractura y se hallaron múltiples orígenes de grieta y longitudes de propagación relacionadas con el nivel de acidez del medio.

ABSTRACT

This paper shows the results of the research in terms of the evaluation of corrosion fatigue resistance of SAE 1020 steel in acidic conditions, using as corrosive substance: acetate buffer with pH 2, 4 and 6. The fatigue tests were performed

according to the model of cantilever rotating bending. The results were compared with the limit of fatigue resistance of the material tested in air. It was observed a significantly reduced limit with increasing acidity of the substance. Likewise, localized corrosion type filiform corrosion was observed on the surface material, caused by the effect of the specimen aerated to be partially submerged in rotation. Limits fatigue strength determined using staircase method recommended by standard ISO 1143 and ISO 12107, with confidence level of 50% and a probability of failure of 10%. Finally, the surfaces were analyzed to find multiple origins of fracture and crack propagation lengths related to the acidity of the medium.

* * *

INTRODUCCIÓN

Actualmente, las fallas por fatiga siguen siendo de gran preocupación en la ingeniería de diseño. Los costos por fractura en materiales y su prevención son bastante grandes, y el 80% de estos costos involucran situaciones en las que las cargas cíclicas son al menos un factor que contribuye al deterioro total; por ejemplo, el costo anual de la falla por fatiga de los materiales en Norteamérica y Europa es de aproximadamente 3% del producto nacional bruto. Estos costos se derivan de la prevención de la falla por fatiga de vehículos terrestres y ferroviarios, aviones, puentes, grúas, equipos petroleros, estructuras y elementos de uso cotidiano como juguetes y equipos deportivos (Alter, 2003).

La problemática que tiene este acero y todos aquellos que estén expuestos a una combinación de ambiente corrosivo y fatiga, es la disminución significativa de la vida útil de los materiales, hasta el punto de no tener capacidad de soportar condiciones combinadas de esfuerzo y ambiente

(Weng et ál., 2013). Igualmente, su durabilidad se ve afectada por la frecuencia y la amplitud de esfuerzo en cuanto a fatiga y el nivel de agresividad del medio en relación con la corrosión (Ramsamooj y Shugar, 2001).

Por otro lado, no es acertado esperar que el límite de resistencia a la fatiga de un elemento mecánico o estructural sea igual al obtenido en ensayos de laboratorio y menos que este se mantenga cuando es expuesto a efecto simultáneo de corrosión fatiga, ya que de este modo los aceros tienden a disminuir drásticamente su límite de resistencia a la fatiga. Este proceso, por lo general, los aceros lo experimentan comenzando por la formación de *pitting* superficial, combinado con concentración de esfuerzos en dichos puntos, lo que da lugar a la formación de grietas superficiales que conllevan falla del material (Zhao et ál., 2012).

Por muchos años se han realizado estudios de corrosión fatiga en aceros al carbono, aleados y especiales, lo cual ha permitido observar variaciones en función de la agresividad del electrolito

to. Sin embargo, el comportamiento de los aceros bajo corrosión fatiga, en función del valor constante del pH del medio corrosivo, no ha sido estudiado con detalle.

Este trabajo se basa en los problemas encontrados con frecuencia en barras de perforación, las cuales se veían expuestas a carga variable debido al proceso de perforación y, asimismo, se hallaban expuestas a ambientes agresivos en el fondo de pozo generado por la agresividad de la tierra en combinación con el crudo hallado, y se encontró, principalmente, ambientes ácidos. Se evaluó el límite de resistencia a la corrosión fatiga en función del pH del medio, mediante el ensayo de fatiga de viga rotatoria en cantiléver, al aire y en ambiente corrosivo del acero SAE 1020, utilizando como

medio corrosivo un buffer acetato, con pH de 2, 4 y 6. El material ensayado se caracterizó química y mecánicamente mediante la técnica de espectroscopia de emisión por chispa y ensayo de tensión, respectivamente. De igual manera, se evaluó la superficie de fractura mediante microscopía óptica y electrónica de barrido.

METODOLOGÍA

El material utilizado para este estudio es el acero SAE 1020 laminado en caliente, caracterizado químicamente mediante la técnica de espectroscopia de emisión por chispa y mecánicamente mediante el ensayo de tensión. En las tablas 1 y 2 se muestran los resultados de estos estudios previos realizados al material.

Tabla 1. Composición química acero SAE 1020 (porcentaje en peso)

Muestra	C	Mn	P	S	Ni	Cu	Si
1	0,204	0,554	0,0114	0,0287	0,0794	0,144	0,142
2	0,235	0,560	0,0130	0,0375	0,0807	0,147	0,145
3	0,191	0,557	0,0116	0,0328	0,0799	0,147	0,145
Media	0,210	0,557	0,0120	0,0330	0,080	0,146	0,144
Desviación estándar	0,0226	0,003	0,0008	0,0044	0,0006	0,0017	0,0017

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Propiedades mecánicas

Muestra	Esfuerzo máximo (kgf/mm ²)	Esfuerzo de fluencia (0,2%) (kgf/mm ²)	Reducción de área(%)	Alargamiento (%) (L ₀ = 50 mm)	Módulo de elasticidad (kgf/mm ²)
1	74,53	68,06	46	12	21,4
2	77,92	70,11	48	12	21,1
3	75,43	69,52	47	14	19,3
Media	75,96	69,23	47	13	20,6
Desviación estándar	1,76	1,06	1,0	1,15	1,14

Fuente: elaboración propia.

Las probetas para los ensayos de fatiga y corrosión fatiga se elaboraron de acuerdo con la norma ISO 1143 (ISO Metallic Materials, 2010) y fueron llevadas hasta la fractura total. Las probetas fueron mecanizadas en un torno CNC PUMA 200, teniendo en cuenta el procedimiento establecido por la norma, el cual reduce la posibilidad de formación de esfuerzos residuales sobre la superficie. Las probetas ensayadas fueron numeradas y seleccionadas al azar, con el fin de asegurar la aleatoriedad comúnmente practicada en estos tipos de ensayos.

Los ensayos de fatiga se realizaron del tipo viga en cantiléver en flexión con rotación inversa y sucesiva, como se muestra en la figura 1, en condiciones de alto ciclaje, a una frecuencia de 44 Hz y contemplando esfuerzos planos de valor constante con niveles entre el 20 y el 40% de la resistencia a la tracción máxima del material evaluado. Los valores de F de la figura corresponden a los valores de carga aplicada que generaron esfuerzos por flexión, de acuerdo con los valores de esfuerzo de la tabla 4. En cuanto a alineación, se tuvo en cuenta una tolerancia de desalineación máxima de $\pm 0,025$ mm (0,00"). Durante el montaje, la desalineación se corroboró con comparador de carátula. La correcta verificación de la desalineación y el cumplimiento de su tolerancia reducen las posibilidades de vibración durante el ensayo.

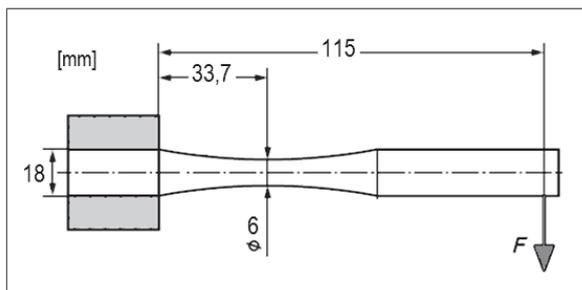


Figura 1. Modelo de fatiga en cantiléver

Fuente: Alter y Maestres (2003).

Para el ataque se utilizó buffer en base de acetato, con valores de pH de 2, 4 y 6. En la preparación se utilizaron dos soluciones: solución A = ácido acético 0,2 M y solución B = acetato de sodio 0,2 M, agregadas a medio litro de agua destilada, completando un litro de solución en proporciones de acuerdo con el pH que se quería obtener, como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Proporciones de soluciones para la preparación de buffer de acetato

Solución A (ml)	Solución B (ml)	Agua destilada (ml)	pH
487	23	500	2
410	90	500	4
24	476	500	6

Fuente: elaboración propia.

El ataque sobre el material se realizó sometiendo la probeta a una frecuencia de rotación de 44 Hz sin carga, en presencia del electrolito y por un tiempo de 2 horas; posteriormente se dejó airear por 30 minutos. Esta forma de daño generado sobre la superficie del material permite acelerar el efecto corrosivo, puesto que las condiciones hidrodinámicas del ensayo causan aireaciones parciales sobre la superficie y esto facilita la aparición de zonas anódicas y catódicas sobre un mismo lugar y, con la ayuda de una sustancia corrosiva a base de sales disueltas, mejoran sustancialmente el ataque. Este mismo suceso fue reportado por otros autores en sus escritos (Hassan y Liu, 2000; Oñoro, 2009).

Utilizando el método de escalera modificado, recomendado por la norma (Iso Metallic Materials, 2010; ISO Metallic Materials, 2003), se determinó el límite de resistencia a la corrosión fatiga de acuerdo con el pH del medio corrosivo y, posteriormente, comparadas con el límite de resistencia a la fatiga del material ensayado al aire. Se evidenció y caracterizó macroscópicamente el efecto corrosivo superficial sobre el material, de

acuerdo con el nivel de acidez del medio. El análisis de la superficie de fractura se realizó mediante microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido, identificando los orígenes de grieta y sus longitudes de propagación.

RESULTADOS

En la figura 2 se evidencia el daño provocado sobre las probetas ensayadas para los diferentes niveles de pH utilizados. Se observa claramente mayor daño sobre la superficie a mayores niveles de acidez del buffer.

En la figura 3 se observa el tipo de corrosión generada sobre el material. Esta es una corrosión localizada del tipo filiforme, la cual claramente se caracteriza por la formación de una cabeza en lugares susceptibles de daño, como los rastros dejados por el paso de la herramienta de corte en el mecanizado (Genel, Demirkol y Gulmez, 2000; La Barbera et ál., 2009).

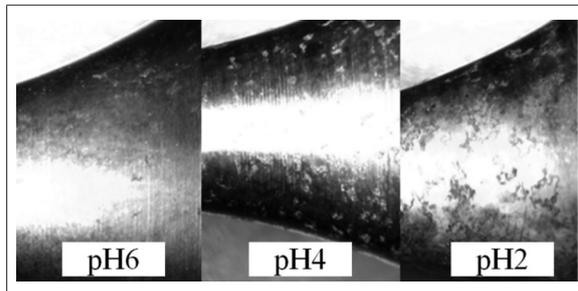


Figura 2. Evidencias de daño por corrosión

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 4 se muestran los límites de resistencia a la fatiga para cada uno de los ensayos. Estos valores fueron obtenidos con base en el límite inferior determinado sobre los datos observados. Se observa cómo el límite de resistencia a la fatiga disminuye a medida que aumenta la acidez en el ambiente corrosivo; igualmente, son menos las probetas que superan el límite de los 10^7 ciclos

con este incremento. Este resultado es un indicador claro del efecto significativo de la acidez de un medio sobre los materiales en condiciones dinámicas de esfuerzo. Comúnmente, este valor límite de 10^7 es considerado como el número al cual se presenta el límite de resistencia a la fatiga de los materiales.

En la figura 4 (curva S-N) se observa la variación del límite de resistencia a la fatiga para los diferentes ambientes a los que fue expuesto el material. En ella se observa una disminución considerable para ambientes con pH 2 y 4, mientras que en ensayos con pH 6 la disminución no es tan notoria con respecto al límite de resistencia a la fatiga obtenida al aire. A pesar de observarse cierta similitud entre ensayos al aire y pH 6, ensayos con pH 2 y 4, existen diferencias notorias entre todos ellos.

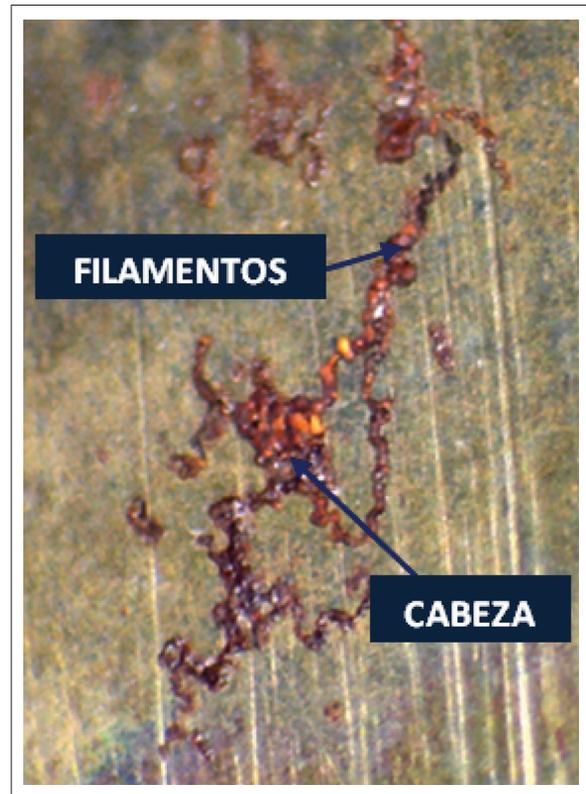


Figura 3. Corrosión localizada filiforme

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Límites de resistencia a la fatiga

Al aire			pH 6		
Probeta n°	Kg/mm ²	Ciclos	Probeta n°	Kg/mm ²	Ciclos
63	31,0	7 934 543	61	28,00	8 433 211
32	30,0	8 892 103	49	27,50	9 013 455
23	29,5	> 10 000 000	33	27,00	> 10 000 000
4	29,0	> 10 000 000	8	26,50	> 10 000 000
56	28,5	> 10 000 000	15	26,00	> 10 000 000
21	28,0	> 10 000 000	70	25,50	> 10 000 000
Desviación estándar	1,080		Desviación estándar	0,935	
Media	29,33		Media	26,75	
Límite fatiga	26,640	35,07% S _{ut}	Límite fatiga	24,417	32,14% S _{ut}
pH4			pH2		
Probeta n°	Kg/mm ²	Ciclos	Probeta n°	Kg/mm ²	Ciclos
71	21,5	5 678 911	11	19,0	6 825 466
16	21,0	7 882 435	29	18,5	8 236 405
43	20,0	9 044 223	37	18,0	8 686 452
34	19,5	9 724 312	41	17,5	9 375 212
55	19,0	> 10 000 000	51	17,0	9 798 412
62	18,5	> 10 000 000	66	16,5	> 10 000 000
Desviación estándar	1,158		Desviación estándar	0,935	
Media	19,92		Media	17,75	
Límite fatiga	17,028	22,42% S _{ut}	Límite fatiga	15,417	20,30% S _{ut}

Fuente: elaboración propia.

Dichos límites de resistencia a la fatiga fueron evaluados a partir del 40% de la resistencia última a la tensión ($0,4 S_{ut}$), tal como lo recomiendan algunos autores (Marín, 1962; Norton, 1999; Shigley y Mischke, 2002). A partir de este valor, se fue disminuyendo hasta encontrar ensayos que sobrepasaran el parámetro de 10^7 ciclos para el cálculo del límite de resistencia a la fatiga. Los ensayos que superaron los 10^7 ciclos se detuvieron sin llegar a presentar rasgos superficiales de una posible fractura.

Desde el punto de vista del diseño mecánico, el límite de resistencia a la fatiga de los materiales ha sido considerado como el 50,4% de la resistencia última a la tensión, para ensayos de fatiga

con viga rotatoria con cuatro puntos de apoyo. En cambio, para ensayos de fatiga axial el límite de resistencia a la fatiga ha sido de 40% de la resistencia última a la tensión, tal como se indica en literatura sobre diseño mecánico (Marín, 1962; Norton, 1999). En cuanto a los resultados obtenidos, el límite de resistencia a la fatiga al aire ha sido del 35,07% de la resistencia última a la tensión, para este modo de ensayo de fatiga en viga rotatoria en cantiléver. Esto permite evidenciar las diferencias entre las distintas formas de ensayo de fatiga permitidas por la norma, lo cual muestra que al evaluar el comportamiento a la fatiga a un material o a un elemento estructural es importante conocer de antemano el tipo de fatiga al cual va a estar sometido en servicio.

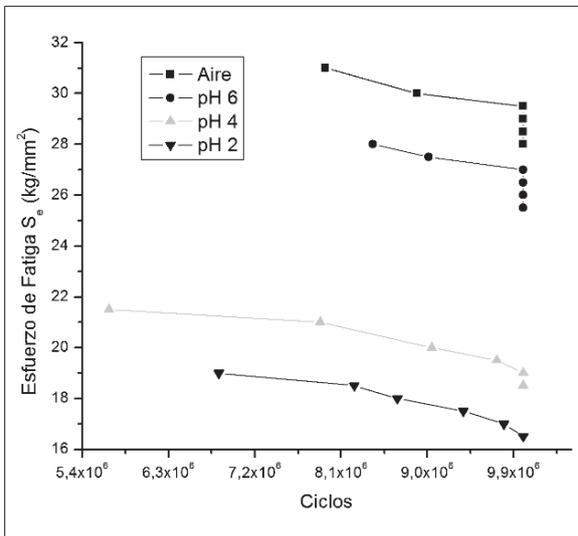


Figura 4. Curvas S-N para el acero SAE 1020

Fuente: elaboración propia.

Las superficies de fractura de las muestras fueron observadas microscópicamente por SEM, en donde se encontraron múltiples orígenes de grieta en todas las muestras ensayadas al igual que su longitud de propagación, tal como se observa en la figura 5.

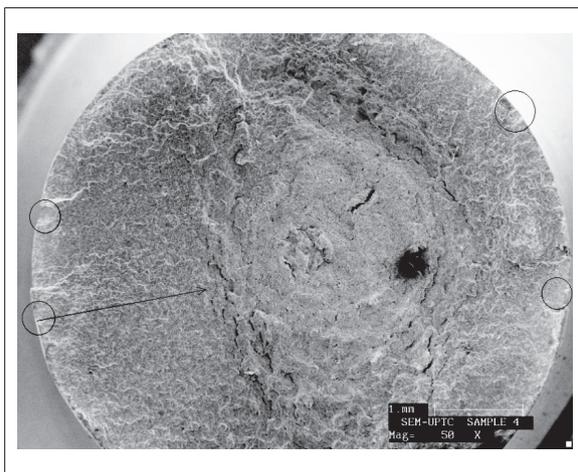


Figura 5. Orígenes de grieta y longitud de propagación en probeta, con esfuerzo de 28 kg/mm² y pH 6

Fuente: elaboración propia.

La figura 6 muestra la forma como está relacionada la longitud de propagación de grieta con el nivel de esfuerzo, al igual que el ambiente. En términos de la rigidez del material, se puede observar cómo cortas grietas pueden promover la falla en ambientes de elevada acidez, aunque se tengan niveles de esfuerzo bajo, y a medida que esta acidez disminuye, existe mayor posibilidad de tener mejor progresión antes de llegar a falla del material, aun soportando un nivel mayor de esfuerzo.

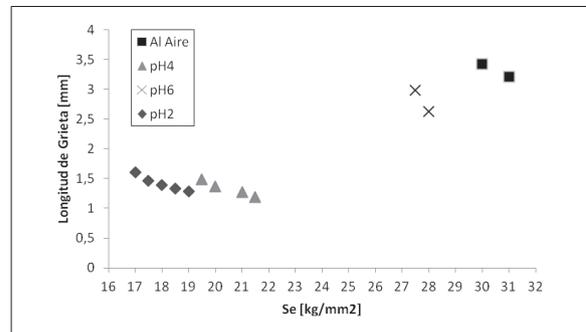


Figura 6. Longitud de grieta en función del esfuerzo sometido para cada ambiente

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

Se observó que el aumento de la acidez de una sustancia corrosiva disminuye el límite de resistencia a la fatiga de los materiales, al igual aumenta la probabilidad de una falla repentina debido a su baja propagación de grieta.

A medida que la acidez se hace más fuerte, la disminución de su resistencia se acrecienta cada vez más, para lo cual, provocaría daño superficial significativo sobre el material. Si este daño se localiza en zonas de máxima concentración de esfuerzo mecánico, tendría un efecto crítico sobre la integridad de las máquinas.

Es posible ocasionar la corrosión localizada del tipo filiforme sobre los materiales, para evaluar el

comportamiento a la corrosión fatiga de materiales con recubrimientos resistentes a la corrosión.

Se debe considerar la corrosión como un factor que modifica el límite de resistencia a la fatiga hasta valores que garanticen su funcionalidad, lo que permite tener en cuenta el verdadero efecto de la corrosión sobre las condiciones de diseño de máquinas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto para la Investigación y la Innovación en Ciencia y Tecnología de Materiales (Incitema) y al Programa de Maestría en Metalurgia y Ciencia de los Materiales por el apoyo financiero, académico y administrativo.

REFERENCIAS

- Alter, L. y Maestres, L. (2003). *Corrosión y protección*. Barcelona: Ediciones UPC.
- Arola, D. y Williams, C. L. (2001). Estimating the Fatigue Stress Concentration Factor of Machined Surfaces. *International Journal of Fatigue*, 24, 923-930.
- Genel, K., Demirkol, M. y Gulmez, T. (2000). Corrosion Fatigue Behaviour of Ion Nitride AISI 4140 Steel. *Materials Science and Engineering*, 288, 91-100.
- Hamrock, B. J., Jacobson, B. y Schmid, S. R. (2000). *Elementos de máquinas* (2ª ed.). México: McGraw-Hill.
- Hassan, T. y Liu, Z. (2000). On the Difference of Fatigue Strengths from Rotating Bending, Four-Point Bending and Cantilever Bending Tests. *Pressure Vessels and Piping*, 78, 19-30.
- ISO Metallic Materials - Fatigue testing - Statistical Planning and Analysis of Data. ISO12107-2003 (2003).
- ISO Metallic Materials - Rotating Bar Bending Fatigue Testing. ISO1143-2010 (2010).
- La Barbera, J. G. et ál. (2009). Comportamiento a la fatiga-corrosión del acero SAE1045 recubierto con una aleación base níquel proyectada térmicamente por HVOF. *Acta Microscópica*, 18, 39-51.
- Marin, J. (1962). *Mechanical Behavior of Engineering Materials* (2ª ed). Englewood Cliffs, Nueva York: Prentice-Hall.
- Norton, R. (1999). *Diseño de máquinas* (4ª ed.) México: Pearson Educación.
- Oñoro, J. (2009). Corrosion Fatigue Behaviour of 317LN Austenitic Stainless Steel in Phosphoric Acid. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 86, 656-660.
- Pyttel, B, Schwerdt, Z. y Berger, C. (2011). Very High Cycle Fatigue – Is there a Fatigue Limit? *International Journal of Fatigue*, 33, 49-58.
- Ramsamooj, D. V. y Shugar, T. (2001). Modeling of Corrosion Fatigue in Metals in an Aggressive Environment. *International Journal of Fatigue*, 23, s301-s309.
- Shigley, J. E. y Mischke, C. R. (2002). *Diseño en ingeniería mecánica* (5ª ed.). México: McGraw- Hill.

investigación |

Weng, L. et ál. (2013). Corrosion Fatigue Crack Growth of AISI 4340 Steel. *International Journal of Fatigue*, 48, 156-164.

Zhao, W. et ál. (2012). Study on the Mechanism of High Cycle Corrosion Fatigue Crack Initiation in X 80 Steel. *Corrosion Science*, 57, 99-103.

Energy efficiency evaluation of an innovative vertical axial rotary kiln for pottery production

Evaluación de la eficiencia energética de un horno rotatorio axial vertical para la producción de cerámica

CARLOS ANDRÉS FORERO NÚÑEZ

Chemical Engineer, Ph.D Engineering-Materials Science and Technology. Assistant Professor. Department of Mechanical and Mechatronics Engineering, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. Contacto: caforeron@unal.edu.co

GERMÁN ARTURO LÓPEZ MARTÍNEZ

Mechanical Engineer, Technology Teaching Specialist, MSc Mechanical Engineering. Associate Professor. Technology Faculty. Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”. Bogotá, Colombia. Contacto: galopezm@udistrital.edu.co

FABIO EMIRO SIERRA VARGAS

Mechanical Engineer, MSc Industrial Automatization, Dr.-Ing in Engineering. Associate Professor. Department of Mechanical and Mechatronics Engineering. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. Contacto: fesierav@unal.edu.co

Fecha de recepción: 21 de febrero del 2014

Clasificación del artículo: investigación

Fecha de aceptación: 15 de agosto del 2014

Financiamiento: Colciencias, Project No. 1101-521-29311

DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.1.a07>

Keywords: combustion, energy efficiency, pottery, rotary kiln.

Palabras clave: alfarería, combustión, eficiencia energética, horno rotatorio.

ABSTRACT

Colombia is a remarkable coal producer and exporter worldwide; several sectors use this resource for electricity and thermal energy production. Among them, the ceramic industry consumed 118,590 tons in 2011. Most of the pottery production companies in this country are located

in rural areas and use old coal fired kilns with low energy efficiencies, generating environmental effects to the population nearby. Despite of the importance of these industries to the small rural economies, the government agencies have closed them due to the lack of development on cleaner devices. This work aims to analyze the thermal behavior of an innovative vertical axial rotary kiln

for pottery production, and the energy efficiency varying operation mode. The kiln, operated during seven hours, needed three hours for stabilizing the sintering temperature at 800°C. The mean temperatures of the loading, drying, sintering and cooling stage were 204°C, 223°C, 809°C and 321°C respectively. The convection and radiation heat losses were 15% whereas the flue gas heat losses 18%. During continuous operation, the kiln energy efficiency was about 60%. This design proven to reach the temperatures required in the firing stage of the pottery production; moreover, a gas fuel was fuelled making the process cleaner and more efficient than coal-fired systems.

RESUMEN

Colombia es un importante productor y exportador de carbón a nivel mundial. Múltiples sectores utilizan este recurso para la producción de energía térmica y eléctrica, entre los cuales se encuentra la industria cerámica, que en el 2011 tuvo un consumo de 118 590 toneladas. La mayor parte de las industrias de alfarería se encuentran en áreas rurales y utilizan hornos antiguos alimentados con carbón

* * *

INTRODUCTION

Energy is fundamental for the society. The world primary source of energy increases every year at higher rates. Based on the statistics presented by the International Energy Agency (International Energy Agency (IEA), 2012), while the energy reached 10 000 Mtoe at a rate of 145 Mtoe/year between 1970 and 2000, in the last decade that rate was 200 Mtoe/year and the energy supply was 12 000 Mtoe. The expansion of the coal share caused that phenomena; this fossil fuel has become more valuable due to the higher prices of other fossil fuels such as natural gas and oil fuel middle distillates. The coal production is increas-

con baja eficiencia energética, generando efectos ambientales considerables a la población circundante. A pesar de la importancia de estas industrias para las pequeñas economías rurales, agencias nacionales gubernamentales han cerrado varias debido a la falta de desarrollo de sistemas más limpios. Este trabajo pretende analizar el comportamiento térmico de un horno rotatorio de eje vertical para la alfarería y su eficiencia energética variando el modo de operación. El horno operó durante siete horas y necesitó tres horas para alcanzar 800 °C en la cámara de sintetización o cocido. Las temperaturas promedio de las cámaras de carga, secado, cocido y enfriamiento, a partir del momento de estabilización fueron 204, 223, 809 y 321 °C respectivamente. Las pérdidas por radiación y convección al ambiente fueron equivalentes al 15%, mientras que las pérdidas relacionadas con los gases de combustión fueron del 18%. Durante la operación en continuo la eficiencia energética del sistema alcanza el 60%. Este diseño innovador demostró alcanzar las temperaturas requeridas en el proceso de alfarería; más aún permitió el uso de un combustible gaseoso, haciendo el proceso más limpio y eficiente que los sistemas tradicionales alimentados por carbón.

ing faster than over the past decades. In the 90's, the average production was about 4500 Mt while, in 2011, it was 8000 Mt. The proven coal reserves in Colombia are 6508 Mt and they are distributed along the three sections of the Andes (UPME, 2012). The large difference between the production and the consumption of coal makes Colombia the fifth most prominent exporter worldwide, after Indonesia, Australia, Russia and the United States (International Energy Agency (IEA), 2012). This fuel is the second most indispensable resource for electricity generation, and the main source for primary energy in this country. The distribution of the coal consumption by sector is wide; coal is valuable for industries such as the

electrical, charcoal, textile, steel, food, tobacco, paper, cement and ceramics. The use of fired coal systems results on a lot of environmental effects and pollutants such as CO₂, NO_x, SO_x, and particulate matter. In 2010, coal combustion produced 43% of the CO₂ emissions; it increased 4.9% and represented 13.1 GtCO₂ (International Energy Agency (IEA), 2011). Hence, several studies about coal science were carried out to identify cleaner processes for coal combustion such as liquefaction (Matheus, Miller, Song, Schobert, Botha, & Finkleman, 2013), integrated gasification combined cycles (IGCC) (Zhang, Zhou, Ma, Li, & Ni, 2013), biomass co-firing systems (Jones, Bridgeman, Darvell, Grudka, Saddawi, & Williams, 2012) and sulfur removal techniques (Cheng, y otros, 2003).

In Colombia, the ceramic industry consumed about 118 590 tons of coal in 2011. An important share of this demand came from the pottery production companies. This process implies the clay extraction, clay pretreatment, samples shaping and firing (Artesanías de Colombia S.A., 2008). Raquira is a small town located at 5,538°N, -73,363°W and 2,120 m above the average sea level, where more than 50 coal mines are located nearby, and 350 small and medium scale firing kilns exist (Sinning Durán, 2010), consuming approximately 4,800 tons coal annually. These kilns are operated by batch cycles typically; they are warmed up until reaching a sintering temperature between 800 and 1000°C. The equipment maintains that temperature for two to four hours before cooling down. The kilns installed in Raquira are extremely old with no control of the outlet gas temperature and inappropriate insulation, resulting on low energy efficiencies and several greenhouse gases (GHGs). Some national agencies have established severe policies to decrease the impact of these industries; the city council has determined that these kilns have no technical improvements closing most of them, affecting the employment of almost 11 000 inhabitants

(Concejo Municipal de Ráquira, 2012). After making a review of the different studies regarding pottery production processes, we found that they mainly focus on the kilns employed on the cement industry and the pottery chemical characterization (Trindade, Dias, Rocha, Prudencio, & Coroado, 2011) (Rasmussen, De la Fuente, Bond, Mathiesen, & Vera, 2012) (Matau, Nica, Postolache, Ursachi, Cortiug, & Stancu, 2013). However, the analysis of the thermal behavior and the energy efficiency is a remarkable factor to consider. Marias (Marias, 2003) presented a new development in the study of a rotary kiln incinerator using the possible coupling between gPROMS™ and Fluent™. Ginsberg and Modigell (Ginsberg & Modigell, 2011) established a rigorous one-dimensional dynamic model of a rotary kiln for calcination of titanium dioxide white pigment; they considered the heat losses from the kiln outer shell to the environment, and determined useful equations for calculating the convection and radiation heat losses. Sogut *et al.* (Sogut, Oktay, & Karakoc, 2010) performed a complete thermal analysis of a rotary kiln for the cement industry and stated that the energy efficiency of that equipment was 61%; moreover, they indicated that 5% of the waste heat can be utilized with a recovery exchanger. A fundamental issue is that the energy efficiency depends upon the design of the equipment; therefore, it might be determined on each process. According to Saidur *et al.*, the process industries must introduce a variety of energy savings measurements and energy recycling systems to achieve the highest levels of energy efficiency (Saidur, Hossain, Islam, Fayaz, & Mohammed, 2011). The redesign of these systems has not been implemented in developing countries despite their vast needs to save energy as well as to control their industrial pollution. Some alternatives can be performed in order to decrease the environmental problems associated with fossil fuel combustion. According to Olajire (Olajire, 2010), they are (1) reducing energy intensity; (2) reducing carbon intensity, i.e. use of carbon-free

fuel; and (3) enhancing the sequestration of CO₂. This study aims to analyze the thermal behavior of an innovative vertical axial rotary kiln for pottery production fuelled with a cleaner gas fuel, and the variation of the energy efficiency due to continuous operation.

METHODOLOGY

Vertical rotary kiln

The detailed layout of the kiln is illustrated in figure 1. The vertical rotatory kiln contained some fixed pieces; two chimneys welded to the cover (1) take out the flue gases from the drying and cooling stages. This cover was installed over an aluminum rounded external plate (6), where the burners (5) were mounted; meanwhile, this plate was supported by a steel basis (13). The aluminum plate enclosed the heat insulator (4), mainly white glaze fiber, and the external wall of the chambers

(3). These were made of refractory bricks, as well as the internal walls (2); two horizontal metallic layers were installed to place the pottery samples inside the chambers. Some holes were made at the middle of the internal walls to promote the diffusion of the flue gases from the sintering to the cooling and the drying stages. The internal walls were mounted over a circular plate (7) fixed to the bearing system (8-12) making possible the rotation of the chambers inside the kiln.

Experimental test setup

The tests were performed at the laboratory of Thermal Plants and Renewable Energy, Bogotá Colombia (4,638° N -74,084° W, 2,630 m above mean sea level). The fuel used was propane and a gas flowmeter JB2-M measured the fuel consumption. It was installed between the gas tank and the burners. Fuel flow rate was controlled by regulating the outlet pressure of the gas, but an on-off valve was installed to prevent any ac-

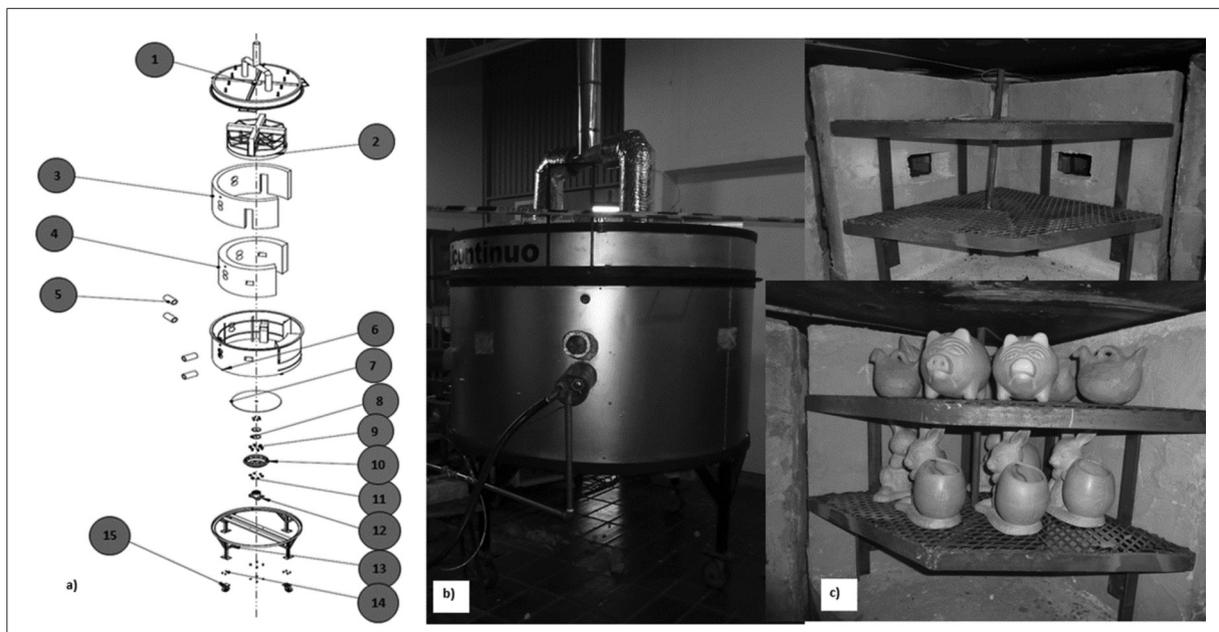


Figure 1. Schematic layout of the vertical axial rotary kiln (a-b) and inner chambers for pottery samples (c)

Source: Own work.

cident. The oxidizer was air; it was fed into the kiln by using a compressor. The inlet pressure was regulated with a control system; however, the outlet pressure was set at 30 kPa. A proportional valve changed the air flow rate according to an electrical signal and the volumetric rate was recorded by an air flow meter. A schematic of the experimental setup is presented in figure 2.

The inner temperatures at each stage (TR1, TR2, TR3, TR4), the ambient and the outlet flue gas temperature (TR5) were sensed using K-type thermocouples and recorded each minute. Moreover, a surface K-type thermocouple was employed to measure the temperature of the external surface at different places; three measurements were performed at different positions of the cover, the external vertical wall and the base. The flue gas composition was monitored using a Bacharach model 300 gas analyzer.

Three tests of seven hours were performed to identify repeatability; three hours were needed for heating the oven until the temperature at sintering stage (TR2) reached 800 °C. Afterwards, the chambers rotated clockwise; hence, the ceramic samples moved to the following stage as illustrated in figure 3. Two hours later, the compartments spun once more, and a new cycle began. That process was followed twice.

Energy efficiency evaluation

The energy efficiency was evaluated in accordance with Carvalho *et al* (2013) and Sogut, Oktayand Karakoc (2010). We used an indirect method by measuring the different heat losses. The thermal energy spent by the system was calculated with the propane lower heating value, according to equation (1). Where, E_{in} (kJ) is the energy load

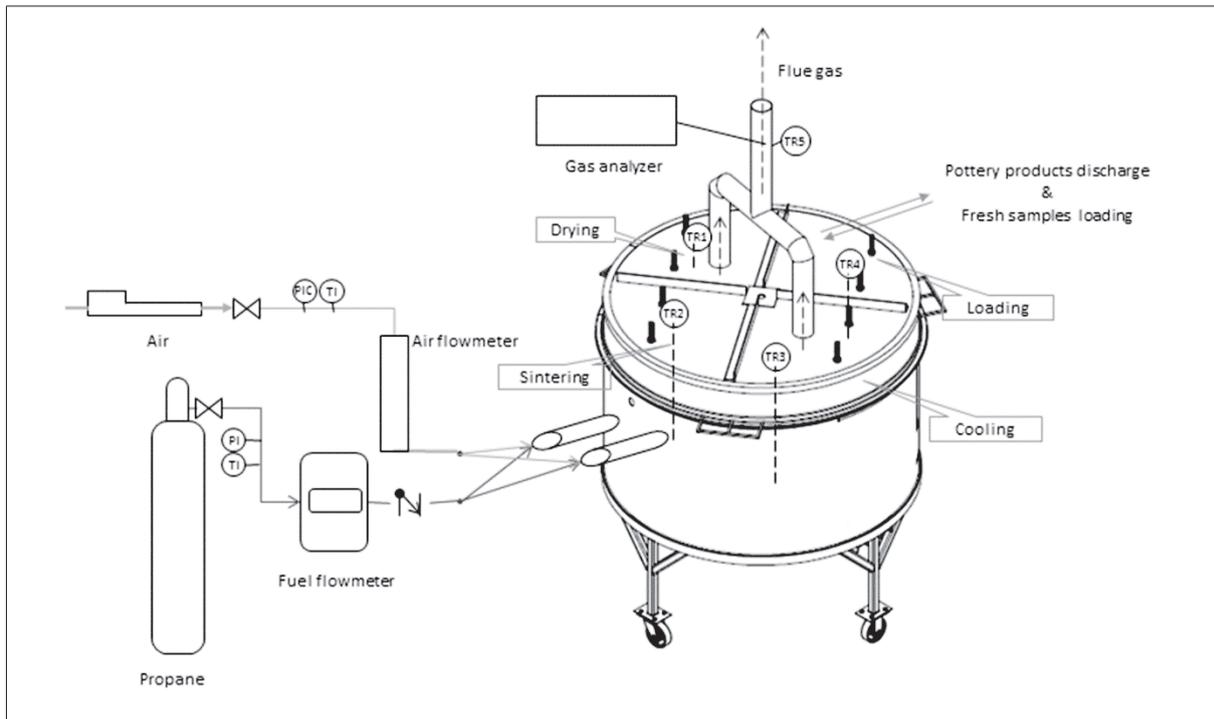


Figure 2. Schematic diagram of the experimental setup

Source: Own work.

per cycle; \dot{m}_{fuel} (kg/s) is the average fuel mass flow rate; LHV_{fuel} (KJ/kg) is the fuel heating value, and dt (s) is the time. The parameters needed for this calculation are in table 1.

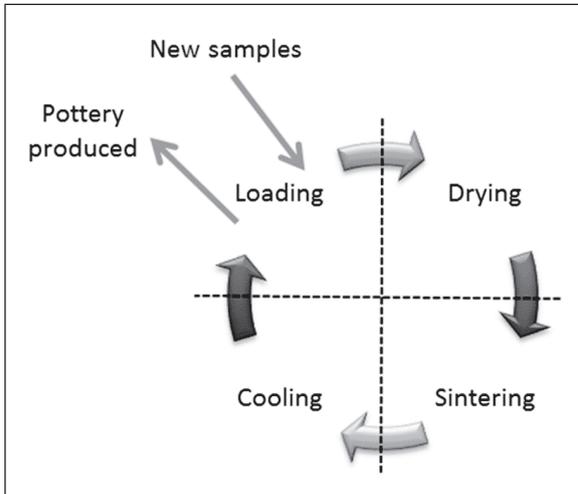


Figure 3. Path followed by the ceramic samples in the kiln after each rotation

Source: Own work.

$$E_{in} = \dot{m}_{fuel} * LHV_{fuel} * dt \quad (1)$$

In accordance with equation (2), the outlet energy was equal to the sum of the energy losses due to convection (E_c), radiation (E_r) and the en-

ergy losses in the flue gases (E_{fg}). The convection and radiation heat losses changed with time; they varied depending upon the temperature of each stage. Therefore, the surface temperatures at different sections were monitored.

$$E_{out} = E_c + E_r + E_{fg} \quad (2)$$

$$E_c = E_{c_{loading}} + E_{c_{drying}} + E_{c_{sintering}} + E_{c_{cooling}} \quad (3)$$

$$E_r = E_{r_{loading}} + E_{r_{drying}} + E_{r_{sintering}} + E_{r_{cooling}} \quad (4)$$

The convection heat losses (E_c) were evaluated by equation (3); where $E_{c_{loading}}$ (kJ), $E_{c_{drying}}$ (kJ), $E_{c_{sintering}}$ (kJ) and $E_{c_{cooling}}$ (kJ) were the convection heat losses from the chambers located at the loading, drying, sintering and cooling stages, respectively. In the same manner, the radiation heat losses were evaluated independently for each stage by equation (4). Here, three main components constituted the losses of each stage; thus, either convection (E_{c_y}) or radiation heat losses (E_{r_y}) at stage y were the sum of the heat transferred from the wall, the cover and the base to the ambient in accordance with equations (5) and (6).

$$E_{c_y} = E_{c_{ybase}} + E_{c_{ywall}} + E_{c_{ycover}} \quad (5)$$

$$E_{r_y} = E_{r_{ybase}} + E_{r_{ywall}} + E_{r_{ycover}} \quad (6)$$

Table 1. Parameters used during convection and radiation heat losses calculation

Parameter	Symbol	Value
Area of the cover (m ²)	A_{cover}	0.4418
Area of the external wall (m ²)	A_{wall}	3.1526
Area of the base (m ²)	A_{base}	0.4418
Convection heat transfer coefficient cover (W m ⁻² °C ⁻¹)	h_{cover}	5.30
Convection heat transfer coefficient wall (W m ⁻² °C ⁻¹)	h_{wall}	5.95
Convection heat transfer coefficient base (W m ⁻² °C ⁻¹)	h_{base}	2.97
Aluminum emissivity	ϵ	0.09
Stefan's constant (W m ⁻² K ⁻⁴)	σ	$5.67 * 10^{-8}$

Source: Own work.

Convection heat losses depended upon the heat transfer coefficient (h_x), the cross sectional area (A_x) and the instantaneous temperature difference between the surface and the ambient ($T_{i_x} - T_{amb}$). The latter variable changed with time; therefore, overall convection heat losses were calculated using equation (7) on a dynamic state. Hence, x meant the position where the measure was made (base, wall or cover) and y was the corresponding stage (loading, drying, sintering or cooling).

$$E_{c_{yx}} = h_x * A_x * \int_0^t \frac{d(T_{i_{yx}} - T_{amb})}{dt} \quad (7)$$

Meanwhile, the radiation heat losses also varied according to the position. The losses at a specific place were calculated using equation (8). $E_{r_{yx}}$ (kJ) was the radiation heat at the stage y and the section x (base, wall or cover). According to equation (9), ε was the emissivity of Aluminum, A_x (m²) was the area of the section, and σ (W m⁻² K⁻⁴) was the Stefan-Boltzmann constant. The parameters employed for determining convection and radiation heat losses are presented above in table 1.

$$E_{r_{yx}} = \varepsilon * \sigma * A_x * \int_0^t \frac{d(T_{i_{yx}}^4 - T_{amb}^4)}{dt} \quad (8)$$

The energy losses in the flue gases (E_{f_g}) were evaluated using an empirical correlation for combustion systems and the inlet energy in accordance with equations (9) and (10). Here, FT (°C) was the flue gas temperature, AT (°C) represented the ambient temperature, A_2 and B were factors dependent upon the fuel, and O_2 (%) was the Oxygen measured by the gas analyzer. Consequently, the energy efficiency was defined based on the ratio between the sum of the heat losses and the energy supplied as indicated by equation (11).

$$E_{f_g} = \frac{(qA * E_{in})}{100} \quad (9)$$

$$qA = (FT - AT) * \frac{(A_2)}{21 - O_2} \quad (10)$$

$$\eta = \left(1 - \frac{(E_{out})}{E_{in}} \right) * 100 \quad (11)$$

RESULTS AND DISCUSSIONS

Average air-fuel ratio and energy consumption

Three tests were performed in order to establish the reliability of the oven when the set-point at the sintering stage was 800 °C. The first stage of the test spent 160 minutes while the internal temperature at sintering stage reached the desired temperature (heating stage). Afterwards, the chambers rotated clockwise; thus, the samples placed at drying moved to the sintering stage, where they remained 120 minutes (steady cycle 1). Finally, we completed the process and moved the samples to the cooling stage for 120 minutes (steady cycle 2).

The fuel consumed to heat the oven was 45% higher than the fuel required for the oven operation on each steady cycle. The fuel spent during the heating stage was 1.45 m³ while the fuel needed for each cycle was 1 m³. In the first step, the oven employed the energy to warm the walls and heat them up. We monitored the air fuel ratio and the equivalence ratio throughout the tests; the results of average parameters are presented in table 2. The low air rate improved the energy efficiency because there was no heat wasted on warming the excess air stream. Meanwhile, table 2

Table 2. Average air fuel ratio and consumption

	Fuel rate (m ³ h ⁻¹)	Air rate (m ³ h ⁻¹)	A/F ratio	Eq Ratio	Energy load (MJ)
Preheating	0.51	16.34	20.125	1.298	128.5
Steady State 1	0.50	15.55	19.622	1.266	88.5
Steady State 2	0.46	12.81	17.547	1.132	88.4

Source: Own work.

shows the energy supplied to the system. It was calculated assuming the propane heating value as 46.35 MJkg⁻¹. While the oven gained energy and the inner temperature increased, the energy load decreased. In fact, a reduction of 30% could be reached after completing the preheating stage.

Thermal behavior

The figure 4 shows the average temperature inside each chamber for the different stages during the process. Throughout the tests, the highest temperature was in the sintering stage; also the time spent on reaching the set point was 170 minutes, and the heating rate was 3.98 °Cmin⁻¹. As we mentioned before, the chambers rotated clockwise after reaching this temperature; thus, the samples located on the drying stage moved to the sintering stage. Meanwhile, the chamber at the sintering stage went to cooling. This rotation changed the temperatures inside each stage; the sintering mean temperature decreased from 800°C to 541°C, in the cooling stage the temperature increased 160°C whereas for the loading and drying stage the thermal gradient was less than 100°C. During the first steady cycle, we controlled the fuel and air mass rate based on the sintering temperature; the main objective was to maintain that parameter as constants as possible. That cycle last two hours, from minute 170 to 290, with a heating rate about 6.52 °Cmin⁻¹. The chamber in the sintering stage reached the set point again and established a new thermal equilibrium condition after 50 minutes.

Throughout this state, the average temperatures in each stage were 135.4°C at loading chamber, 143.55°C drying, 813.35°C sintering, and 289°C cooling; these values were adequate because in that way the ceramic samples were not exposed to high thermal gradients resulting on stronger and more resistant pottery products.

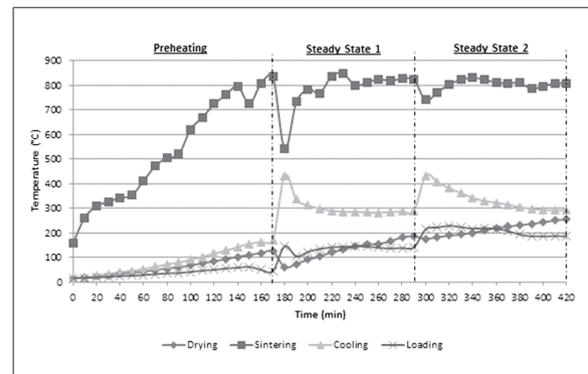


Figure 4. Temperature profile of each stage during the process

Source: Own work.

The chambers spun again after minute 290; the samples placed in the sintering stage went to cooling, and the dry samples moved to sintering. Hence, another cycle began, and the mean temperatures on each stage changed again; the temperature of the sintering stage decreased to 740°C, and the cooling stage received the sintered samples increasing the mean temperature to 430°C instantaneously. Meanwhile, the temperature differences at the drying and loading stages changed less than 100°C. In this state, the design

of the kiln proofed to need less time before stabilizing. The heating rate went down to $3.2^{\circ}\text{C min}^{-1}$, and the oven reached the thermal equilibrium after 20 minutes. The mean temperatures of the loading, drying, sintering and cooling stage were 204°C , 223°C , 809°C and 321°C respectively.

Convection and radiation heat losses

The radiation and convection heat losses pointed out how much energy the kiln transferred from the external surfaces to the ambient. The temperature profile at the cover and the base surface were similar, meaning a similar distribution of the heat fluxes in the vertical direction. Figures 5 and 6 present the variation of the external surface temperature at the cover and the vertical wall of the oven during the tests. The average ambient temperature at the test was 20°C .

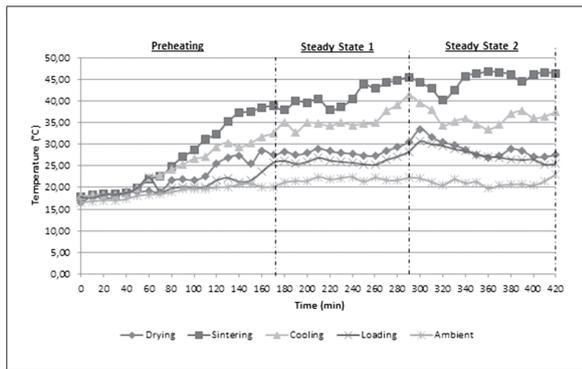


Figure 5. Temperature profile of the kiln cover surface at the different stages of the system

Source: Own work.

The heat flux was higher in the axial direction, and the external wall surface temperature was always greater than the temperatures at the cover and base for all stages. The behavior of the external temperatures was similar to that presented in figure 4; after each rotation, the temperatures of the different stages changed, but the equipment reached the thermal equilibrium soon. Table 3 summarizes the

average temperatures at the surface of the cover, the wall and inside each stage during the steady states. Regarding the insulation of the equipment, these values demonstrate an adequate reduction of the temperatures. Comparing the mean temperature inside the chamber with that of the respective external surface indicated the effectiveness of insulation. Temperatures reduction varied between 80 to 95%, while in the sintering stage, the temperature decreased more than 90%. The chambers had the same thermal distribution; the differences between the temperature at the wall and the cover were almost the same, 9°C was the highest difference recorded; thus, thermal homogeneity at each stage can be assumed for further analysis.

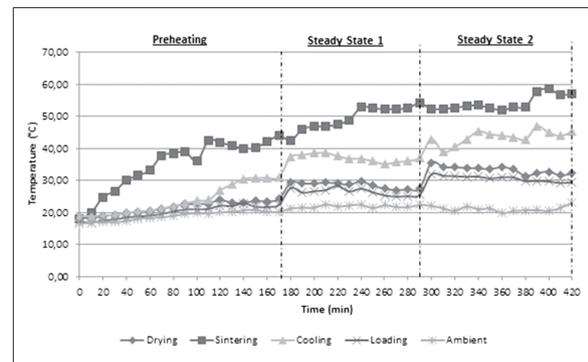


Figure 6. Temperature profile of the external wall surface at each stage

Source: Own work.

The convection and radiation heat losses increased after each rotation due to the higher temperature difference between the surfaces and the ambient. Table 4 summarizes the energy losses; the heat, wasted at sintering stage, shared between 43 to 62% of the total convection losses and meant about 45 to 60% of the overall radiation losses. More work should focus on reducing the energy fluxes from the sintering stage surfaces to the ambient. Therefore, the addition of more insulation between the chambers and the external wall or the use of materials with a lower thermal conductivity constant, are attractive alternatives.

Table 3. Mean value and standard deviation of the temperatures recorded inside and at the external surfaces of each stage during the steady states.

Location	Steady state 1						Steady state 2					
	Inside		Cover & Base		Wall		Inside		Cover & Base		Wall	
Stage	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	Σ	\bar{x}	σ
Loading	135.46	12.51	26.22	0.92	26.32	1.09	204.84	17.15	27.36	1.32	30.47	0.77
Drying	143.55	31.52	28.47	1.00	28.33	0.97	223.17	22.65	28.27	1.23	33.09	1.02
Sintering	813.35	24.12	41.90	2.72	50.66	2.82	809.39	12.62	45.22	2.19	54.27	2.43
Cooling	289.62	8.862	36.14	2.39	36.83	1.16	321.22	30.08	35.59	1.29	43,88	1,73

Source: Own work.

Table 4. Convection and radiation heat losses

	Convection heat losses (MJ)			Radiation heat losses (MJ)		
	Preheating	Steady state 1	Steady state 2	Preheating	Steady state 1	Steady state 2
Loading (MJ)	0.296	0.727	1.564	0.028	0.070	0.150
Drying (MJ)	0.645	1.060	1.998	0.061	0.103	0.194
Sintering (MJ)	3.539	4.257	5.514	0.306	0.425	0.591
Cooling (MJ)	1.205	2.401	2.702	0.117	0.243	0.379
Total (MJ)	5.685	8.445	11.778	0.512	0.841	1.314

Source: Own work.

Flue gases heat losses

A valuable advantage of this innovative kiln was the use of gaseous fuels instead of solid fuels. Several small and medium-scale ceramic industries in Colombia employ coal at their furnaces despite the low energy efficiency, the high air fuel ratios and the high flue gas heat losses. The low equivalence ratio (<1.3) had a direct relationship on the flue gas composition and the heat losses. The flue gas mean composition changed during each rotation due to the temperature variation at each chamber. The Oxygen content was 14.37%, 12.51% and 11.65%, the CO emissions varied, from 33 to 93 ppm, and the CO₂ moved from 4.2% to 7.5%. We mentioned above that flue gas losses depended upon the Oxygen content and the temperature; as defined by empirical equations established to calculate heat

losses based on these parameters. The design of the kiln had not neither flue gas heat recovery nor air preheating systems; therefore, the temperature of the flue gases was about 250°C, but, due to lower Oxygen content after each rotation, the heat losses fell down from 21.34% to 18.18%. After the preheating state, the flue gas losses were 27.42 MJ, 38% higher than the losses at steady cycles 1 and 2, 17.01 and 16.07 MJ respectively. One way to reduce these losses is to install a heat exchanger warming up the air supplied.

Energy efficiency evaluation

The evaluation of the efficiency of this system brought the ratio between the energy needed in the process and the energy supplied. Figure 7 shows the distribution of the energy consumption dur-

ing each state; the convection and radiation heat losses were associated together because the latter meant less than 1.5% of the energy load. Based on the indirect method, where the efficiency depended on the losses, the efficiency at each state decreased from 73.8% to 67% due to the higher convection heat losses. During the preheating stage, the equipment consumed energy to rise the temperature at each chamber until the sintering stage reached the set point; therefore, we did not have any production of ceramics. This means that the energy spent at that phase was compulsory, but it was not directly related with the manufacturing process. During the steady states 1 and 2, we sintered the ceramic samples, so the energy consumed in these states was productive. The process in traditional commercial batch systems comprehends the preheating period and a single steady state; so, the energy efficiency becomes the ratio between the productive energy in the steady state and the total energy fed. The efficiency calculated in that way was 28.67% for this equipment. The main advantage of this design is that we can process more samples without shutting down the equipment; we just have to rotate the chambers, and a new steady cycle begins. After two steady states, the process energy efficiency was 39.76%, higher than that of traditional batch ceramic systems. Assuming a constant thermal

behavior as found during the steady states, we can determine that the productive energy efficiency of this equipment becomes was about 60% after 12 cycles or 24 hours on a continuous mode.

CONCLUSIONS

The energy efficiency of the designed rotary kiln was evaluated based on the real energy employed for sintering and the total energy supplied. This innovative design demonstrated that a continuous process increased the productive energy efficiency to 60%, in comparison with the typical batch processes, employed in Colombia, where this parameter was around 35%. In this manner, the small and medium scale industries could become more competitive based on the reduction of heat losses during preheating and the decrease of the fuel consumption.

The design of this kiln proven to be stable whereas constant temperatures at each stage were reached faster after each rotation; furthermore, the share of convection and radiation heat losses decreased. Thus, this design could be implemented to replace the traditional systems based on coal combustion, which have higher heat losses, and do not let continuous ceramic processing. The use of gaseous fuel instead of coal mitigates the emission of greenhouse gases preventing health diseases due to particulate matter and pollutants such as CO₂, SO_x or NO_x. In order to boost the efficiency of this design a recovery heat exchanger should be installed in the flue gas outlet; so, the air could be preheated and the temperature of the gases reduced. These results suggest the feasibility of a rotary kiln for pottery production with lower emissions and higher energy efficiencies. The use of this kiln with an air preheating system during longer periods merit further study; meanwhile, the analysis of the behavior of the system fuelled with other gaseous fuels, such as biogas or syngas resulting of biomass and coal gasification, is remarkable.

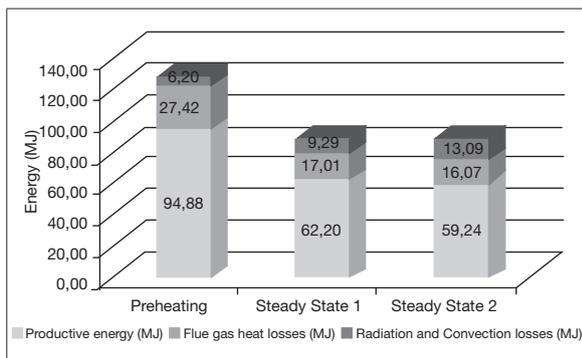


Figure 7. Distribution of the heat losses and the productive energy after each rotation

Source: Own work.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors acknowledge financial support of Colciencias by the project code 1101-521-29311,

and the technical support of the staff of the Clean Development Mechanisms and Energy Management Research Group.

REFERENCES

- Artesanías de Colombia S.A. (2008). *Proyecto de mejoramiento en la calidad y certificación de productos de artesanos en 13 comunidades ubicadas en los departamentos del Atlántico, Antioquia, Boyacá, Caldas, Cauca, Chocó, Santander, Sucre y Valle del Cauca*. Bogotá, Colombia.
- Carvalho, L., Wopienka, E., Lundgren, J., Kumar, V. K., Haslinger, W., *et al.* (2013). Performance of a Pellet Boiler Fired with Agricultural Fuel. *Applied Energy*, *104*, 286-296.
- Cheng, J., Zhou, J., Liu, J., Zhou, Z., Huang, Z., Cao, X., *et al.* (2003). Sulfur Removal at High Temperature during Coal Combustion in Furnaces: A Review. *Progress in Energy and Combustion Science*, *29*, 381-405.
- Concejo Municipal de Ráquira (2012). *Acuerdo por medio del cual se adopta el plan de desarrollo del municipio de Ráquira Boyacá "Porque Ráquira somos todos". Acto 006*. Ráquira, Colombia.
- Ginsberg, T., & Modigell, M. (2011). Dynamic Modeling of a Rotary Kiln for Calcination of Titanium Dioxide White Pigment. *Computer & Chemical Engineering*, *35*, 2437-2446.
- International Energy Agency (IEA) (2011). *CO2 Emissions from Fuel Combustion*. París: International Energy Agency.
- International Energy Agency (IEA) (2012). *Key World Energy Statistics*. Retrieved from www.iea.org
- Jones, J., Bridgeman, T., Darvell, L., Grudka, B., Saddawi, A., & Williams, A. (2012). Combustion Properties of Torrefied Willow compared with Bituminous Coals. *Fuel Processing Technology*, *101*, 1-9.
- Marias, F. (2003). A Model of a Rotary Kiln Incinerator Including Processes Occurring Within the Solid and the Gaseous Phases. *Computers & Chemical Engineering*, *27*, 813-825.
- Matau, F., Nica, V., Postolache, P., Ursachi, I., Cortiug, V., & Stancu, A. (2013). Physical study of the Cucuteni Pottery Technology. *Journal of Archaeological Science*, *40*, 914-925.
- Matheus, J., Miller, B., Song, C., Schobert, H., Botha, F., & Finkleman, R. (2013). The EBB and Flow of US Coal Research 1970-2010 with a Focus on Academic Institutions. *Fuel*, *105*, 1-12.
- Olajire, A. (2010). CO2 Capture and Separation Technologies for end-of-Pipe Applications - A review. *Energy*, *35*, 2610-2628.
- Rasmussen, K., De la Fuente, G., Bond, A., Mathiesen, K., & Vera, S. (2012). Pottery Firing Temperatures: A New Method for

- Determining the Firing Temperature of Ceramics and Burnt Clay. *Journal of Archaeological Science*, 39, 1705-1716.
- Saidur, R., Hossain, M., Islam, M., Fayaz, H., & Mohammed, H. (2011). A Review on Kiiln System Modeling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 2487-2500.
- Sinning Durán, A. (2010). *Relaciones ecológicas urbano-rurales en el municipio de Ráquira (Boyacá)* (tesis maestría). Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
- Sogut, Z., Oktay, Z., & Karakoc, H. (2010). Mathematical Modeling of Heat Recovery from a Rotary Kiln. *Applied Thermal Engineering*, 30, 817-825.
- Trindade, M., Dias, M., Rocha, F., Prudencio, M., & Coroado, J. (2011). Bromine Volatilization during Firing of Calcareous and Non-Calcareous Clays: Archerometric Implications. *Applied Clay Science*, 53, 489-496.
- UPME (2012). *Cadena del carbón*. Bogotá: UPME.
- Zhang, J., Zhou, Z., Ma, L., Li, Z., & Ni, W. (2013). Efficiency of Wet Feed IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle) Systems with Coal-Water Slurry Preheatng Vaporization Technology. *Energy*, 51, 137-145.

Planeación óptima de sistemas de distribución considerando múltiples objetivos: costo de inversión, confiabilidad y pérdidas técnicas

Optimal planning of distribution systems considering multiple objectives: investment cost, reliability and technical losses

ANA MARÍA MEJÍA SOLANILLA

Ingeniera electricista, magíster en Ingeniería Eléctrica, ingeniera de Diseño Eléctrico de Transformadores de Potencia, ABB Ltda., Pereira, Colombia.

Contacto: ana.mejia@co.abb.com

RICARDO ALBERTO HINCAPIÉ ISAZA

Ingeniero electricista, magíster en Ingeniería Eléctrica, estudiante de doctorado en Ingeniería, docente del Programa de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia. Contacto: ricardohincapie@utp.edu.co

RAMÓN ALFONSO GALLEGO RENDÓN

Ingeniero electricista, magíster en Sistemas de Potencia, doctor en Ingeniería Eléctrica, docente del Programa de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia. Contacto: ragr@utp.edu.co

Fecha de recepción: 4 de febrero del 2014

Clasificación del artículo: investigación

Fecha de aceptación: 6 de mayo del 2014

Financiamiento: Vicerrectoría de Investigaciones, Innovación y Extensión Universidad Tecnológica de Pereira

DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.1.a08>

Palabras clave: algoritmo genético, confiabilidad, optimización, planeamiento de sistemas eléctricos.

Keywords: genetic algorithm, optimization, power system planning, reliability.

RESUMEN

En este artículo se propone una metodología para solucionar el problema del planeamiento multiobjetivo de sistemas de distribución de energía eléctrica, empleando un algoritmo elitista de ordenamiento no dominado (NSGA-II). Esta metodología considera cuatro modelos matemáticos,

donde las funciones objetivo son costos fijos, costos variables, costos fijos y variables, y confiabilidad de la red; como conjunto de restricciones se tienen criterios técnicos y operativos. Al solucionar cada uno de estos modelos se identifican los elementos comunes, los cuales son fijados para la siguiente etapa del proceso; esto se repite hasta hallar una configuración final del sistema. De esta

forma, en cada paso del algoritmo se generan especies de cortes, los cuales reducen el espacio de solución. La metodología es verificada con un sistema de distribución de la literatura especializada y se obtienen resultados que muestran la efectividad del método al encontrar un punto de equilibrio entre todos los objetivos considerados.

ABSTRACT

In this article, a method to solve the multi-objective planning problem of electric power distribution systems is proposed by means of using a non-dominated sorting elitist algorithm (NSGA-II). This

method considers four mathematical models, where fixed costs, variable costs, fixed and variable costs, and network reliability are considered as objective functions. The set of constraints is comprised of technical and operational criteria. When all mathematical models are solved common elements to the solutions with each model are found. This process is repeated until a final configuration of the system is found. In this manner, in each step of the algorithm, sorts of cuts are generated, which reduce the solution space of the problem. The method is verified with a distribution system from the specialized literature, obtaining results that show the effectiveness of the method when an equilibrium point is found among all the objectives considered.

* * *

INTRODUCCIÓN

El aumento del consumo de energía eléctrica de cargas existentes y la aparición de nuevas zonas, debido a la construcción de sectores residenciales, comerciales e industriales, son factores que ocasionan que los operadores de red tengan que realizar acciones de una forma adecuada, con el fin de abastecer la cantidad de energía requerida. El estudio del crecimiento de la demanda de energía eléctrica y el conjunto de estrategias planteadas para abastecer esta demanda se conoce como el planeamiento de sistemas de distribución (PSD) (Bernal-Agustín, 1998). Si estas estrategias no son apropiadas, se pueden presentar problemas tales como regulación de tensión por fuera de límites permitidos, incremento de pérdidas técnicas, sobrecargas en elementos, pérdida de confiabilidad de la red, sobrecostos en los proyectos y empeoramiento de índices de continuidad y calidad del servicio. Para evitar estos inconvenientes, en el PSD se deben tener en cuenta los siguientes aspectos: aumento del calibre de los alimentadores existentes, ampliación de las subestaciones existentes, ubicación y dimensionamiento de nuevas subesta-

ciones de distribución, ubicación y dimensionamiento de nuevos tramos de red, reconfiguración de la topología de la red, reubicación de transformadores de distribución y ubicación de elementos de protección y control para mejorar la confiabilidad en la red.

Adicionalmente, en la vida real el problema del planeamiento de sistemas de distribución involucra varios objetivos; sin embargo, tradicionalmente se ha planteado un modelo matemático con una única función objetivo que incluye los costos del proyecto. En los modelos matemáticos propuestos para este problema se consideran funciones multiobjetivo, las cuales tienen en cuenta costos de inversión, operación y criterios de confiabilidad. La importancia de emplear dos o más objetivos en la solución del problema radica en una mejor aproximación del modelo matemático empleado para describir los sistemas reales.

Para solucionar el problema de la planeación multiobjetivo de sistemas de distribución, se han publicado diversos artículos en la literatura especializada, con diferentes modelos matemáticos y

técnicas de solución. Con respecto a las funciones objetivo consideradas se tienen: costos y confiabilidad (Ramírez y Bernal, 2001); costos, confiabilidad y riesgo de inversión (Ramírez y Domínguez, 2004); costos e índices de fallas del sistema (Carrano, Soares, Takahashi, Saldanha y Neto, 2006); costos, pérdidas y caída de tensión (Mori y Yamada, 2007); costos y caída de tensión (Mantway y Al-Muhaini, 2008); costos, pérdidas e interrupción del servicio (Kong et ál., 2008); costos y consumo de energía (Kayu y Ooka, 2009); costos, confiabilidad, pérdidas y caída de tensión (Ganguly, Sahoo y Das, 2011); costos de inversión y costos de interrupción del servicio (Ganguly, Sahoo y Das, 2013). Para solucionar el problema se han considerado diversas técnicas multiobjetivo, entre las que se destacan: algoritmos evolutivos (Ramírez y Bernal, 2001; Carrano, Soares, Takahashi, Saldanha y Neto, 2006; Mori y Yamada, 2007; Kong et ál., 2008; Kayu y Ooka, 2009); búsqueda tabú (Ramírez y Domínguez, 2006); cúmulo de partículas (Mantway y Al-Muhaini, 2008; Sahoo, Ganguly y Das, 2012).

Con el fin de solucionar el problema planteado, se propone una metodología en la que se emplea como técnica de solución un algoritmo genético de ordenamiento no dominado (*Non-dominated sorting genetic algorithm* - NSGA-II). Esta metodología emplea cuatro modelos matemáticos, todos con dos funciones objetivo. Con la aplicación de estos modelos se busca tener más herramientas al momento de tomar decisiones, para así involucrar funciones objetivos que impacten directamente en la solución del problema. Las funciones objetivo consideradas son: costos fijos, costos variables, costos fijos y variables y confiabilidad de la red (energía no servida [ENS]).

El conjunto de restricciones está compuesto por las ecuaciones de balance nodal, capacidades máximas permitidas para los elementos del sistema, máxima caída de tensión permitida y ra-

dialidad de la red. Con la aplicación de la metodología se encuentran elementos comunes a las soluciones halladas con cada modelo, los cuales son definidos en cada paso del proceso; esto se repite hasta hallar una configuración final del sistema que satisfaga los requerimientos de energía eléctrica de los usuarios de forma confiable y segura. De esta forma en cada paso del algoritmo se generan especies de cortes (tendencias), los cuales reducen el espacio de solución del problema. La respuesta encontrada en un sistema de distribución refleja la importancia de considerar la metodología propuesta en el planeamiento de estos sistemas.

Este artículo está organizado de la siguiente forma: la primera sección (la presente) corresponde a la introducción; en la segunda sección se describe la formulación del problema; en la tercera sección se ilustra la metodología propuesta; en la cuarta sección se presenta la aplicación de la metodología propuesta y los resultados obtenidos, finalmente, se encuentran las conclusiones y recomendaciones derivadas de este artículo.

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Para describir el problema del planeamiento de sistemas de distribución de energía eléctrica empleamos cuatro modelos matemáticos del tipo no lineal entero mixto, los cuales consideran dos funciones objetivo cada uno. Inicialmente, se ilustra la nomenclatura empleada. Luego se presentan las funciones objetivo y el conjunto de restricciones de los modelos matemáticos propuestos. Por último, se describen en forma detallada estos modelos.

Nomenclatura empleada

- Conjuntos

Ω_E	Conjunto formado por los nodos del sistema
Ω_S	Conjunto formado por subestaciones existentes y propuestas

Ω_{NS}	Conjunto formado por subestaciones propuestas
Ω_{CS}	Conjunto formado por subestaciones existentes
Ω_F	Conjunto formado por tramos de red existentes y propuestos
Ω_{NF}	Conjunto formado por tramos de red propuestos
Ω_{CF}	Conjunto formado por tramos de red existentes
Ω_i	Conjunto formado por los nodos conectados físicamente al nodo i
Ω_{T_s}	Conjunto formado por tipos de subestaciones
Ω_{T_f}	Conjunto formado por tipos de tramos de red

● Parámetros

$C_{NS,s}$	Costo de una subestación nueva en el nodo i , tipo s (\$)
$C_{NF_{ij,f}}$	Costo de un tramo de red nuevo entre los nodos $i-j$, tipo f (\$)
$C_{CS,s}$	Costo de ampliación de una subestación existente en el nodo i , tipo s (\$)
$C_{CF_{ij,f}}$	Costo de reconductorización de un tramo existente entre los nodos $i-j$, tipo f (\$)
CE	Costo de la energía (\$/kWh)
$S_{D,l,i}$	Demanda en el nivel de carga l , en el nodo i (MVA)
$R_{ij,f}$	Resistencia de la rama entre los nodos $i-j$, tipo f (Ohm)
S_S^{\max}	Máxima capacidad de la subestación tipo s (MVA)
I_f^{\max}	Máxima capacidad del conductor tipo f (A)
V^{\min}	Mínimo límite de voltaje permitido (kV)
f_a	Factor para expresar los costos operativos en valor presente
f_{an}	Factor para expresar los costos del proyecto en anualidades
LD_1	Número de horas del nivel de carga l
nL	Número de niveles de la curva de duración de carga
$\lambda_{ij,f}$	Tasa de falla del tramo de red $i-j$, tipo f (falla/año/km)
$r_{ij,f}$	Tiempo de reparación del tramo de red $i-j$, tipo f (horas/falla)
L_{ij}	Longitud del tramo de red entre los nodos $i-j$ (km)
nT_E	Número de tramos de red existentes
n	Número de nodos de carga del sistema
nS_E	Número de subestaciones existentes

● Variables

$\sigma_{NS,i}$	Variable binaria para instalación de una subestación nueva en el nodo i , tipo s
$\sigma_{NF_{ij,f}}$	Variable binaria para instalación de un tramo de red nuevo $i-j$, tipo f
$\sigma_{CS,i}$	Variable binaria para ampliación de una subestación existente en el nodo i , tipo s
$\sigma_{CF_{ij,f}}$	Variable binaria para reconductorización de un tramo de red existente $i-j$, tipo f
$S_{S,i,l}$	Potencia inyectada por una subestación en el nodo i , en el nivel l (MVA)
$I_{ij,l}$	Corriente que circula por el tramo de red $i-j$, en el nivel de demanda l (A)
\overline{P}_{ij}	Potencia activa que circula por el tramo de red $i-j$ (kW)
$V_{i,l}$	Voltaje en el nodo i , para el nivel de demanda l (kV)

Formulación general

Funciones objetivo

Función objetivo 1 (OF₁). Representa los costos de inversión del sistema (ecuación (1)).

$$OF_1 = f_{an} \times \left[\sum_{ij \in \Omega_{NF}} \sum_{f \in \Omega_{Tf}} (C_{NF_{ij,f}} \sigma_{NF_{ij,f}}) + \sum_{ij \in \Omega_{CF}} \sum_{f \in \Omega_{Tf}} (C_{CF_{ij,f}} \sigma_{CF_{ij,f}}) + \sum_{i \in \Omega_{NS}} \sum_{s \in \Omega_{Ts}} (C_{NS,i} \sigma_{NS,i}) + \sum_{j \in \Omega_{CS}} \sum_{s \in \Omega_{Ts}} (C_{CS,j} \sigma_{CS,j}) \right] \quad (1)$$

Los dos primeros términos representan los costos de inversión de nuevos tramos de red y reconductorización de tramos de red existentes, respectivamente. Los dos últimos términos son los costos de instalación de una nueva subestación y ampliación de la existente, respectivamente.

Función objetivo 2 (OF₂). Considera los costos de operación del sistema (ecuación (2)), los cuales llevan en cuenta el costo de las pérdidas de energía activa en todos los tramos de red del sistema.

$$OF_2 = f_{an} \times \left[\begin{array}{l} f_a \sum_{l=1}^{nL} \sum_{ij \in \Omega_F} \sum_{f \in \Omega_{Tf}} 3 * CE * LD_l \\ * R_{ij,f} * \left[|I_{ij,l}|^2 (\sigma_{NF_{ij,f}} + \sigma_{CF_{ij,f}}) \right] \end{array} \right] \quad (2)$$

Función objetivo 3 (OF_3). Involucra los costos de inversión y operación del sistema (ecuación (3)), en forma conjunta. Por lo tanto:

$$OF_3 = OF_1 + OF_2 \quad (3)$$

Función objetivo 4 (OF_4). Representa la confiabilidad del sistema de distribución por medio de la ENS (ecuación (4)), mediante las tasas de falla y los tiempos de reparación, de acuerdo con el tipo de conductor y la longitud de cada tramo de red considerado. Para su evaluación se emplea el criterio de contingencias $n-1$ (Billinton y Allan, 1996).

$$OF_4 = \left[\sum_{ij \in \Omega_F} \sum_{f \in \Omega_{Tf}} (\lambda_{ij,f}) (L_{ij}) (r_{ij,f}) [\overline{S_{ij}} + \overline{S_{ji}}] \right] \quad (4)$$

Conjunto de restricciones

El conjunto de restricciones se presenta en las ecuaciones (5) a (9). Estas corresponden a balance nodal, capacidad máxima de subestaciones, capacidad máxima de tramos de red, límites de tensión del sistema y radialidad de la red, respectivamente.

$$S_{S_{ij}} = S_{D_{ij}} - S_{G_{ij}} + \sum_{j \in \Omega_s} \left(V_{i,l} * \left(\sum_{f \in \Omega_{Tf}} (\sigma_{NF_{ij,f}} + \sigma_{CF_{ij,f}}) * (I_{ij,l})^* \right) \right)$$

$$\forall i \in \Omega_E; \forall l \in \{1, 2, \dots, nL\} \quad (5)$$

$$S_{S_{ij}} \leq \sum_{s \in \Omega_{Ts}} S_{S_s}^{\max} * (\sigma_{NF_{i,s}} + \sigma_{CF_{i,s}}) \quad \forall i \in \Omega_S; \forall l \in \{1, 2, \dots, nL\} \quad (6)$$

$$|I_{ij,l}| \leq \sum_{f \in \Omega_{Tf}} I_f^{\max} * (\sigma_{NF_{ij,f}} + \sigma_{CF_{ij,f}}) \quad \forall ij \in \Omega_F; \forall l \in \{1, 2, \dots, nL\} \quad (7)$$

$$V^{\min} \leq V_{i,l} \quad \forall i \in \Omega_E; \forall l \in \{1, 2, \dots, nL\} \quad (8)$$

$$nT_E + \sum_{ij \in \Omega_{NF}} \sum_{f \in \Omega_{Tf}} \sigma_{NF_{ij,f}} \leq n + nS_E + \sum_{i \in \Omega_{NS}} \sum_{s \in \Omega_{Ts}} \sigma_{NS_{i,s}} - 1 \quad (9)$$

Modelos matemáticos empleados

Los cuatro modelos matemáticos empleados se ilustran en las ecuaciones (10) a (13).

Modelo matemático 1

$$\begin{array}{l} \min \quad \{OF_1, OF_2\} \\ \text{s.a.} \quad \text{Ecuaciones (5) a (9)} \end{array} \quad (10)$$

Modelo matemático 2

$$\begin{array}{l} \min \quad \{OF_1, OF_4\} \\ \text{s.a.} \quad \text{Ecuaciones (5) a (9)} \end{array} \quad (11)$$

Modelo matemático 3

$$\begin{array}{l} \min \quad \{OF_3, OF_4\} \\ \text{s.a.} \quad \text{Ecuaciones (5) a (9)} \end{array} \quad (12)$$

Modelo matemático 4

$$\begin{array}{l} \min \quad \{OF_2, OF_4\} \\ \text{s.a.} \quad \text{Ecuaciones (5) a (9)} \end{array} \quad (13)$$

METODOLOGÍA PROPUESTA

En esta sección se describe la metodología propuesta para solucionar el problema del planeamiento de sistemas de distribución de energía eléctrica, empleando como técnica de solución el algoritmo NSGA-II.

Codificación empleada

Se emplea un vector con variables enteras que representa una configuración del sistema (figura 1), donde t_e , t_n , s_e y s_n representan el número de tramos de red existentes y nuevos, así como el número de subestaciones existentes y nuevas, respectivamente. En este vector cuando una posición tiene asociado un cero, eso quiere decir que este elemento no se propone en dicha solución. Cuando tiene un valor diferente de cero, quiere decir que ese elemento es propuesto con el tipo descrito en su posición.

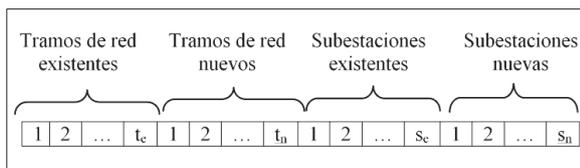


Figura 1. Esquema de codificación

Fuente: elaboración propia.

Técnica de solución

Los aspectos del algoritmo se describen a continuación (Deb, 2004; Gallego, Escobar y Toro, 2008).

Generación de la población inicial: puede generarse usando una técnica heurística constructiva o de forma aleatoria. En este artículo se genera de forma aleatoria.

Selección: se emplea la selección por torneo considerando apilamiento. En esta etapa se comparan dos soluciones y se retorna el ganador, asumiendo que cada solución i tiene un rango de no dominancia y una distancia de apilamiento. Una solución i gana un torneo con otra solución j si la solución i tiene mejor rango (mejor frente de Pareto), o si tienen el mismo rango pero la solución i tiene mayor distancia de apilamiento.

Recombinación y mutación: se aplica la recombinación sobre dos padres, generando dos descendientes directos y seleccionando el de mejor calidad, el cual es sometido a mutación. Esto se realiza hasta completar la población descendiente. Las tasas de recombinación y de mutación se encuentran por pruebas de ensayo y error.

Evaluación de configuraciones e infactibilidades: para la evaluación de las configuraciones los modelos son transformados de restrictos a irrestrictos; de esta forma las violaciones de las restricciones (en caso de que existan) son llevadas a la función objetivo como un valor de penalización, multiplicados por un factor con el fin de unificar unidades de la función objetivo. Para evaluar las configuraciones se emplea un flujo de carga radial de barrido iterativo (Shirmohammadi, Hong, Semlyeny Luo, 1988).

Criterio de parada: el criterio de parada se basa en dos aspectos: si la solución incumbente no mejora después de un número predefinido de iteraciones, o si se alcanza un número máximo de iteraciones del algoritmo.

Selección de una solución del frente

Para seleccionar una solución del frente de Pareto se emplea el criterio max-min, el cual consiste en normalizar para cada solución los valores de ambas funciones objetivo con respecto a los valores extremos encontrados en el frente (Deb, Amrit, Agarwaly Meyarivan, 2000). Una vez normalizadas ambas funciones objetivo, se selecciona el menor valor para cada solución. Luego se obtiene el máximo valor de todos los valores mínimos encontrados previamente. El valor final definido está asociado a la solución encontrada con el criterio max-min, es decir, pertenece a una solución que tiene en cuenta la importancia de cada objetivo considerado, llevando a soluciones centradas en el frente óptimo de Pareto.

Determinación de tendencias de las configuraciones

Al aplicar la técnica de solución a los modelos matemáticos propuestos (ecuaciones (10) a (13)) y luego de seleccionar la mejor solución del frente de Pareto, se comparan las configuraciones encontradas con el fin de hallar una tendencia entre estas (elementos comunes). Una vez se determina esta tendencia, se fijan sus posiciones en el vector codificación y se ejecuta nuevamente el algoritmo con todos los modelos matemáticos propuestos. Este proceso se repite hasta que se encuentra una topología final (tendencia final) que tenga elementos comunes a todas las soluciones de los modelos matemáticos (ver figura 2). Al final de cada tendencia se pueden encontrar tramos de red propuestos que generan anillos en el sistema, por lo que estos elementos no forman parte de los elementos definidos en la siguiente fase del proceso. Adicionalmente, se pueden encontrar tramos de red comunes a los modelos matemáticos que no están conectados al resto del sistema (islas), razón por la cual estos elementos (al igual que los anteriores), tampoco forman parte de los elementos que son definidos en la siguiente fase del proceso; es decir, quedan nuevamente como tramos propuestos para la siguiente iteración (tendencia).

Una vez definida la topología del sistema, se seleccionan los calibres de los conductores. Inicialmente se fijan los calibres que son iguales en los modelos matemáticos. Luego, para los tramos de red con calibres diferentes se define su calibre escogiendo el mayor valor obtenido en los modelos; esto con el fin de dar cumplimiento a los resultados de todos los modelos matemáticos empleados.

Algoritmo

La metodología propuesta se ilustra en la figura 3.

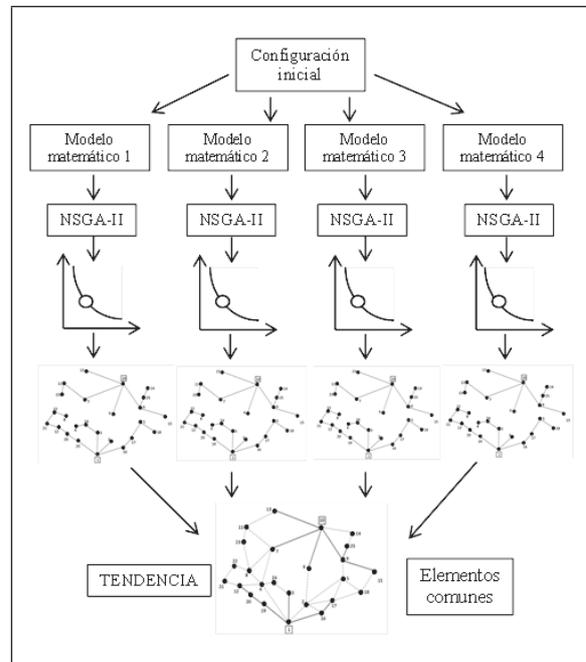


Figura 2. Tendencia empleada

Fuente: elaboración propia.

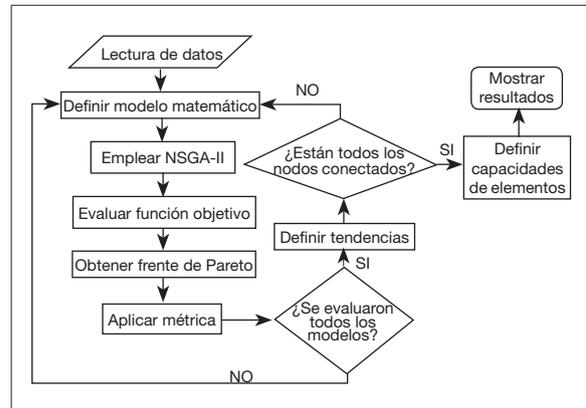


Figura 3. Metodología empleada

Fuente: elaboración propia.

APLICACIÓN Y RESULTADOS

Con el fin de probar la metodología propuesta en este artículo, se empleó un sistema de distribución de 25 nodos (Nahman y Peric, 2008).

Resultados obtenidos

La implementación y aplicación de la metodología se realizó en Matlab R2009b®. En la figura 4 se ilustra la configuración inicial del sistema, cuyo voltaje nominal es 13,2 kV. El nodo con el número 1 corresponde a la subestación existente y el número 10 a la subestación propuesta. Se consideran cuatro tipos de calibres para los conductores y cuatro tipos de subestaciones, los cuales se ilustran en la tabla 1, donde los términos CI y CR corresponden a costos de instalación y repotenciación, respectivamente. Los tramos de red existentes (1-3, 1-16, 1-19) y la subestación existente son del tipo 1.

Los parámetros empleados por el algoritmo son: 60 individuos en la población, 300 generaciones y tasas de recombinación y mutación de 0,9 y 0,05, respectivamente. El comportamiento del algoritmo cuando se emplean los cuatro modelos matemáticos propuestos se presenta en las figura 5 a 8. En estas figuras se observa cómo el algoritmo converge a regiones de buena calidad, al partir de una población inicial generada aleatoriamente. De las figuras 5 a la 7 se observa que las funciones objetivo están en conflicto, ya que el mejoramiento de uno de ellos empeora al otro objetivo. Esta situación no ocurre con el cuarto modelo matemático (figura 8), pues se observa que ambos objetivos están en la misma dirección. De acuerdo con esto para las próximas iteraciones (tendencias) no se considera el cuarto modelo matemático, pues este no considera objetivos en conflicto.

Tabla 1. Tipos de conductores y subestaciones

Tipo	Conductores							Subestaciones		
	R [Ω/km]	X [Ω /km]	A	CI [M\$/km]	CR [M\$/km]	λ	r	MVA	CI [M\$]	CR [M\$]
1	0,8	0,45	454,5	12	4	0,054	10,75	1	20	5
2	0,65	0,42	606,0	20	8	0,096	10,75	2	40	10
3	0,52	0,38	909,0	25	10	0,078	8,95	3	60	15
4	0,4	0,34	1893,9	35	14	0,064	8,95	4	80	20

Fuente: elaboración propia.

De cada frente de Pareto encontrado con los primeros tres modelos matemáticos se selecciona una configuración, usando la métrica descrita en la subsección “Selección de una solución del frente”. Posteriormente, se determinan los elementos comunes, los cuales son definidos para el siguiente paso del proceso. Esto se repite hasta que se encuentra una configuración común a todos los modelos y en la cual no hay nodos desconectados. En la figuras 9 a 11 se presentan las configuraciones encontradas después de evaluar tres tendencias. La topología de la figura 11 corresponde a la configuración final del sistema encontrada por la metodología. Para esta configuración las dos subestaciones son de igual capacidad (tipo 2).

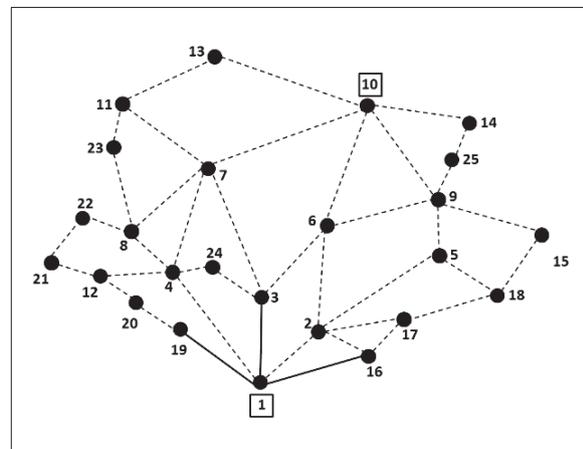


Figura 4. Configuración inicial del sistema de prueba

Fuente: elaboración propia.

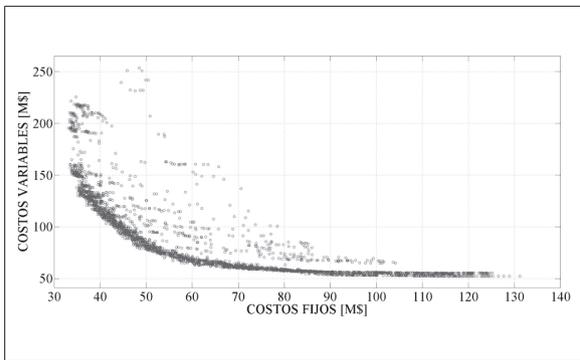


Figura 5. Modelo matemático 1 – Tendencia 1

Fuente: elaboración propia.

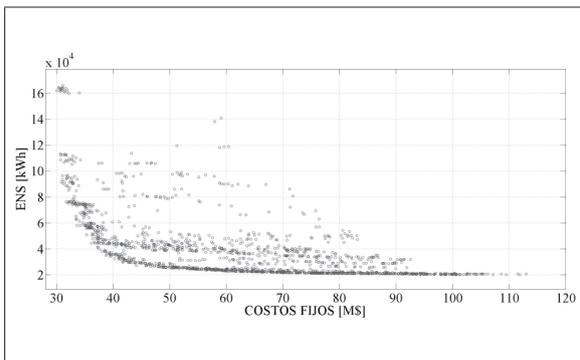


Figura 6. Modelo matemático 2 – Tendencia 1

Fuente: elaboración propia.

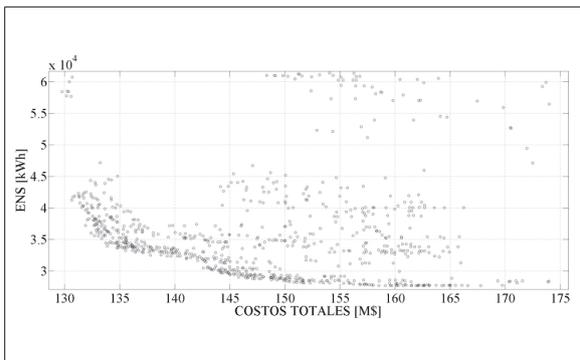


Figura 7. Modelo matemático 3 – Tendencia 1

Fuente: elaboración propia.

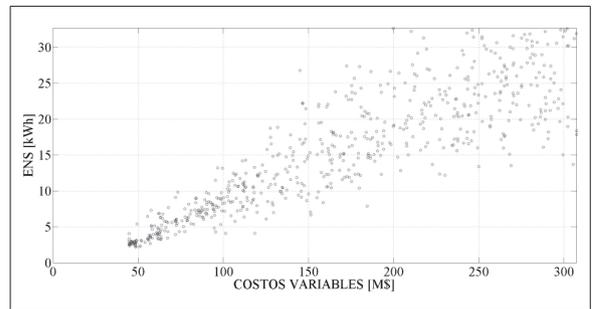


Figura 8. Modelo matemático 4 – Tendencia 1

Fuente: elaboración propia.

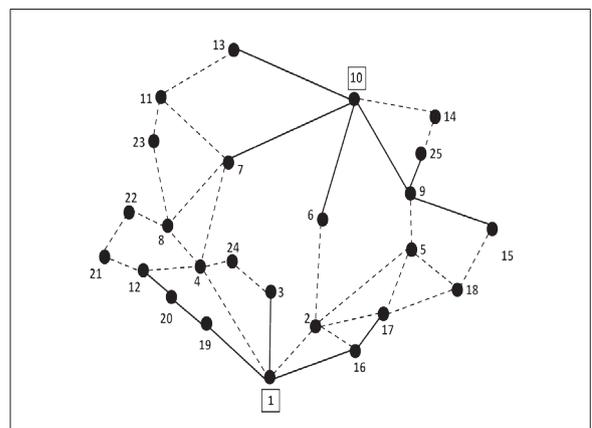


Figura 9. Primer tendencia encontrada

Fuente: elaboración propia.

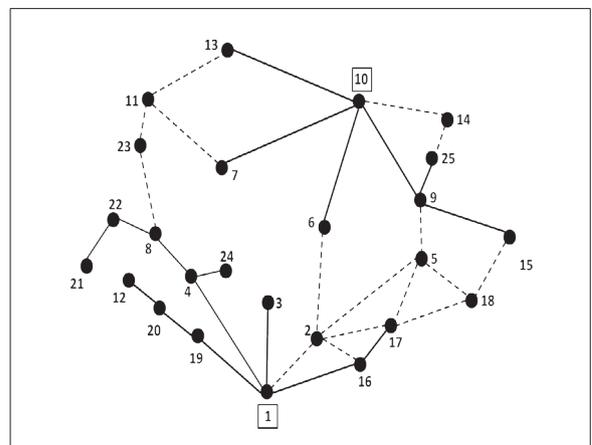


Figura 10. Segunda tendencia encontrada

Fuente: elaboración propia.

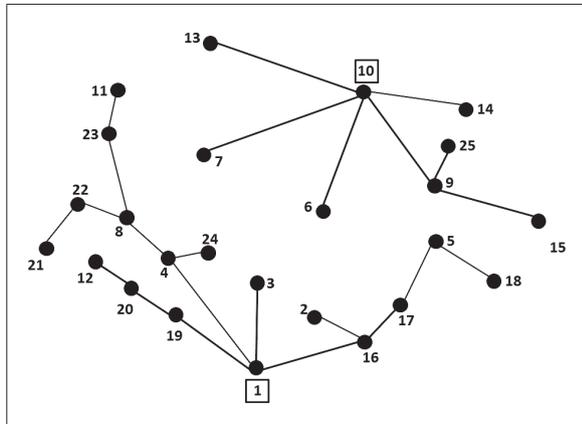


Figura 11. Tercer tendencia encontrada – Configuración final

Fuente: elaboración propia.

Los calibres de cada tramo de red se presentan en la tabla 2. A la configuración seleccionada se le evalúan los tres modelos matemáticos, con los

cuales se obtienen: costos de inversión, costos de operación, costos totales y confiabilidad (ENS). Estos valores se ilustran en la tabla 3.

Discusión de los resultados

Al resolver el modelo matemático 4 (costos de operación vs. confiabilidad), se observa que ambos objetivos están en la misma dirección (figura 8). Esto se debe a que las tasas de falla y los tiempos de reparación vienen dados por calibres de conductor, los cuales disminuyen a medida que aumenta el calibre. Dado que a mayor calibre se tienen menores pérdidas técnicas (disminuye la resistencia) y considerando el aspecto descrito previamente, el algoritmo tiene una tendencia por seleccionar siempre calibres de gran tamaño, pues de esta forma disminuye el nivel de ENS (mejorando la confiabilidad) y reduce el costo de pérdidas de energía (costos operativos).

Tabla 2. Calibres de la configuración final

Tramo	Tipo																
1	3	1	7	10	4	10	13	1	1	4	4	8	22	1	5	18	1
1	16	1	9	15	1	16	17	1	4	8	4	21	22	1	8	23	4
1	19	4	19	20	4	12	20	4	4	24	4	10	14	1	11	23	1
6	10	1	9	10	4	9	25	1	5	17	1	2	16	1	---	---	---

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Valores de las funciones objetivo

Modelo matemático	Función objetivo			
	Costos de inversión [M\$]	Costos de Operación [M\$]	Costos de inversión y operación [M\$]	Confiabilidad (kW-h)
Modelo 1	54,59	93,33	147,92	64 081,24
Modelo 2	43,06	156,09	199,16	61 725,81
Modelo 3	83,67	69,36	153,03	56 836,82
Configuración seleccionada	67,68	83,81	151,49	45 346,02

Fuente: elaboración propia.

Con respecto a los costos de inversión, se observa que la configuración seleccionada tiene un valor mayor que los modelos matemáticos 1 y 2 y menores al modelo 3. Los valores mayores de costos operativos se obtienen con los modelos 1 y 2. Adicionalmente, los costos totales del proyecto (\$ 151,49 millones) son menores que los costos encontrados con los tres modelos matemáticos.

El mayor nivel de ENS se encuentra en el modelo 1, ya que este solamente considera costos en sus funciones objetivo (inversión vs. operación). Sin embargo, cuando en los modelos matemáticos se considera la minimización de criterios de confiabilidad, se observa que este valor es menor que el caso en que no se consideran. Adicionalmente, se observa que la configuración seleccionada presenta menores valores de ENS que los tres modelos matemáticos.

Si se considera solamente el modelo 1, la energía no servida sería alta en comparación con los otros modelos, por lo cual la confiabilidad del sistema sería baja; si se considera exclusivamente el modelo 2, los costos totales serían elevados, con un gran porcentaje representado en los costos de operación; en el caso del modelo 3 se tienen los mayores costos de inversión, lo cual reduce los costos de operación y mejora la confiabilidad, aunque requiere una mayor inversión inicial. Esto demuestra que la metodología permite encontrar un punto de equilibrio entre todos los objetivos, generando una inversión moderada, con costos de operación cerca de la mitad de los costos totales y un nivel de ENS inferior al que puede establecerse solamente considerando costos de inversión y operación.

Una ventaja de manejar tendencias considerando varios modelos matemáticos es que se puede reducir el espacio de solución, con algoritmos más eficientes y estableciendo diferentes alternativas que permiten la evaluación y la búsqueda de los parámetros óptimos de acuerdo con el interés sobre cada objetivo en particular.

De los resultados obtenidos en el sistema de prueba se observa que las subestaciones son de igual tamaño en todos los modelos matemáticos (tipo 2). De acuerdo con esto, se nota que la selección de las subestaciones solamente se ve afectada por los costos de inversión, pues selecciona siempre el menor tipo (más económico), pero no se ve influenciada por los costos de operación o confiabilidad. Se puede deducir entonces que los elementos que más tienen peso a la hora de definir una tendencia son los tramos de red, ya que varían dependiendo del objetivo tratado.

CONCLUSIONES

En este artículo se propuso e implementó un algoritmo NSGA-II aplicado a la solución del problema de la expansión de sistemas de distribución de energía eléctrica usando modelos de optimización multiobjetivo. Los modelos matemáticos empleados consideran dos funciones objetivo: el primero usa costos de inversión vs. costos de operación; el segundo emplea costos de inversión vs. confiabilidad; el tercero considera costos de inversión y operación vs. confiabilidad y el cuarto modelo usa costos de operación vs. confiabilidad. Los cuatro modelos tienen en cuenta el mismo conjunto de restricciones: ecuaciones de balance nodal, capacidades máximas en subestaciones y alimentadores, regulación máxima permitida y radialidad de la red. Esta metodología fue verificada con un sistema de prueba de la literatura y se encontraron soluciones que reflejan su validez al aportar al estado del arte en esta temática, dado que las configuraciones halladas encuentran un punto de equilibrio con respecto a todos los objetivos considerados, lo que demuestra la importancia de tenerlos en cuenta.

La configuración obtenida es de buena calidad ya que cumple criterios técnicos y operativos de radialidad, cargabilidad y regulación.

En el sector eléctrico se presentan fluctuaciones en los proyectos de inversión, dado que pueden tenerse diferentes prioridades dependiendo de los rubros que se tengan asignados, de los reglamentos internos o códigos que se deban cumplir en un periodo específico, o de las sanciones que se tengan a nivel nacional por ENS o pérdidas en la red. Esta condición genera que las prioridades de las empresas del sector eléctrico puedan cambiar, lo que genera cambios en sus inversiones o planeamiento de la red. Establecer una metodología que pueda evaluar diferentes parámetros y conocer el comportamiento que se presenta ante una determinada condición, permite tomar decisiones basadas en diferentes criterios y da la flexibilidad necesaria para elegir cuál condición requiere priorizar la empresa de acuerdo con su contexto y la condición en que se encuentre.

De los resultados obtenidos se aprecia que existe una tendencia en las topologías y capacidades de las subestaciones, independiente de las funciones objetivo empleadas. Encontrar este tipo de tendencias permite disminuir el espacio de solución mediante especies de cortes generados.

La gran diferencia en la tendencia obtenida a partir de los tres modelos matemáticos, se encuentra en los calibres de los conductores. La selección de los calibres de los tramos de red puede ser realizada a partir del interés específico de cada electrificadora por los objetivos considerados, o

empleando una técnica que permita encontrar un punto de equilibrio entre estos. En este artículo se considera el mayor calibre obtenido de los tres modelos, con el fin de dar cumplimiento a todos los objetivos.

El algoritmo NSGA-II es una herramienta efectiva y poderosa para solucionar problemas multiobjetivo. Se puede observar el comportamiento adecuado del algoritmo, dado que sin importar el modelo matemático empleado, el tamaño del sistema de prueba y la generación aleatoria de la población inicial, este siempre converge a regiones de buena calidad.

La metodología propuesta es general y flexible y puede ser empleada en la solución del problema del planeamiento de sistemas de distribución realizando un planeamiento estático o por etapas y empleando dos o más objetivos, con la ventaja de obtener soluciones con buenas condiciones operativas sin importar el tamaño o la topología del sistema empleado.

FINANCIAMIENTO

Este artículo es producto del proyecto “Planeamiento integrado de redes de distribución de energía eléctrica de media y baja tensión” (Código 6-13-4), el cual ha sido financiado por la Universidad Tecnológica de Pereira.

REFERENCIAS

- Bernal-Agustín, J. (1998). *Application of Genetic Algorithms To the Optimal Design of Power Distribution Systems*. Zaragoza, España: Universidad de Zaragoza.
- Billinton, R. y Allan, R. (1996). *Reliability Evaluation of Power Systems*. Nueva York: Plenum.
- Carrano, E., Soares, L., Takahashi, R., Saldanha, R. y Neto, O. (2006). Electric Distribution Network Multiobjective Design Using a Problem-Specific Genetic Algorithm. *IEEE*, 21 (2), 995-1005.
- Deb, K. (2004). *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*. Nueva York: John Wiley y Sons.

- Deb, K., Amrit, P., Agarwal, S. y Meyarivan, T. (2000). *A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm*. Nueva Delhi: Kanpur Genetic Algorithms Laboratory, Indian Institute of Technology.
- Gallego, R., Escobar, A. y Toro, E. (2008). *Técnicas metaheurísticas de optimización*. Pereira: Textos Universitarios Universidad Tecnológica de Pereira.
- Ganguly, S., Sahoo, N. y Das, D. (2011). Multi-Objective Planning of Electrical Distribution Systems Incorporating Shunt Capacitor Banks. *International Conference on Energy, Automation, and Signals (ICEAS)* (pp. 1-6). Bhubaneswar, India.
- Ganguly, S., Sahoo, N. y Das, D. (2013). Multi-Objective Planning of Electrical Distribution Systems Using Dynamic Programming. *Electrical Power and Energy Systems*, 46, 65-78.
- Kayu, G. y Ooka, R. (2009). Application Multi-Objective Genetic Algorithm for Optimal Design Method of Distributed Energy System. *Eleventh International IBPSA Conference* (pp. 162-172). Glasgow, Escocia.
- Kong, T., Cheng, H., Hu, Z., Wang, C., Chen, C. y Gao Y. (2008). Multiobjective Planning of Open-Loop mv Distribution Networks Using ComGIS Network Analysis and MOGA. *Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies* (pp. 1340-1346). NanJing, China.
- Mantway, A., y Al-Muhaini, M. (2008). Multi-Objective BPSO Algorithm for Distribution System Expansion Planning Including Distributed Generation. *Transmission and Distribution Conference and Exposition. T&D. IEEE/PES*, (pp. 1-8). Chicago, Estados Unidos.
- Mori, H. y Yamada, Y. (2007). *An Efficient Multi-Objective Meta-Heuristic Method for Distribution Network Expansion Planning*. Ponencia presentada en la conferencia IEEE Lausanne Power Tech Conference, Lausana, Suiza, 1-5 de julio de 2007 (pp. 374-379).
- Nahman, J. y Peric, D. (2008). Optimal Planning of Radial Distribution Networks by Simulated Annealing Technique. *IEEE Transactions on Power Systems*, 23 (2), 790-795.
- Ramírez, I. y Bernal, J. (2001). Reliability and Costs Optimization for Distribution Network Expansion Using an Evolutionary Algorithm. *IEEE Transactions on Power Systems*, 16 (1), 111-118.
- Ramírez, I. y Domínguez, J. (2004). Possibilistic Model Based on Fuzzy Sets for the Multiobjective Optimal Planning of Electric Power Distribution Networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 19 (4), 1801-1810.
- Ramírez, I. y Domínguez, J. (2006). New Multiobjective Tabu Search Algorithm for Fuzzy Optimal Planning of Power Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 21 (1), 224-233.
- Sahoo, N., Ganguly, S. y Das, D. (2012). Multi-Objective Planning of Electrical Distribution Systems Incorporating Sectionalizing Switches and Tie-Lines Using Particle Swarm Optimization. *Swarm and Evolutionary Computation*, 3, 15-32.
- Shirmohammadi, D., Hong, H., Semlyen, A. y Luo, G. (1988). A Compensation-Based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 3 (2), 753-762.

Procesamiento paralelo en FPGA para convolución de imágenes usando Matlab

Parallel processing on FPGA for image convolution using Matlab

DIEGO ARMANDO GIRAL RAMÍREZ

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

RICARDO ROMERO ROMERO

Ingeniero eléctrico, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Contacto: rromeror@udistrital.edu.co

FERNANDO MARTÍNEZ SANTA

Ingeniero eléctrico, magíster en Ingeniería Electrónica y de Computadores, docente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Contacto: fmartinezs@udistrital.edu.co.

Fecha de recepción: 15 de febrero del 2014

Clasificación del artículo: investigación

Fecha de aceptación: 15 de agosto del 2014

Financiamiento: Universidad Distrital Francisco José de Caldas

DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.1.a09>

Palabras clave: arreglos de compuertas programables, convolución, grado de paralelismo, cosimulación de hardware, Xilinx System Generator.

Keywords: convolution, degree of parallelization, field programmable gate array, hardware co-simulation, Xilinx System Generator.

RESUMEN

Este artículo describe el diseño de dos arquitecturas para un filtro de convolución de imágenes, que mediante *Hardware co-simulation* del *toolbox* de Matlab Xilinx System Generator son implementadas en una FPGA Xilinx Spartan 3AN. El proyecto nace con el propósito de evaluar el rendimiento del procesamiento paralelo de imágenes con respecto al procesamiento en serie. Inicialmente se realiza el diseño y la implemen-

tación en hardware de las dos arquitecturas. Después, a partir de la medición de variables específicas, se selecciona la mejor arquitectura como alternativa de paralelización. Haciendo uso de las herramientas que brinda el *toolbox*, se evalúa la relación entre grado de paralelismo, tiempos de ejecución y recursos *hardware* utilizados. Finalmente, y entre las conclusiones más importantes, se obtiene que el tiempo de procesamiento de la imagen es reducido notablemente a medida que aumenta su grado de paralelización.

ABSTRACT

This paper shows the design of two convolution image filter architectures, which use Hardware co-simulation through Xilinx System Generator Matlab toolbox to be implemented in a Xilinx Spartan 3AN FPGA. The purpose of the project is to evaluate the performance of parallel image processing versus the serial one. Initially the design and hardware implementation of the two architec-

tures are performed, after, from the measurement of specific variables the best architecture is selected as an alternative for parallelization, using the tools provided by the toolbox evaluates the relationship between the degree of parallelism, execution times and hardware resources used, and finally among the most important conclusions are obtained that the processing time of the image is significantly reduced with increasing the degree of parallelization of the image.

* * *

INTRODUCCIÓN

El origen del procesamiento digital de imágenes, por el alto nivel de procesamiento que estas requieren, se encuentra directamente relacionado con el desarrollo y la evolución de las computadoras. La mayoría de filtros para imágenes que enfocan, desenfocan, realzan bordes y detectan bordes, entre otras, utilizan la convolución como operación matemática. El procesamiento de imágenes es un área de investigación muy extensa con un gran número de aplicaciones en múltiples campos como: las ciencias exactas, la medicina, la ingeniería (eléctrica, mecánica, automotriz, civil, etc.), la navegación aeronáutica, la navegación marítima, entre otras; sin embargo, presenta problemas en su implementación por la velocidad de procesamiento y los tiempos de desarrollo (Gonzales y Woods, 2002).

El diseño de algoritmos para múltiples aplicaciones, tradicionalmente se fundamenta en procesos seriales, que requieren la culminación de una instrucción para la ejecución de la siguiente. El procesamiento en paralelo como técnica de programación permite ejecutar de manera simultánea varias instrucciones, resolviendo a bajo costo y de manera eficiente los inconvenientes que surgen en problemas específicos con la programación en serie y los problemas de imple-

mentación y tiempos de desarrollo en el procesamiento de imágenes (Rodríguez Pérez, 2010; Garces Socarras, 2012).

Las FPGA (Field Programmable Gate Array) son dispositivos compuestos por bloques lógicos que permiten ser reprogramados a voluntad del usuario. Los lenguajes de programación para FPGA más utilizados, entre otros, son: VHDL, ABEL y Verilog. Su objetivo es acelerar el proceso del diseño; sin embargo, hoy existe *software* que permite realizar la programación de este tipo de dispositivos, sin necesidad de tener un conocimiento exhaustivo de algún lenguaje de descripción de *hardware*, como por ejemplo Matlab y LabView, que son programas de uso frecuente por sus amplias herramientas (Boemo Scalvinoni, 2005; López Vallejo, 2004; Sánchez Élez, 2014).

METODOLOGÍA

El diseño de la arquitectura y la implementación se ejecuta en cuatro etapas: en la primera se selecciona la herramienta de trabajo, en la segunda se realiza el estudio de la etapa de preprocesamiento, procesamiento y posprocesamiento basado en el análisis matemático, en la tercera se diseña la arquitectura y en la cuarta se implementa y se obtienen las respectivas métricas de evaluación.

Xilinx System Generator

Xilinx System Generator cuenta con la posibilidad de realizar cosimulaciones, esta herramienta permite utilizar la FPGA como unidad de procesamiento, con señales de entrada y salida desde Matlab (figura 1) (Xilinx, 2012; Raygoza, Ortega, Cabrerae Ibarra, 2009).

Adicionalmente a la cosimulación y entre muchas más herramientas, el *toolbox* cuenta el con el “Xilinx Mcode”, que permite incorporar códigos basados en funciones de Matlab. El bloque traduce los M-code en un equivalente de lenguajes de descripción de *hardware* (Verilog/VHDL). Cuando se realiza la implementación en la tarjeta, el bloque admite un subconjunto limitado de instrucciones de Matlab, pero son instrucciones suficientes para implementar funciones aritméticas, máquinas de estados finitos y lógica de control. El segundo bloque: “Resource Estimator” proporciona una estimación de los recursos que requiere la FPGA para implementar el diseño creado en Simulink. En la etapa de diseño y medición se profundizará en detalle sobre estos bloques (Xilinx, 2012; Moctezuma, Sánchez, Álvarez y Sánchez, 2007).

Preprocesamiento, procesamiento y posprocesamiento

La base del diseño de la arquitectura son las etapas del procesamiento digital de imágenes. El proceso se clasifica en tres etapas: adquisición, procesamiento y visualización. La figura 2 muestra el flujo de las tres etapas (Gonzales y Woods, 2002).

Con el propósito de obtener la mejor arquitectura basada en resultados comparativos se realizan dos diseños con el mismo filtro. La diferencia se encuentra en la cantidad de datos que llegan a la etapa de procesamiento. El preprocesamiento y el posprocesamiento para ambos diseños se realizan

directamente con los bloques de Simulink, mientras que el procesamiento será con la librería de Xilinx System Generator (figura 3).

Las entradas y las salidas de la arquitectura dependen directamente del procesamiento. Por este motivo, el diseño general de la arquitectura parte de la segunda etapa de la figura 2.

Procesamiento. El diseño de la etapa de procesamiento se realiza de acuerdo con el filtro de convolución que se va a implementar. Se considera $f(x,y)$ como una imagen de $m \times n$ píxeles (ecuación (1)), donde cada uno de los elementos que componen la matriz representa un pixel de la imagen (Garces Socarrás, 2012; Forero Vargas y Arias Cruz, 2001; Rodríguez Cruz, Rivero Flores y Castillo Atoche, 2006).

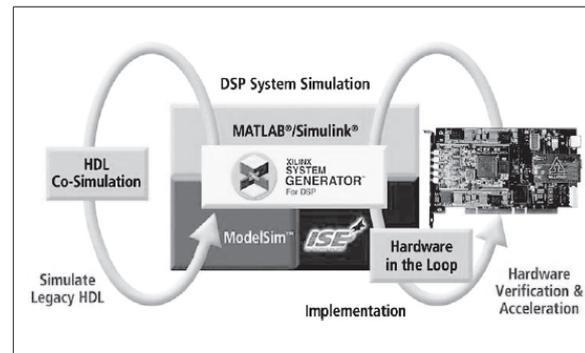


Figura 1. Flujo de diseño con System Generator

Fuente: Xilinx (2012).

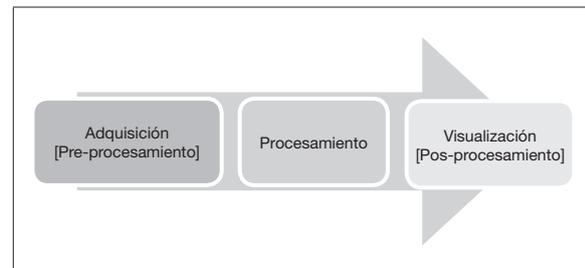


Figura 2. Proceso para el tratamiento de imágenes

Fuente: elaboración propia.

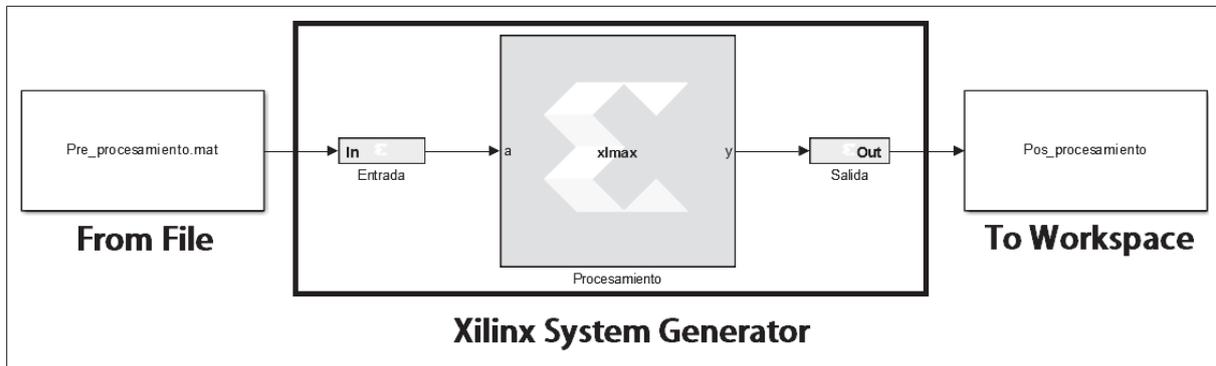


Figura 3. Tratamiento de imágenes utilizando Simulink

Fuente: elaboración propia.

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} A(0,0) & A(0,1) & \dots & A(0,n-1) \\ A(1,0) & A(1,1) & \dots & A(1,n-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A(m-1,0) & A(m-1,1) & \dots & A(m-1,n-1) \end{bmatrix} \quad (1)$$

La matriz de convolución o matriz kernel $K(x,y)$ puede tomar cualquier tamaño dependiendo del filtro que se desee aplicar. Para el desarrollo de este trabajo se utiliza un kernel de 3 x 3 (ecuación (2)).

$$K(x, y) = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

A fin de aplicar convolución a los bordes de la imagen, es necesario proporcionarle un marco que no altere la imagen. La ecuación (3) muestra el marco de ceros adicional que se agrega a la matriz $f(x,y)$, modificando el tamaño de $f(x,y)$ a $(m+2) \times (n+2)$ pixeles.

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A(0,0) & A(0,1) & \dots & A(0,n-1) & 0 \\ 0 & A(1,0) & A(1,1) & \dots & A(1,n-1) & 0 \\ 0 & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & 0 \\ 0 & A(m-1,0) & A(m-1,1) & \dots & A(m-1,n-1) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

La convolución se define matemáticamente para modelos bidimensionales a partir de la ecuación (4), donde $g(x,y)$ representa el resultado de convolución entre la imagen $f(x,y)$ de $(m+2) \times (n+2)$ pixeles y un kernel de tamaño $h \times h$ (Forero Vargas y Arias Cruz, 2001; Rodríguez Escudero, 2013).

$$g(x, y) = f(x, y) \cdot K(x, y)$$

$$g(x, y) = \int \int_{-\infty}^{\infty} f(i, j) \cdot K(x-i, y-j)$$

$$g(x, y) = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} f(i, j) \cdot K(x-i, y-j) \quad (4)$$

Para el caso particular cuando $h = 3$ (ecuación (2)), la ecuación (4) se transforma en la expresión descrita en la ecuación (5) (Rodríguez Escudero, 2013).

$$g(x, y) = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 f(i, j) \cdot K(x-i, y-j) \quad (5)$$

La ecuación (5) se traduce en la sumatoria de la multiplicación de todos los pixeles de la imagen con el correspondiente valor del coeficiente de kernel. Finalmente, se obtiene una imagen procesada en todos los puntos de la imagen original menos en el marco de ceros adicional (Garces

Socarras, 2012; Rodríguez Cruz, Rivero Flores y Castillo Atoche, 2006).

El procesamiento de imágenes con convolución trabaja a partir del radio de los pixeles circundantes al pixel (x,y) , el radio se determina a partir de la ecuación (6) (Garces Socarrás, 2012; Rodríguez Cruz, Rivero Floresy Castillo Atoche, 2006).

$$radio = \left(\frac{h-1}{2} \right) \quad (6)$$

Remplazando en la ecuación (6) el valor de $h=3$, se obtiene que el $radio=1$ para la arquitectura que se va a implementar.

En la figura 4 se presenta de forma gráfica el resultado de convolución $g(x,y)$ entre la imagen $f(x,y)$ de $(m+2) \times (n+2)$ pixeles y un kernel de tamaño 3×3 con $radio=1$.

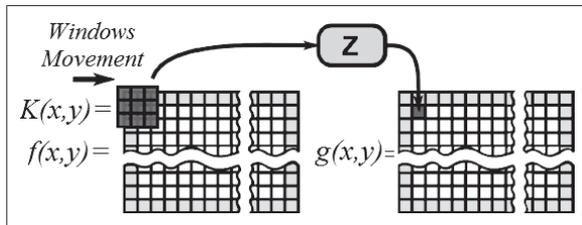


Figura 4. Resultado grafico de convolución $g(x,y)$

Fuente: Garces Socarrás (2012)

A partir de la figura 4 es claro que para un kernel de 3×3 el bloque de convolución debe procesar 9 datos al mismo tiempo, este criterio es la base del diseño de la etapa de preprocesamiento.

Preprocesamiento. Como se muestra en la figura 3, el preprocesamiento se realiza llamando un archivo *.mat creado desde el workspace de Matlab. La conexión entre el preprocesamiento y el procesamiento se realiza a partir del “Xilinx Gateway In”. Este bloque realiza la conversión del dato de Simulink a datos de tipo booleano, punto

fijo o coma flotante, sin signo o con complemento A2; es la puerta de enlace entre los bloques de Simulink y los bloques de Xilinx System Generator. Cuando se realiza la implementación en *hardware* de la arquitectura, cada “Xilinx Gateway In” define las entradas en el lenguaje de descripción de *hardware*, y por lo tanto en la FPGA (Garces Socarrás, 2012; Xilinx, 2012).

Sin embargo, el “Xilinx Gateway In” recibe únicamente datos de tipo *integer*, *single* o *double*; no recibe arreglo de datos (Garces Socarras, 2012; Xilinx, 2012), por lo tanto, no es posible que los nueve datos de la figura 4 se entreguen al bloque de procesamiento en forma matricial; sin embargo, se pueden usar múltiples entradas que permitan construir el arreglo de datos en forma de un vector columna de nueve elementos, donde cada dato representa el pixel circundante al pixel (x,y) de $f(x,y)$.

La etapa de preprocesamiento consiste en diseñar el algoritmo que permita entregarle en forma de vector y de manera lógica los datos al bloque de procesamiento.

La figura 5 presenta las cuatro partes que intervienen en el algoritmo de preprocesamiento:

- *Adquisición de la imagen:* se lee la imagen a color desde una ruta específica y se convierte a escala de grises para que el procesamiento se realice sobre una única matriz.
- *Asignación de marco:* se enmarca con ceros la matriz de la imagen.
- *Construcción del vector:* se convierte la matriz en un vector. Este tiene una construcción específica la cual hará que tenga datos repetidos; es la primera diferencia entre arquitecturas.
- *Conexión:* se realiza la conexión entre el preprocesamiento y el procesamiento.

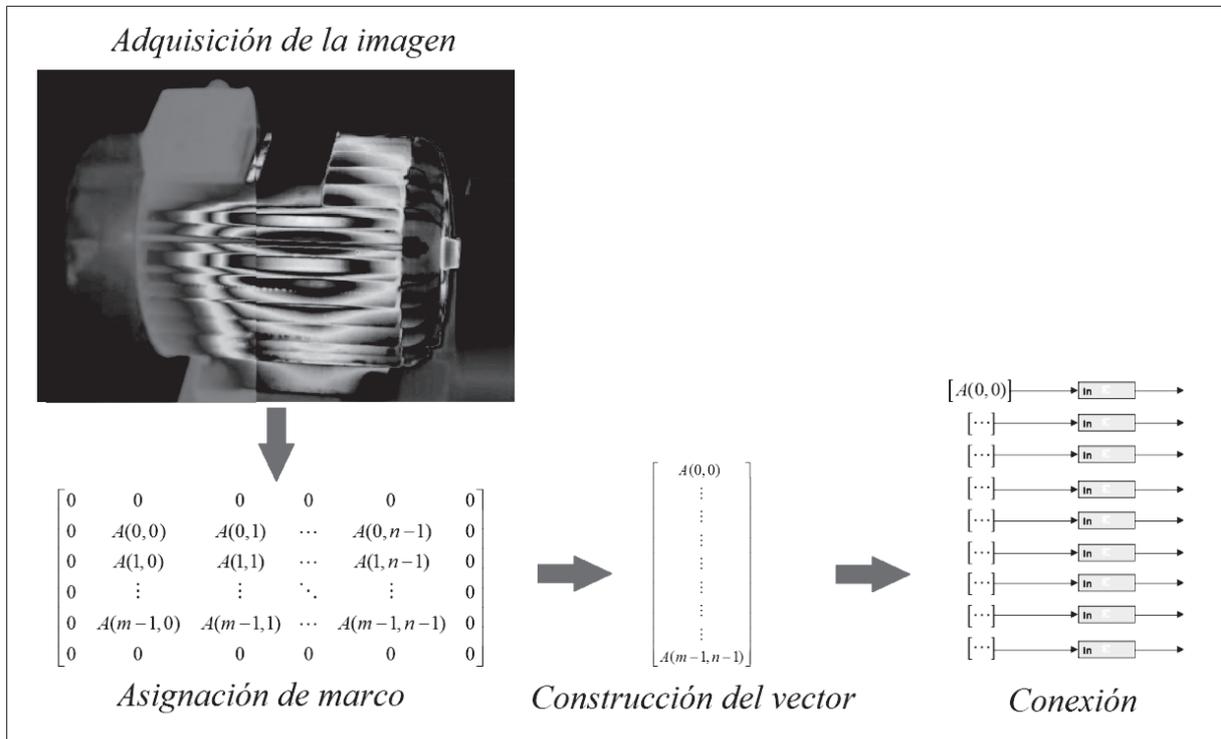


Figura 5. Construcción del vector de procesamiento

Fuente: elaboración propia.

El preprocesamiento tiene una etapa adicional a las que se muestran en la figura 5, se encuentra ubicada entre la segunda y la tercera parte y consiste en dividir la matriz principal en pequeñas submatrices (figura 6). El objetivo es paralelizar la arquitectura tantas veces como sea posible en la verificación de *hardware*. El número de veces que se pueda dividir en pequeñas submatrices se define como grado de paralelismo y es uno de los datos que se espera determinar a partir de las simulaciones.

Posprocesamiento. El posprocesamiento es la etapa encargada de construir la matriz de datos $g(x,y)$. A diferencia del preprocesamiento trabaja con un único dato de entrada y es el resultado de la convolución entre los nueve datos de la matriz $f(x,y)$ y la matriz kernel de 3×3 . El algoritmo de

posprocesamiento tiene la misma estructura para las dos arquitecturas.

Como se muestra en la figura 3, el posprocesamiento se realiza llevando los datos de salida del Xilinx System Generator al *workspace* de Matlab. Al igual que en el preprocesamiento, la conexión entre el procesamiento y el posprocesamiento se realiza a partir del “Xilinx Gateway Out”, este bloque realiza la conversión del dato de Xilinx System Generator a datos de tipo *integer*, *single* o *doble* de Simulink (Garces Socarras, 2012; Xilinx, 2012).

Cuando se realiza la división de la matriz $f(x,y)$ en submatrices (figura 7), el algoritmo de posprocesamiento debe además unificar los resultados de cada subprocesamiento para reconstruir nuevamente la imagen en una sola matriz.

Primera arquitectura (memoria para nueve datos). La figura 7 muestra el diagrama de blo-

ques en Simulink de las tres etapas de la arquitectura.

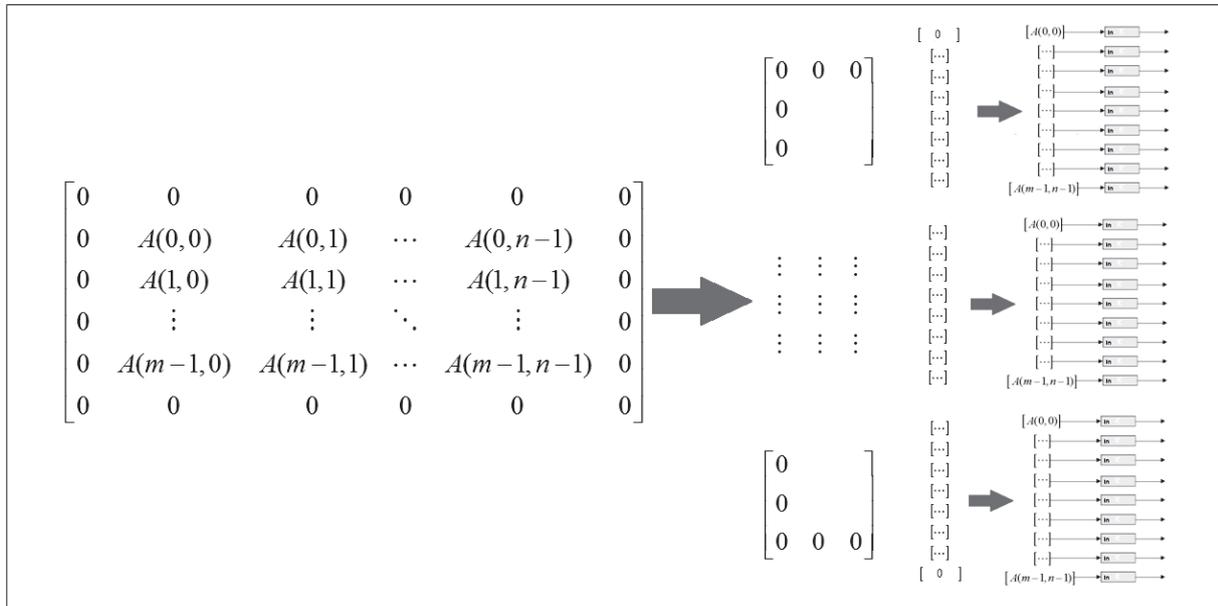


Figura 6. Paralelización del preprocesamiento

Fuente: elaboración propia.

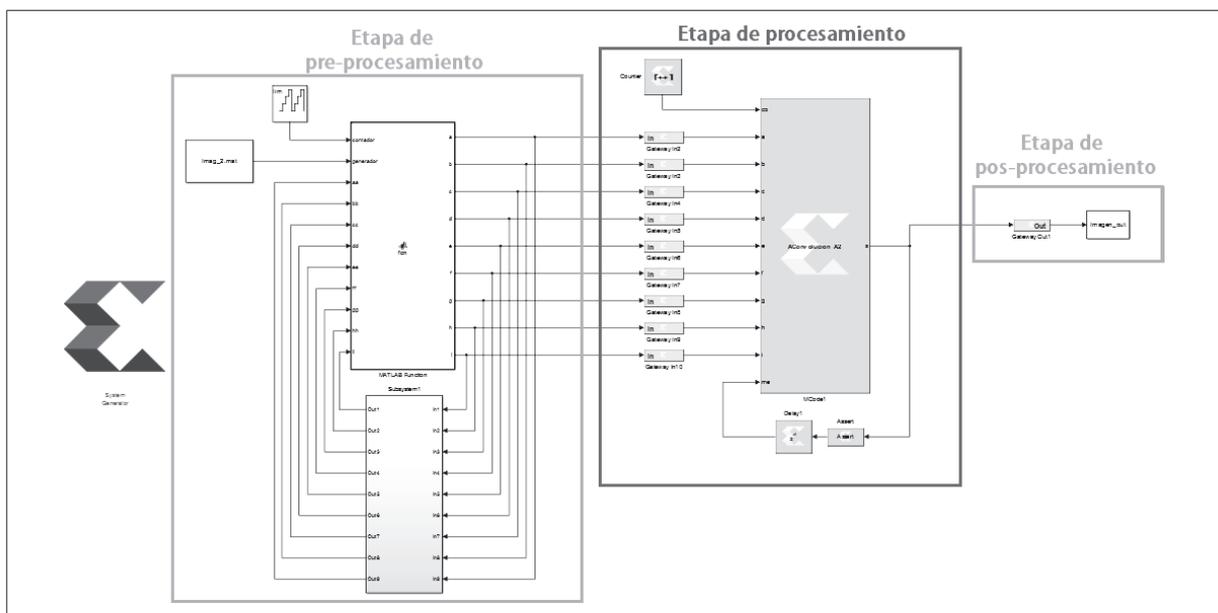


Figura 7. Diagrama de bloques en Simulink de la primera arquitectura

Fuente: elaboración propia.

Preprocesamiento. Como se observa en la figura 7, el preprocesamiento le entrega a la nueva etapa de procesamiento datos de entrada, el principio de funcionamiento consiste en posicionar cada elemento del vector a partir de un contador ascendente entre 0 y 8.

El objetivo es que el bloque de procesamiento realice la operación de convolución únicamente cuando los nueve datos estén posicionados, para mantener los datos hasta que se cumpla esta condición el bloque de preprocesamiento retroalimenta sus salidas. El vector se construye a partir del radio de los pixeles circundantes al pixel (x,y), como se muestra en la figura 8.

Para determinar el tamaño del vector se utiliza la ecuación (7), la cantidad de datos que envía esta arquitectura es j veces mayor que la imagen original.

$$Datos = (m \cdot n) \cdot j$$

$$j = h \cdot h \quad (7)$$

Donde

m : cantidad de filas de la imagen

n : cantidad de columna de la imagen

h : filas o columnas de la matriz kernel.

Procesamiento

La etapa de preprocesamiento se implementa mediante el bloque Mcode del *toolbox* de Xilinx System Generator, cuenta con once entradas, una para el contador que permite posicionar cada dato, nueve para los datos que se van a procesar y la última para mantener el dato retroalimentado la salida.

Segunda arquitectura (memoria con corrimiento). La construcción de la segunda arquitectura, además de comparar resultados, se diseña con el objetivo de reducir la cantidad de datos que se van a procesar. La figura 9 muestra el diagrama de bloques en Simulink de las tres etapas de la arquitectura.

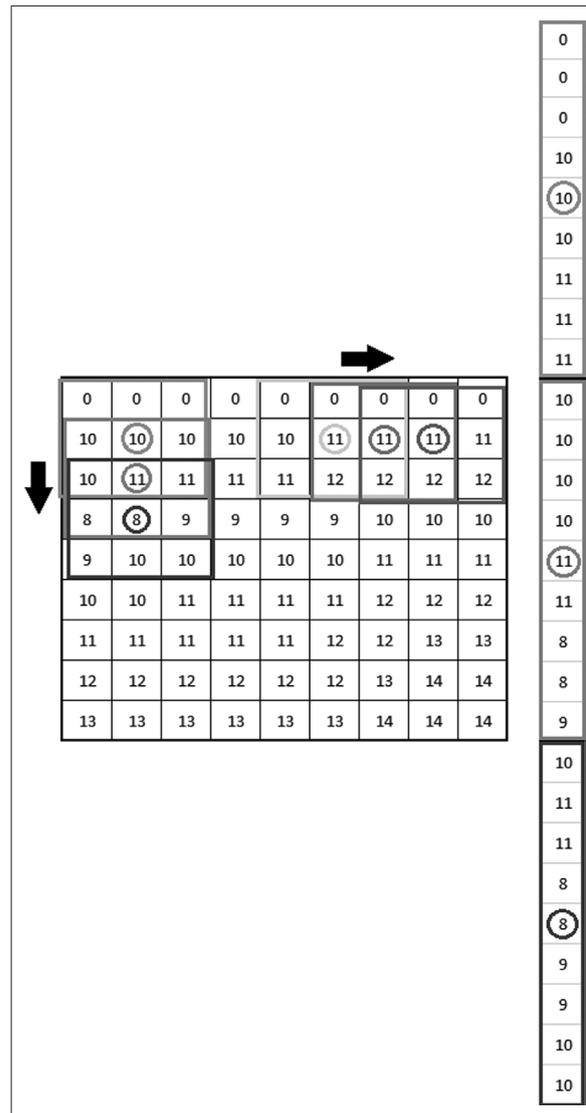


Figura 8. Construcción del vector

Fuente: elaboración propia.

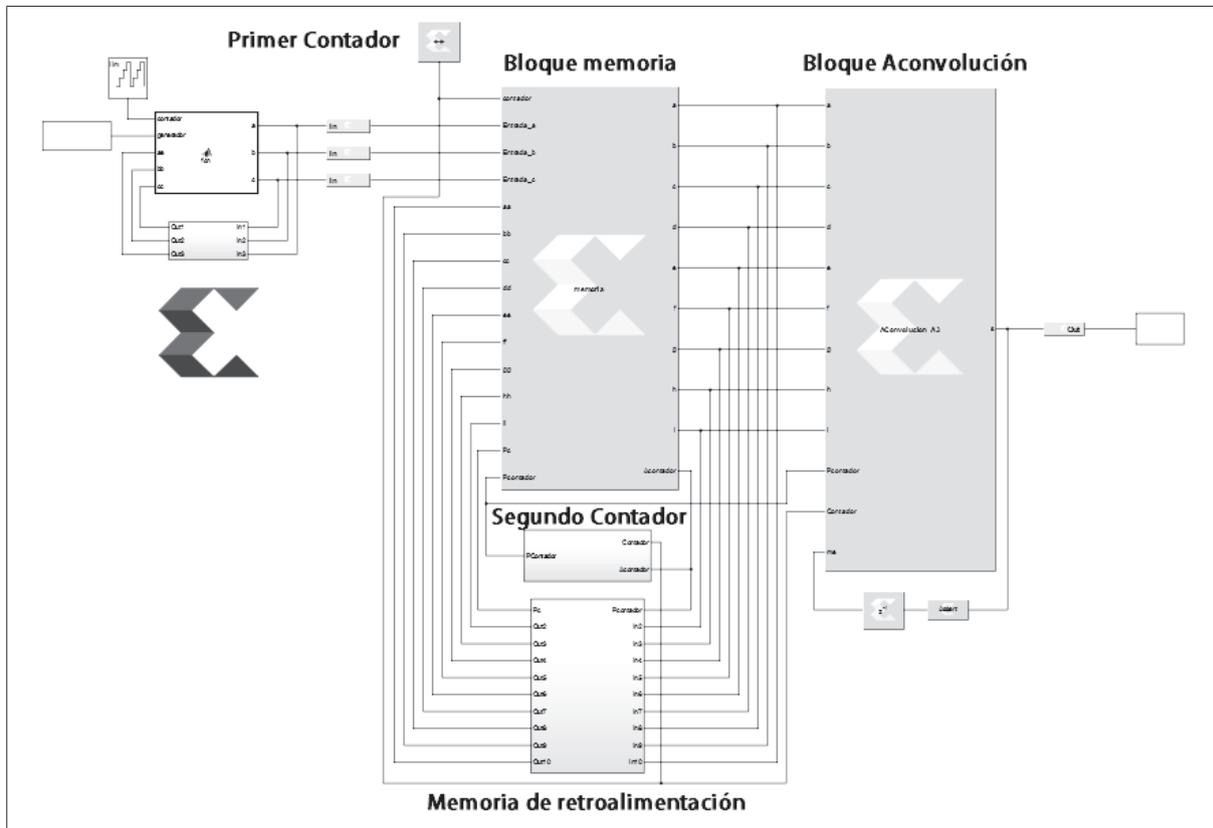


Figura 9. Diagrama de bloques en Simulink de la segunda arquitectura

Fuente: elaboración propia.

Preprocesamiento. A diferencia del primer diseño, la etapa de preprocesamiento se encarga únicamente de posicionar tres datos con el contador ascendente. La construcción del vector de nueve datos se diseña para que sea realizada en la etapa de procesamiento (figura 9). Para esta arquitectura se incorporan tres bloques adicionales.

Procesamiento. Para la construcción del vector de nueve datos, la arquitectura realiza un corrimiento de posición de los tres datos entregados por la etapa de preprocesamiento, este corrimiento se realiza hasta que se acumulen la totalidad de los datos necesarios para hacer la convolución. En la figura 10 se presenta un ejemplo de la manera en que se realiza el corrimiento.

Para determinar el tamaño del vector que equivale a la cantidad de datos que se van a enviar a la etapa de procesamiento, se utiliza la ecuación (8).

$$Datos = hm \times (n + 2) \quad (8)$$

Donde

- m : cantidad de filas de la imagen
- n : cantidad de columnas de la imagen
- h : filas o columnas de la matriz kernel.

En la demostración descrita en la ecuación (9) se determina que la segunda arquitectura reduce la cantidad de datos que se van a procesar, para cualquier valor de m y n el resultado de la ecuación (8) siempre es menor que el resultado de la ecuación (7).

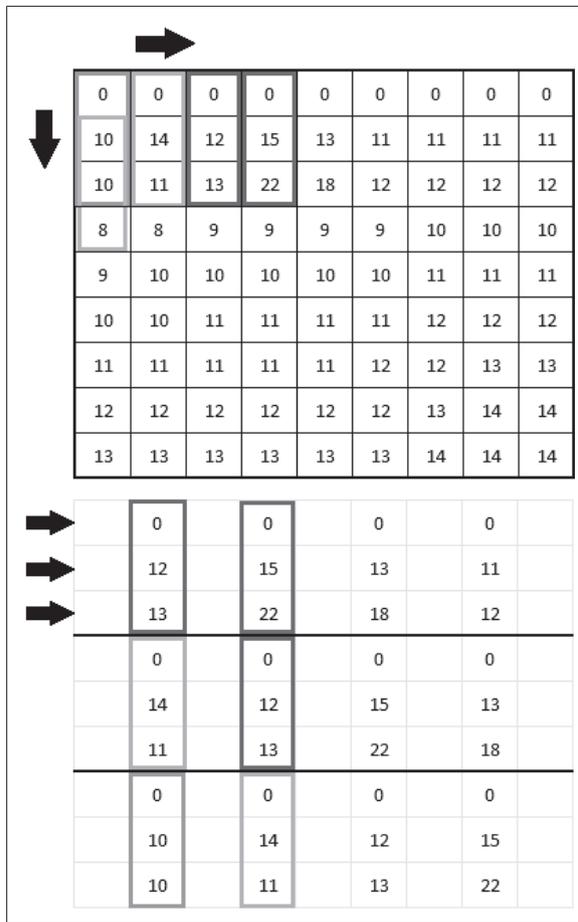


Figura 10. Construcción del vector por corrimiento de datos

Fuente: elaboración propia.

Sea $y = h^2mn$
 $x = hm(n + 2)$
 $j = hh$

Probar que $x < y$

Si $y = ax$, si $a > 1$, significa que $x < y$

Entonces:

$$y = ax \therefore h^2mn = a(hm(n + 2)) \forall h, m, n, \neq 0$$

$$h^2mn = a(hm(n + 2))$$

$$a = h\left(\frac{n}{n+2}\right)$$

Como $n \in \mathbb{N}$, entonces

$$\lim_{n \rightarrow \infty} h\left(\frac{n}{n+2}\right)$$

$$h\left(\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{n+2}\right) = h(1) = h$$

Luego $a = h$ cuando $n \rightarrow \infty$

Se concluye que $a > 1$ si $h > 1$ (9)

El bloque de memoria (figura 9) encargado de realizar el corrimiento dispone de tres sistemas adicionales: un bloque de memorias para la retroalimentación (se implementa para mantener los datos) y dos contadores, el primero es un contador libre ascendente que inicia en cero y se utiliza para posicionar los primeros nueve datos, en tanto que el segundo contador (figura 12) tiene dos características específicas.

- Debe iniciar el conteo después de que se posicionan los primeros nueve datos.
- Después de ser activado debe contar de cero a tres una sola vez, luego debe contar de uno a tres.

Para poder cumplir con las características específicas se implementa un multiplexor (figura 11) con dos entradas ($d0, d1$), la señal de control (sel) se programa mediante un bloque “Xilinx Mcode” y las entradas son dos contadores adicionales (*Counter 1, Counter 2*), uno que cuenta de cero a tres y el otro que lo hace de uno a tres.

En la figura 12 se muestra la señal obtenida del diagrama de bloques de la figura 11.

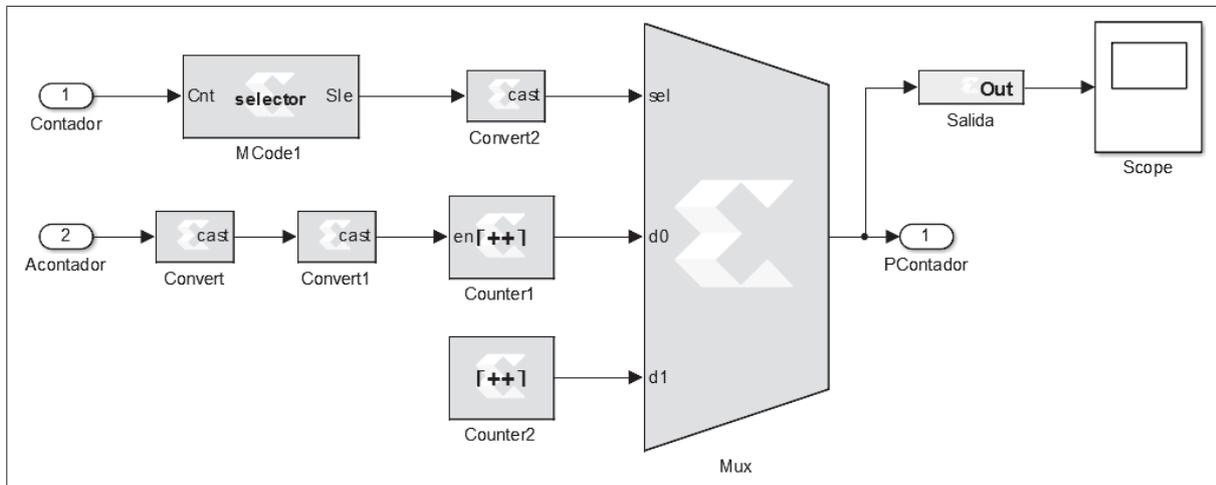


Figura 11. Multiplexor por el diseño del contador con características específicas

Fuente: elaboración propia.

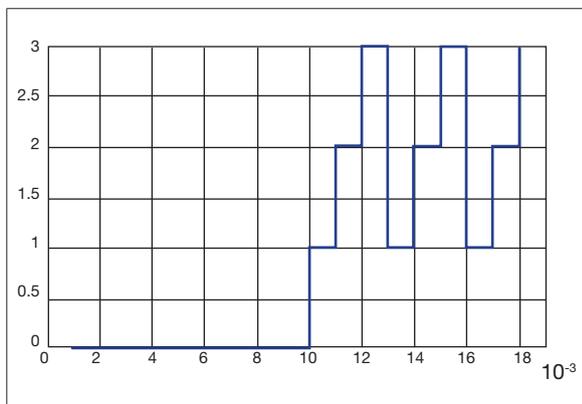


Figura 12. Forma de onda del contador con características específicas

Fuente: elaboración propia.

Implementación

La implementación de las arquitecturas se realiza en dos partes, la primera consiste en realizar la comprobación mediante la simulación (directamente sobre *software*), y en la segunda se compila el algoritmo para que genere el bloque de cosimulación y poder correr la arquitectura en la FPGA.

En ambos casos los ajustes se deben realizar sobre el “System Generator Token”, que es el panel de control principal del *toolbox* que se utiliza para configurar los parámetros del sistema y de la tarjeta. Todos los modelos de Simulink que contengan blockset de Xilinx deben contener este panel de control para poder simular (Xilinx, 2012).

Simulación por *software*. Realizados los ajustes del “System Generator Token” se realiza la simulación de las arquitecturas, como cualquier otro modelo realizado en Simulink. Con esta simulación se identifican y solucionan errores y, además, se puede verificar que la arquitectura cumpla con los objetivos esperados.

Implementación en FPGA. La tarjeta sobre la cual se implementa la arquitectura es una Xilinx Spartan 3AN - XC3S700AN. Para utilizar la FPGA como unidad de procesamiento, se debe crear el bloque de cosimulación. Cuando se genere la compilación para “Hardware Co-Simulation” con la configuración de la referencia de la tarjeta que se va a utilizar, Matlab genera el archivo de configuración bitstream, el cual es asociado a un nuevo bloque. En la figura 13 se muestra la

segunda arquitectura con el bloque de cosimulación. Como se puede observar, toda la etapa de procesamiento de la figura 9 es remplazada por el bloque de cosimulación (Xilinx, 2012).

Cuando el modelo de la figura 13 se simula en Simulink, los resultados son calculados en *hardware* y son regresados a la computadora por medio de la conexión JTAG. Esto permite probar el diseño a nivel *hardware*, pero corriendo la simulación desde Simulink.

Para la simulación de las arquitecturas con los bloques de cosimulación, es necesario que Matlab responda rápidamente. Además, debe trabajar por encima de los servicios de primer y segundo plano que ejecute el sistema operativo en el momento de la simulación, y esto se logra dándole prioridad de tiempo real en el administrador de tareas de Windows.

Timing and power analysis. Adicionalmente a la compilación “Hardware Co-Simulation”, el “System Generator Token” cuenta con un análisis de tiempo y potencia llamado “Timing and Power Analysis”, que permite a los diseñadores analizar los requerimientos de potencia-energía y las frecuencias de reloj máximas. Esta herramienta se

utiliza para determinar los tiempos según las frecuencias de reloj máximo y poder concluir según los resultados obtenidos (Xilinx, 2012).

Recursos de hardware. A fin de estimar los recursos que requiere la FPGA para implementar el diseño de la arquitectura creado en Simulink, se utiliza el bloque “Xilinx Resource Estimator”. La estimación de estos recursos se realiza para siete campos: slices (generalmente compuestos por dos *flipflops*, dos *LUTs*, algunos multiplexores y una pequeña lógica de control), *lookuptables* (*LUTs*), *flip-flops* (FFs), bloques de memoria (BRAM), multiplicadores 18x18, buffers tri-estado y puertos de entrada/salida (IOBs) (Xilinx, 2012; Motezuma Eugenio y Torres Huitzil, 2006).

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Terminada la etapa de diseño de las arquitecturas se realizan las respectivas pruebas de funcionamiento. Estas consisten en:

1. Generación de la imagen aplicando un filtro específico de convolución a partir de la simulación de las arquitecturas diseñadas.

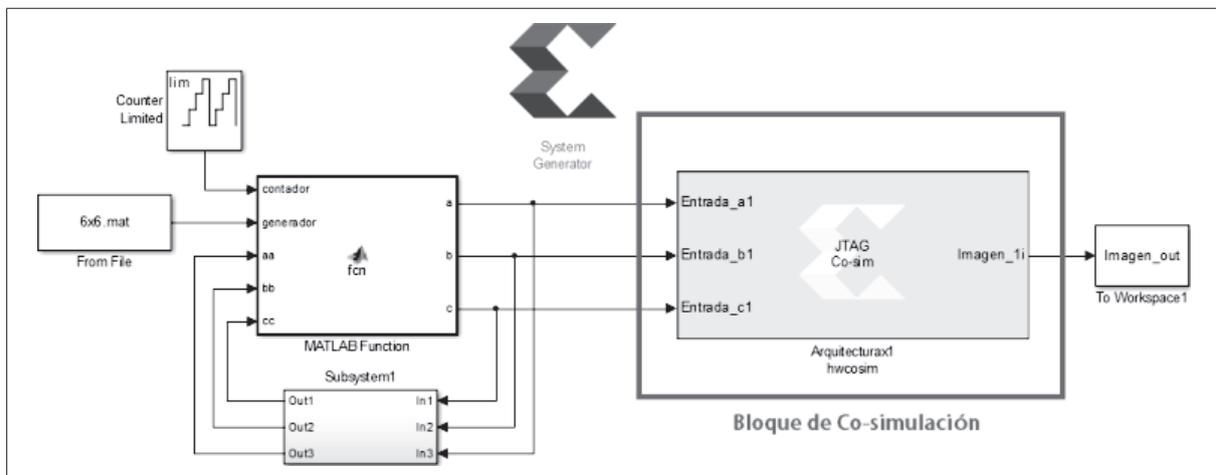


Figura 13. Compilación por “Hardware Co-Simulation”

Fuente: elaboración propia.

2. Estimación de los tiempos de comunicación entre la FPGA y el *software* de desarrollo.
3. Comparación de los tiempos promedios del procesamiento en paralelo de la imagen en la FPGA corriendo la simulación desde Simulink para las dos arquitecturas diseñadas.
4. Establecer el grado de paralelismo de la arquitectura seleccionada. Se realiza la comparación del rendimiento del procesamiento paralelo vs. el procesamiento en serie.
5. Analizar la relación entre el grado de paralelismo y la cantidad de recursos *hardware* utilizados en la implementación de la arquitectura.

Debido a que la implementación de las arquitecturas depende de la relación *software* (Matlab) *hardware* (FPGA), es importante mencionar que las respectivas pruebas de funcionamiento y mediciones se realizaron sobre un computador Intel(R) Core (TM) i5-2450M CPU 2,50 GHz (4 CPU), con memoria ram de 6 GB.

Generación de la imagen aplicando un filtro de convolución

Para verificar el funcionamiento de las arquitecturas diseñadas como alternativa de paralelización, se realiza una comparación de las imágenes resul-

tantes entre las dos arquitecturas y un *script*. La figura 14 muestra una imagen termográfica de un motor eléctrico en funcionamiento, esta es la imagen que se va a procesar en las dos arquitecturas y con la cual se realizará el análisis comparativo. Se utiliza el filtro de convolución de realce y la imagen se convierte a escala de grises con el objetivo de procesar una única matriz.

Los resultados de la imagen procesada por la primera y por la segunda arquitectura se muestran en la figura 15 (a) y (b), respectivamente.

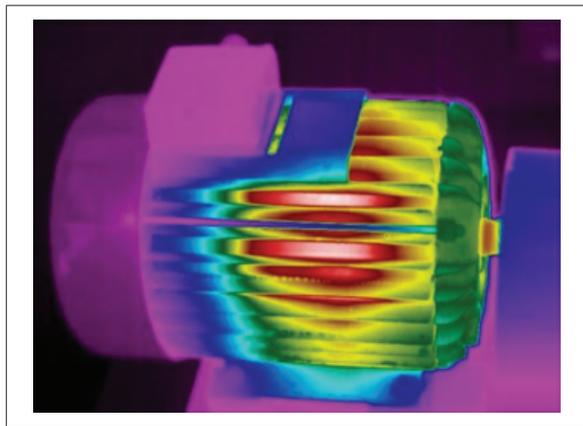


Figura 14. Imagen RGB original sin filtro de convolución

Fuente: Services (2013).

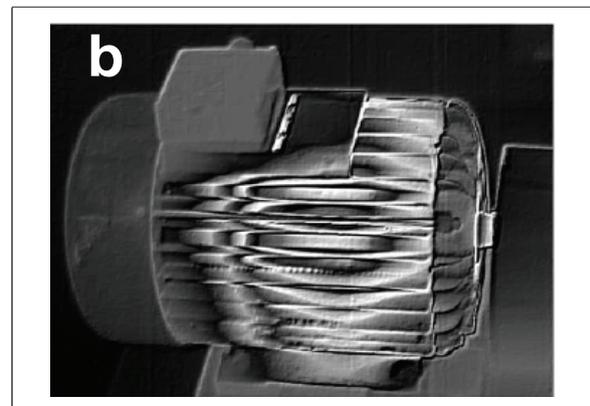
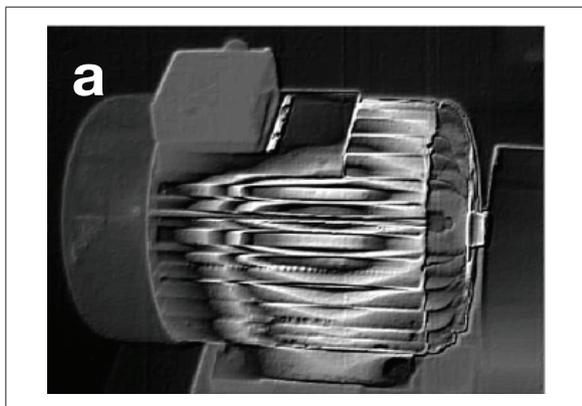


Figura 15. Imagen en escala de grises procesada con filtro de realce

Fuente: elaboración propia.

La comparación se realiza a partir de la matriz de datos de cada una de las imágenes, utilizando la instrucción *isequal (A,B)* de Matlab (Math Works, 2013). Si el resultado es cero las matrices A y B son diferentes, pero sí es uno las dos matrices son iguales. El resultado de la comparación entre las figuras 15 (a) y 15 (b) fue de uno, lo cual indica que las dos arquitecturas están funcionando y son capaces de aplicar filtros de convolución. Es importante resaltar que las dos arquitecturas están en la capacidad de aplicar cualquier filtro de convolución siempre que el kernel sea de 3x3. Para realizar la comparación entre arquitecturas y el *script* se selecciona la matriz de la figura 15 (b), el resultado obtenido también fue de uno.

Medición de los tiempos de comunicación

Para realizar una medición estimada de los tiempos de comunicación, se implementa una meto-

dología que incluye un diseño adicional, el cual permite enviar diferentes cantidades de datos sin ningún tipo de procesamiento (figura 16).

El modelo de la figura 16 envía un tren de 2^n datos, donde n es un número natural. La medición de los tiempos se realiza utilizando las instrucciones *tic toc* de Matlab, a partir de los datos medidos se construyen las figuras 17 y 18.

En la figura 17 se observa una mayor pendiente para valores menores a 50, debido a que hay una mayor concentración de puntos, además se observa una variación no considerable en el tiempo que varía entre 1 y 1,6 [s]. Para datos mayores a 50 se presenta un comportamiento lineal en aumento, con una variación pequeña en el tiempo pero mayor al rango anterior. En la figura 18 se muestra que para una mayor cantidad de datos, el tiempo de comunicación aumenta. La ecuación (10) describe el comportamiento de esta figura.

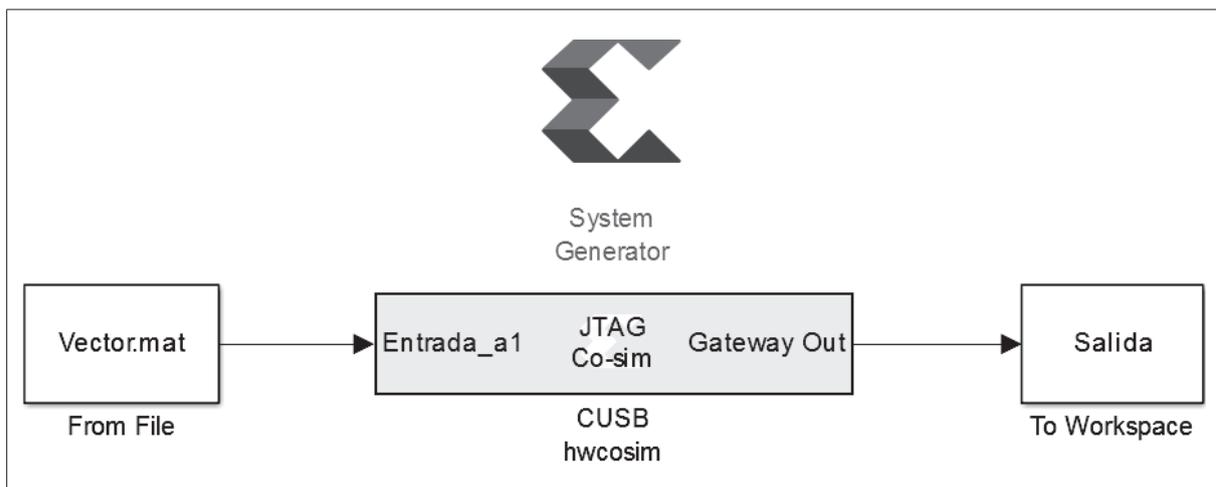


Figura 16. Modelo en Simulink para medición estimada de tiempos de comunicación

Fuente: elaboración propia.

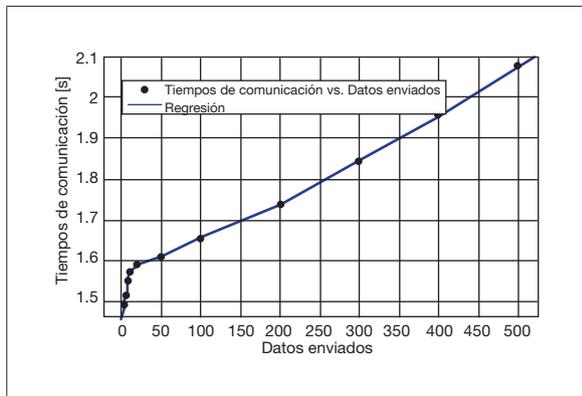


Figura 17. Tiempo de comunicación para datos menores a 1000

Fuente: elaboración propia.

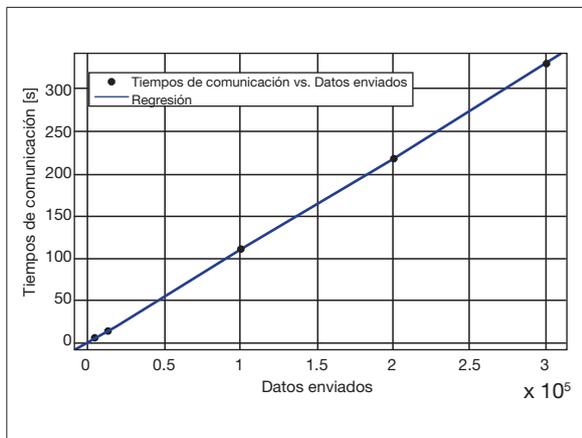


Figura 18. Tiempo de comunicación para datos mayores a 1000

Fuente: elaboración propia.

$$f(x) = 0,0011x + 1,5304$$

$$R^2 = 0,9997 \quad (10)$$

La ecuación (10) permitirá estimar el tiempo de comunicación y establecer un parámetro de medición de los tiempos de implementación de las arquitecturas.

Comparación de los tiempos promedios del procesamiento

En la tabla 1 se muestra la comparación de los tiempos promedios del grado de paralelismo de la imagen en la FPGA, utilizando las dos arquitecturas y para dos tamaños de imágenes diferentes: una de 300 x 300 y otra de 480 x 640 píxeles. En la arquitectura 2 se obtiene una mayor eficiencia, en razón de la considerable disminución del tiempo de procesamiento de la imagen, casi a la tercera parte del tiempo utilizado por la arquitectura 1. Este resultado era de esperarse, debido a la demostración realizada en la ecuación (9).

Tabla 1. Tiempos de procesamiento en segundos

Grado	Arquitectura 1		Arquitectura 2	
	300 x 300	480 x 640	300 x 300	480 x 640
1	915,51	3059,45	301,77	1024,54
2	480,49	1584,80	152,29	543,11
4	253,06	814,78	80,03	288,67
8	141,15	348,65	43,40	155,21

Fuente: elaboración propia

A partir de los resultados de la tabla 1, la arquitectura 2 fue escogida para continuar con la investigación. Se aumentó el grado de paralelización utilizando la imagen de tamaño 480 x 640 píxeles, puesto que es un tamaño estándar.

Grado de paralelismo y comparación del rendimiento del procesamiento

Grado de paralelismo. En la figura 19 se presentan los resultados del tiempo del procesamiento para diferentes valores de paralelización, se observa un comportamiento exponencial decreciente el cual evidencia que existe una reducción en el tiempo de procesamiento a medida que aumenta el grado de paralelización de la imagen. Cabe anotar que solo fue posible llegar hasta el grado de paralelización 32, debido a que Matlab no per-

mitió generar la compilación del bloque de simulación para un valor mayor.

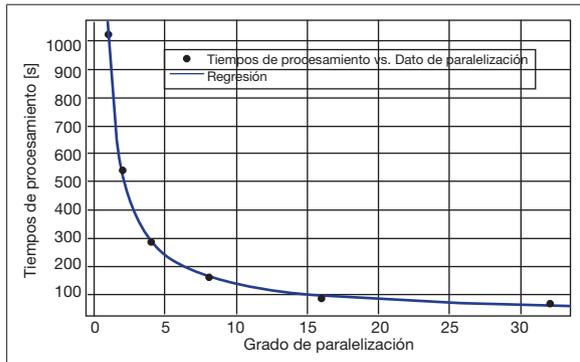


Figura 19. Tiempo de procesamiento para diferentes valores de paralelización

Fuente: elaboración propia.

La ecuación (11) describe la curva de la figura 22 con una correlación de 0,9996.

$$f(x) = 996,9x^{-0,9724}$$

$$R^2 = 0,9996 \quad (11)$$

Procesamiento serie y paralelo. La comparación entre el procesamiento en serie y en paralelo se realiza por dos métodos diferentes.

Primer método. La medición del tiempo total se realiza haciendo uso de la instrucción de Matlab *tic toc*, desde que se entregan los datos a la etapa de procesamiento hasta la construcción del vector de salida, teniendo en cuenta la comunicación con la FPGA.

De los resultados obtenidos se construyen las tablas 2 y 3, las cuales contienen el tiempo total promedio medido. En las dos tablas la columna “Comunicación” contiene el tiempo estimado de comunicación que se demoran los datos en pasar del *software* al *hardware*. Estos datos se obtienen aplicando las ecuaciones (8) y (10); la columna

“Procesamiento” se obtiene al restarle al “Total promedio” la columna de “Comunicación”.

En los valores mostrados en las tablas 2 y 3 se observa que el tiempo de procesamiento fue menor en el serial si se compara con los diferentes grados de paralelización, aunque el tiempo total del proceso fue mayor en el serial que en los de paralelización.

Tabla 2. Tiempos de procesamiento serial

Tiempos [S]		
Total promedio	Comunicación	Procesamiento
1024,54	1018,46	6,08

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Tiempos de procesamiento en paralelo

Grado de paralelización	Tiempos [S]		
	Total promedio	Comunicación	Procesamiento
2	543,11	509,99	33,11
4	288,67	256,55	32,12
8	155,21	129,84	25,37
16	87,78	66,48	21,31
32	74,97	34,80	40,18

Fuente: elaboración propia.

Segundo método. Se utiliza la herramienta “Timing and Power Analysis”, la cual permite obtener para un ciclo de reloj, el tiempo que tarda un dato en recorrer la etapa de procesamiento de la arquitectura cuando el diseño es implementado en la FPGA.

Si se implementaran las etapas de preprocesamiento, procesamiento y posprocesamiento directamente sobre la FPGA, se requeriría más de un ciclo de reloj para procesar un solo pixel. Se estima que si se utilizara la memoria RAM de la tarjeta para almacenar la imagen en forma de vector, se requeriría un ciclo de reloj para ubicar el pixel al-

macenado, un segundo ciclo para leer el pixel, un tercero para ubicar la posición de memoria donde se va guardar el pixel procesado, y un cuarto ciclo para la escritura sobre la memoria que almacena la imagen final. Debido a que la convolución es combinatorial y no secuencial, no se necesita un ciclo de reloj para el procesamiento del pixel, por lo tanto, se estima un total de cuatro ciclos de reloj para procesar un solo dato.

Los tiempos obtenidos para un solo ciclo son los que se muestran en la columna “Obtenido” de las tablas 4 y 5, este valor al ser multiplicado por el número de datos calculados utilizando la ecuación (8) y los cuatro ciclos estimados, permite determinar el tiempo total de procesamiento (columna de las tablas 4 y 5 llamada “Total”).

En las tablas 4 y 5 se observa que el tiempo obtenido en el procesamiento serial es menor que los tiempos en el procesamiento paralelo; sin embargo, los tiempos totales son menores para el procesamiento en paralelo. Es importante aclarar que dicha herramienta no permitió obtener los tiempos de los grados de paralelismo 16 y 32.

Tabla 4. Tiempo de procesamiento serial utilizando “Timing and Power Analysis”

Grado	Datos	Ciclos estimados	Tiempos [S]	
			Obtenido	Total
1	924 489	4	$2,07 \times 10^{-11}$	$7,67 \times 10^{-5}$

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Tiempo de procesamiento en paralelo utilizando “Timing and Power Analysis”

Grado	Datos	Ciclos estimados	Tiempos [S]	
			Obtenido	Total
2	462 240	4	$2,11 \times 10^{-11}$	$3,91 \times 10^{-5}$
4	231 840		$2,19 \times 10^{-11}$	$2,03 \times 10^{-5}$
8	116 640		$2,33 \times 10^{-11}$	$1,09 \times 10^{-5}$

Fuente: elaboración propia.

Procesamiento software y hardware. Adicionalmente a la comparación efectuada con los dos métodos para el procesamiento serie y paralelo, se mide el tiempo de un código M que realiza la convolución de imágenes utilizando la instrucción conv2 (Math Works, 2013). El resultado obtenido se compara con los tiempos calculados a partir del “Timing and Power Analysis”.

El tiempo promedio medido mediante la instrucción *tic toc* para el código M creado fue de $t = 197,8 \times 10^{-5}$ [s]. Comparando el tiempo t con los datos de la columna “Total” de la tablas 4 y 5, se puede determinar que los tiempos obtenidos mediante el análisis del “Timing and Power Analysis” son menores que el tiempo promedio medido para el código M. Este resultado se obtiene para todos los grados de paralelismo y además para el modelo serial.

Cantidad de recursos hardware. En la tabla 7 se muestran los datos obtenidos para los recursos estimados de la FPGA si la segunda arquitectura se implementa en *hardware*, a partir de los datos de la tabla 6 se obtiene las curvas de la figura 20, produciendo tendencias lineales en aumento para el casos de los recursos Slices, FFs, y IOBs y constante para el caso de LUTs.

Tabla 6. Recursos estimados de hardware

Grado de paralelización	Slices	FFs	LUTs	IOBs
1	71	128	34	44
2	117	220	34	88
4	209	404	34	176
8	392	772	34	352
16	761	1508	34	704
32	1497	2980	34	1408

Fuente: elaboración propia.

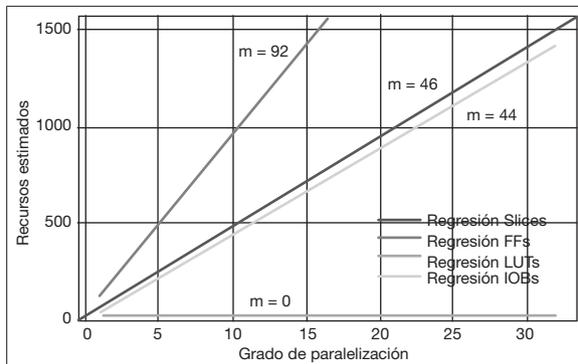


Figura 20 Recursos estimados de hardware para la segunda arquitectura

Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta que los *slices* están compuestos por dos *flipflops* y dos *LUT*, el análisis se puede realizar directamente sobre este recurso. La ecuación (12) describe el comportamiento de los *slices* según el grado de paralelización (GP).

$$\text{Slices} = 46 * GP + 24,8 \quad (12)$$

La ficha técnica de la FPGA Spartan 3AN XC3S700AN indica que la tarjeta cuenta con un total de 5888 *slices*.

TRABAJO FUTURO

Además de las herramientas utilizadas de Xilinx System Generator para la elaboración de este proyecto, el *toolbox* cuenta con múltiples recursos adicionales, pero que en algunos casos están limitados a la tarjeta. Una propuesta para un trabajo futuro sería implementar la segunda arquitectura diseñada en una tarjeta más robusta, que permita realizar otro tipo de estrategia aparte de la cosimulación. Hoy existen en el mercado una serie de FPGA de la familia de Xilinx que trabajan con un protocolo de comunicación diferentes al JTAG para la comunicación con Matlab, el propósito de estos protocolos adicionales es poder simular

arquitecturas desde Matlab con verificación en *hardware* en tiempo real.

Para este proyecto se implementó un algoritmo que permite paralelizarse (convolución); sin embargo, existen múltiples algoritmos para el procesamiento digital de imágenes que no pueden ser paralelizados. Una propuesta para un trabajo futuro sería diseñar e implementar este tipo de algoritmos mediante Xilinx System Generator; por ejemplo, el de esqueletización. El objetivo sería poder realizar un análisis comparativo entre un algoritmo no paralelizable y uno paralelizable.

CONCLUSIONES

La convolución es un filtro utilizado para el procesamiento de imágenes que no depende de resultados anteriores, es decir, que con independencia de las veces en que se divida la imagen, el algoritmo de convolución va a funcionar; por lo tanto, la convolución es un algoritmo paralelizable.

El grado de paralelismo tiene un comportamiento exponencial decreciente en función del tiempo de procesamiento, este comportamiento indica que existe un rango hasta donde es viable paralelizar. Aunque los tiempos seguirán disminuyendo, la reducción no será tan notable como en los primeros grados de paralelización.

Se plantea una metodología para estimar los tiempos de comunicación a través de una arquitectura adicional, donde se obtuvo que los tiempos estimados de comunicación en la paralelización de la imagen son menores que en el serial; sin embargo, la diferencia entre el tiempo total y el de comunicación muestra que el tiempo de procesamiento es menor en el serial que en el paralelo, lo cual indica que la forma en la que se está estimando el tiempo de comunicación no es correcta. Este método no es útil para medir.

Con respecto al tiempo $t = 197,8 \times 10^{-5}$, medido para el código M creado a partir de la instrucción *conv2*, la razón entre t y el tiempo medido con el “Timing and Power Analysis” aumentan a medida que los tiempos totales de las tablas 4 y 5 disminuyen; es decir, que los tiempos del “Timing and Power Analysis” son inversamente proporcionales a dicha razón, la relación para el procesamiento en serie es de 25 y para los grados de paralelización 2, 4 y 8 es de 51, 97 y 181, respectivamente.

Los mejores tiempos de procesamiento se obtuvieron cuando se utilizó la herramienta “Timing and Power Analysis”. Los tiempos medidos para las cosimulaciones no alcanzaron valores tan bajos, debido al tiempo de comunicación que requieren para enviar la información a la FPGA.

Debido a las restricciones del System Generator, el máximo grado de paralelización que se pudo

cosimular fue de 32 para una imagen estándar de 480 x 640, para el cual se usó un recurso estimado de 1497 slices; sin embargo, si la limitante no fueran las restricciones del *software*, sino la cantidad de recursos de la tarjeta, el máximo grado de paralelización que se podría obtener sería de 80. No se puede obtener una paralelización de 128, debido a que superaría los recursos en aproximadamente 24,8 slices.

En los recursos estimados en el proceso de paralelización de la imagen se observan tendencias lineales a medida que aumenta el grado de paralelización, de las cuales se obtiene una mayor pendiente en los FF de un valor $m=92$, y una menor de $m=44$ para los IOB. Además de una pendiente igual a 0 para los LUT, lo cual muestra que sin importar el grado de paralelización, dicho recurso se mantendrá constante.

REFERENCIAS

- Boemo Scalvinoni, E. (2005). *Estado del arte de la tecnología FPGA*. Recuperado de http://www.inti.gob.ar/electronicaeinformatica/instrumentacion/utic/publicaciones/cuadernilloUE/CT_Microelectronica17_FPGA.pdf
- Garces Socarrás, L. M. (2012). *Aceleración de algoritmos mediante hardware reconfigurable*. La Habana: CUJAE.
- Electrical Professional Service (2013). *Termografía infrarroja*. Recuperado de <http://www.epspan.com/>
- Gonzales, R. y Woods, R. (2002). *Digital Image Proccesing*. Estados Unidos: Prentice Hall.
- Escalante Ramírez, B. (2006). *Procesamiento digital de imágenes*. Apuntes de clase de la Universidad Nacional Autónoma de México, Distrito Federal, México.
- López Vallejo, M. (2004). *FPGA: Nociones básicas e implementación*. Recuperado de http://www.lsi.die.upm.es/~marisa/docencia/fpga_a2_2004.pdf
- Forero Vargas, M. G. y Arias Cruz, E. A. (2001). Estudio del efecto de las máscaras de convolución en imágenes mediante el uso de la transformada de Fourier. *Revista de Ingeniería e Investigación*, 48, 46-51.
- Math Works (2013). *Image Processing Toolbox*. Recuperado de <http://www.mathworks.com/help/images/index.html>
- Moctezuma Eugenio, J. C. y Torres Huitzil, C. (2006). Estudio sobre la implementación de redes neuronales artificiales usando *xi-*

- linx system generator*. Puebla, México: Departamento de Ciencias Computacionales, Universidad Autónoma de Puebla, Mexico.
- Moctezuma, J. C., Sánchez, S., Álvarez, R. y Sánchez, A. (2007). Architecture for Filtering Images Using Xilinx System Generator. *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation*, 1 (2), 101-107.
- Raygoza, J., Ortega, S., Cabrera, H. y Ibarra, F. (2009). Prototipado y verificación de un sistema de procesamiento de audio en FPGA's mediante hardware in the loop. *XXIV Congreso de Instrumentación SOMI*. México.
- Rodríguez Cruz, C., Rivero Flores, R. y Castillo Atoche, A. (2006). Procesamiento de imágenes con Xilinx System Generator. *Primer Congreso Internacional de Sistemas de Computacionales y Electrónicos (CIS-CE)*. México.
- Rodríguez Escudero, A. A. (2013). *Convolución bidimensional*. Recuperado de <http://digitimagen.blogspot.com/2013/04/convolucion-bidimensional.html>
- Rodríguez Pérez, J. F. (2010). *Programación MATLAB en paralelo sobre clúster computacional: evaluación de prestaciones* (tesis de grado en ingeniería). Universidad Politécnica de Cartagena, España.
- Sánchez Élez, M. (2014). *Introducción a la programación en VHDL*. Recuperado de http://eprints.ucm.es/26200/1/intro_VHDL.pdf
- Electrical Professional Service (2013). Termografía infrarroja. Recuperado de <http://www.epspan.com/>
- Xilinx (2012). *Xilinx System Generator for DSP User's Guide*. Recuperado de http://www.xilinx.com/support/documentation/sw_manuals/xilinx14_1/sysgen_user.pdf

Técnicas de control para el balance de un robot bípedo: un estado del arte

Control techniques for the balance of a robot biped: a state of the art

SERGEY GONZÁLEZ MEJÍA

Ingeniero electrónico, especialista en Automatización Industrial, máster en Ingeniería-énfasis en Automática, investigador de la Universidad del Valle, Cali, Colombia. Contacto: sergey.gonzalez@correounivalle.edu.co

JOSÉ MIGUEL RAMÍREZ SCARPETTA

Ingeniero electricista, máster en Ingeniería Eléctrica, máster en Automática-Productiva, doctor en Automática, docente de la Universidad del Valle, Cali, Colombia. Contacto: jose.ramirez@correounivalle.edu.co

EDNA JOYDETH AVELLA RODRÍGUEZ

Ingeniera electrónica, estudiante de Maestría de la Universidad del Valle, Cali, Colombia. Contacto: edna.avella@correounivalle.edu.co

Fecha de recepción: 22 de agosto del 2013

Clasificación del artículo: revisión

Fecha de aceptación: 15 de mayo del 2014

Financiamiento: Colciencias, Universidad del Valle

DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.1.a010>

Palabras clave: equilibrio dinámico, equilibrio estático, locomoción, planos anatómicos.

Keywords: Dynamic equilibrium, locomotion, anatomical planes.

RESUMEN

Debido a la inestabilidad inherente de los robots bípedos, existen diferentes técnicas para controlarlos. El objetivo de este trabajo es presentar una revisión descriptiva de algunas técnicas de control para el equilibrio estático y dinámico y algoritmos para la generación de patrones de marcha desarrolladas en la robótica bípeda. El artículo también contiene una breve terminología de la locomoción bípeda. Las técnicas de control descritas se basan en la teoría de control a partir de modelos dinámicos de los robots bípedos.

ABSTRACT

There are different control techniques due to the inherent instability that bipedal robots have. The purpose of this paper is to present a descriptive review of some control techniques for static and dynamic balance; also, to check algorithms to generate gait patterns developed in bipedal robotics. The article also contains a brief glossary of bipedal locomotion. The control techniques described in this paper are based on the control theory from dynamical models of biped robots.

INTRODUCCIÓN

La estrecha interacción entre los sistemas de manipulación robótica y los seres humanos ha generado que los robots se vuelvan comunes en ambientes no industriales como hogares, hospitales y áreas de servicio. Los robots bípedos se controlan de manera similar a los manipuladores industriales, con base en control de trayectorias. Para que el robot mantenga la estabilidad local, la marcha se debe sintetizar como una trayectoria continua a lo largo del espacio. Durante años se ha satisfecho esta restricción usando el paradigma del punto de momento cero (Santana Hernández, 2006). Se han propuesto otros criterios de estabilidad como el indicador de la rotación del pie, aunque la mayoría de los robots humanoides o bípedos utilizan el punto de momento cero. Una vez se garantice un criterio de estabilidad, el robot bípedo es capaz de caminar establemente. Esta revisión presenta de una forma básica algunos conceptos que abarcan la locomoción bípeda, luego se realiza una descripción de las técnicas de control de equilibrio aplicadas en robots bípedos, haciendo una clasificación entre el régimen estático y el dinámico.

TERMINOLOGÍA EN LOCOMOCIÓN BÍPEDA

Esta sección presenta algunos términos y acrónimos que serán utilizados en este artículo.

Planos espaciales anatómicos

Los tres ejes conforman los planos del espacio (Santana Hernández, 2006). El plano frontal o coronal se orienta de manera vertical, de forma tal que divide al cuerpo en anterior y posterior. El plano sagital se orienta verticalmente y perpendicular al plano frontal, dividiendo el cuerpo en dos zonas: derecha e izquierda, en tanto que

el plano transversal o axial se orienta horizontalmente, a diferencia de los otros dos planos. De esta manera, el cuerpo se divide en zona inferior y zona superior.

Centro de gravedad y centro de masa del cuerpo humano

Desde la posición anatómica de pie, el centro de gravedad (CG) en el cuerpo humano se encuentra aproximadamente en la posición anterior de la segunda vértebra en el sacro. La ubicación precisa del vector de gravedad para una persona dependerá de sus dimensiones físicas, donde su magnitud es igual a la masa corporal del individuo. La ubicación del centro de masa o CM en el cuerpo humano es el punto donde hay mayor concentración de masa, coincide con el CG solo si el campo gravitatorio es uniforme (Zermeño Sobrino, 2006).

Centros de gravedad de los segmentos

Cada segmento del cuerpo humano posee su propio centro de gravedad. Esto quiere decir que sobre estos existe una fuerza de gravedad. En el caso de que dos segmentos adyacentes se combinen para ejercer una fuerza o movimiento, se consideran como un solo segmento sólido. Entonces el nuevo segmento tendrá un nuevo centro de gravedad que estará ubicado y alineado en el medio de los centros de gravedad originales (Zermeño Sobrino, 2006).

Polígono de soporte

El polígono de soporte (apoyo) o área de soporte (AS) es una figura geométrica plana formada en el suelo por uno o dos pies (Santana Hernández, 2006). En caso de soporte sobre un único pie, es este mismo. En caso de soporte con los dos pies, se abarca la región de los pies y la parte del área entre ambos.

Proyección del centro de masa y centro de presión

La proyección del centro de masa es el punto obtenido al proyectar verticalmente el CM sobre el AS (frecuentemente el plano horizontal), mientras que la proyección del centro de presión (CP) es el punto obtenido al proyectar el CM en la dirección de la resultante de fuerzas del sistema sobre el AS (Santana Hernández, 2006).

Punto de momento cero

El punto de momento cero (PMC) es el punto sobre el AS del humanoide donde se anula el momento resultante de las fuerzas externas, la gravedad y las fuerzas de inercia (Santana Hernández, 2006). Se define también como el punto en el suelo tal que el momento neto de las fuerzas externas no tiene componentes sobre los ejes horizontales. Cuando existe dentro del AS, el contacto entre el suelo y el pie es estable. Cuanto más cercano esté al centro de la superficie de soporte, más robustez se conseguirá. Cuando está fuera del AS, el robot se inclina rotando sobre alguno de los bordes de dicho polígono. El criterio de que el PMC exista dentro del AS es condición necesaria y suficiente para garantizar la estabilidad dinámica del robot (Fernández Iglesias, 2009)

Centro de presión

El centro de presión (CP) es el punto en la superficie de contacto donde se considera que actúa la fuerza de reacción neta del piso (Santana Hernández, 2006).

Índice de rotación del pie

El índice de rotación del pie (IRP) es el punto en la superficie en el cual la reacción del suelo tiene

que actuar para que el pie permanezca estacionario (Santana Hernández, 2006).

Margen de estabilidad estática y margen de estabilidad dinámica

Para un determinado momento, el margen de estabilidad estática es la distancia más corta entre la proyección del centro de masa y el polígono de soporte, en tanto que el margen de estabilidad dinámica es la distancia más corta entre la proyección del centro de presiones y el polígono de soporte. Es la mínima distancia entre el PMC y los bordes del polígono de soporte, en donde SM_x es el margen de estabilidad en el eje x , y SM_z es el margen de estabilidad en el eje z (Santana Hernández, 2006).

Equilibrio estático y equilibrio dinámico

Existen dos modelos básicos de equilibrio (balanceo) en la locomoción bípeda: el “equilibrio estático” y el “equilibrio dinámico”. El equilibrio estático lleva a movimientos lentos y menos naturales, mientras que para ganar eficiencia y velocidad se tiene que conseguir un equilibrio dinámico. Los dos tipos de equilibrio se basan en la implementación de leyes de control que utilizan el concepto de AS (Pardos Gotor, 2005).

Ciclo de marcha

El ciclo de la marcha inicia cuando el pie hace contacto con el suelo y finaliza cuando este mismo pie hace contacto nuevamente con el suelo. El ciclo de marcha o caminata es un tipo de movimiento periódico y está descrito por dos fases principales que se alternan con cada pierna: la fase de apoyo y la fase de balanceo. Una pierna se encuentra en fase de apoyo cuando está en contacto con el suelo, y se encuentra en fase de balanceo cuando no tiene contacto con el suelo (Guzmán Valdivia, 2010).

TÉCNICAS DE CONTROL APLICADAS A ROBOTS BÍPEDOS

En la teoría de la locomoción bípeda para los robots humanoides, la marcha se puede aplicar en cualquier tipo de terreno, por eso se estudia solamente el uso de robots humanoides en ambientes humanos así como el diseño de algoritmos de control para el balanceo y la marcha aplicados a este tipo de robots. La mayoría de los investigadores trabajan con robots humanoides de bajo costo, ya que estos son más accesibles y también ofrecen la oportunidad de ser estudiados para implementar nuevos algoritmos de equilibrio y marcha.

Esta revisión manifiesta que los diseños de los robots humanoides difieren en restricciones, cantidad, tipo, tamaño, tiempo de respuesta de los actuadores, sensores e incluso en su estructura mecánica. Todo esto da una idea de la posible dinámica de marcha en el robot, así como de una variedad de técnicas de control para equilibrio y métodos de planificación o generación de trayectorias suaves para lograr un balance dinámico. Hoy en proyectos de investigación se usa la medición de la inclinación de postura y la desviación del centro de masa como realimentación a las estrategias de control. Estas estrategias utilizan diferentes tipos de sensores y algoritmos para procesar los datos recibidos, a fin de estimar la inclinación y la posición del centro de masa de forma precisa y aplicar las acciones de control indicadas.

La revisión establece una clasificación entre los trabajos que enfatizan en el diseño de algoritmos de control para equilibrio estático-dinámico y los métodos de generación de patrones de marcha aplicados a robots bípedos. Los trabajos se realizaron en universidades y laboratorios de investigación, los resultados han sido publicados en artículos de diferentes revistas y eventos.

Algoritmos de control para equilibrio estático y dinámico aplicados en robots bípedos

Esta sección expone técnicas de control aplicadas a robots humanoides para lograr el equilibrio estático y dinámico. Estas técnicas se clasifican dependiendo del tipo de equilibrio deseado.

Técnicas de control para equilibrio estático. La revisión realizada presenta algoritmos para el control de equilibrio estático. Aun así, se describen los trabajos hallados que desarrollan técnicas de control para el régimen estático.

Los robots bípedos en su mayoría poseen actuadores en los tobillos, haciendo más fácil el diseño del control en la caminata. El trabajo de Abdullah y Goswami (2005) presenta una estrategia de control de dos fases para el mantenimiento de equilibrio robusto bajo una fuerza de perturbación. La primera fase es llamada la fase de reflejo, se diseña para resistir el efecto inmediato de una fuerza, donde la ley de control utilizada es el momento angular; se caracteriza por resistir a la perturbación. La segunda fase es la recuperación, donde el sistema es dirigido a una posición “home” donde es estáticamente estable. La ley de control es de recuperación, emplea un esquema general que maximiza la energía potencial con diferentes superficies de terreno.

El objetivo de un robot bípedo es recuperar y mantener el balance mediante la detección de disturbios externos ejecutando los reflejos. Como lo explican Corpuz, Lafoteza, Broas y Ramos (2009), la instrumentación utilizada es un acelerómetro y un giróscopo que permiten estimar la postura del sistema, a su vez se utiliza un filtro Kalman como algoritmo de fusión de las señales del acelerómetro y giróscopo para tener una medida de la orientación. El algoritmo de equilibrio utilizado es un péndulo invertido de doble soporte. Los límites del YICAL se establecen por la velocidad y máxima inclinación. El algoritmo

usa supuestos como lo son: mantenerse en posición de doble apoyo, la posición de la cadera con respecto a los muslos es fija.

Sheng-jun, Hai-tao, TaoyHong-xu (2009) proponen el grado de pérdida de equilibrio como un criterio de estabilidad para robots bípedos subactuados. Considerando que el robot bípedo no tiene pies, se analiza que el contacto con tierra se realiza puntual, modelándolo como un péndulo invertido con longitud variable y momento de inercia. Para el cálculo del grado de pérdida de equilibrio se utiliza el modelo lineal, en el que se tiene un punto de equilibrio inestable y la tarea principal del control es mantener el estado del robot cerca de la vecindad del punto de equilibrio y evitar la caída.

Ono, Sato y Ohnishi (2011) proponen las estrategias de recuperación de equilibrio y el cambio de las estrategias basadas en el valor de la aceleración del CG. Los robots humanoides son sometidos a una fuerza externa repentina mientras están de pie. De acuerdo con la fuerza externa aplicada, se determina qué estrategia se usa, como se observa en la figura 1. Este documento asume que el valor de la fuerza externa es equivalente al valor de la aceleración del CG, el cual determina si la articulación de la rodilla se usa para la recuperación del equilibrio

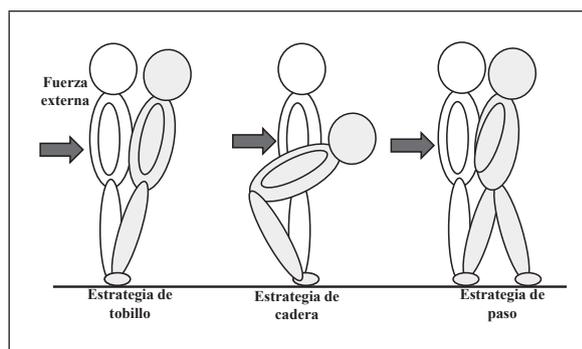


Figura 1. Tres estrategias básicas de balanceo

Fuente: Ono et ál. (2011).

Kim et ál. (2012) presentan el control de equilibrio para un robot bípedo con control de par, esta técnica se aplica en el robot Roboray, el cual tiene seis grados de libertad (GDL) y sensores de par en todas las articulaciones de las piernas. Asimismo, tiene un módulo de empalme de cable impulsado como una unidad de articulación de cabeceo. Con el uso de estas características se propone un algoritmo de control para balanceo. Este algoritmo es la combinación de compensación de gravedad, control de la gravedad virtual y control de la amortiguación. También se introduce una técnica de compensación de fricción, con el fin de eliminar la no linealidad de amortiguación y mejorar el rendimiento de seguimiento de par. El método propuesto se aplica a un sistema de péndulo invertido simple y al robot Roboray.

Roa y Ott (2013), por su parte, presentan una visión general de un enfoque para el equilibrio y control de postura, regulando al mismo tiempo la posición del CM y la orientación del tronco de un robot bípedo. Al realizar una perturbación externa el robot se desvía de la postura deseada, el controlador calcula una fuerza-par necesaria para recuperar la posición y la orientación deseadas, de acuerdo con la ley de control. Esta fuerza-par se distribuye a los puntos de contacto de soporte en los pies. Las fuerzas en estos puntos se calculan a través de un problema de optimización con restricciones, lo que minimiza las fuerzas de contacto, mientras que al incluir las restricciones y límites de par existe una fricción en cada junta.

Técnicas de control para equilibrio dinámico.

El equilibrio dinámico es el objetivo general en la robótica bípeda, ya que evita la caída inminente del robot bípedo cuando experimenta grandes perturbaciones; por consiguiente, le permite interactuar en terrenos agrestes. Para lograrlo se necesitan diversos sensores que den información útil del estado del sistema bípedo, como es el centro de presión en los pies, torques, velocidades y

posiciones angulares de las articulaciones, aceleraciones del centro de masa, etc.

A continuación se explican desarrollos de estrategias de control aplicados a robots bípedos para obtener el equilibrio dinámico, estas técnicas se aplican a robots bípedos construidos; otros solamente se proponen a nivel de simulación.

Yeoun-Jae, Joon-Yong y Ju-Jang (2012) proponen una estrategia de control de balance para un robot bípedo mientras camina, aplicando una fuerza externa. Se parte de la suposición de que durante la marcha se aplican una fuerza lateral y una longitudinal en el centro de la pelvis del robot bípedo, para este análisis se tiene en cuenta la eficiencia de la energía.

Liu, Li, Guo y Cai (2012), a su vez, proponen un sistema de control donde se tratan la postura corporal, la velocidad y el giro de la pierna de balanceo como tres problemas de control independientes. La primera parte del control mantiene el cuerpo en posición vertical, teniendo en cuenta el par de la cadera de la pierna de apoyo. La segunda parte del control estabiliza la velocidad de avance mediante la regulación de la longitud de la pierna de apoyo, en tanto que la tercera parte es el control del ángulo de la pierna de balanceo.

Li, Su y Liu (2012) desarrollan un nuevo modelo de trayectoria con parámetros ajustables que modula la trayectoria con PMC en los planos sagital y lateral y hace que la trayectoria del PMC sea más flexible. La dinámica de control incluye control de equilibrio dinámico, un filtro de Kalman y un controlador de movimiento diseñado para mantener el equilibrio del cuerpo y permitir que el bípedo camine siguiendo la referencia del PMC deseada.

Li y Ge (2012) muestran una estructura de control adaptativo robusto que incluye el equilibrio y un control postural para regular la posición del CM y la orientación del tronco de los robots bípedos

de una manera compatible. En primer lugar, el robot bípedo se desacopla de la dinámica del CM y el tronco. El control calcula la fuerza de reacción del suelo para estabilizar la postura con la dinámica desconocida del CM y luego transforma estas fuerzas en pares de conjuntos de todo el cuerpo, incluso si existen las perturbaciones externas.

Guihard y Gorce (2002) presentan una forma de resolver el control dinámico bajo perturbaciones desconocidas que tiene en cuenta la noción de movimiento postural. Para ello se propone un modelo mecánico multcadena de un cuerpo humano y una arquitectura de control general. Además, se utiliza una estrategia postural de tobillo y cadera donde la noción de movimiento asegura el equilibrio dinámico bípedo.

En el trabajo de Lim, Setiawan y Takanishi (2001) se propone un control de impedancia y un control de equilibrio para robots bípedos, a fin de que caminen de forma estable y en condiciones como las de un ser humano. El control de equilibrio se basa en el movimiento del tronco y la cintura, lo cual esto se aplica para mantener el equilibrio y la postura, mientras que el movimiento de las extremidades inferiores se controla de acuerdo con el terreno. El control de impedancia se aplica para reducir la fuerza/torque al realizar el contacto entre el pie y el suelo. Los parámetros de la impedancia se cambian en tiempo real, dependiendo de la etapa de la marcha.

Pratt, Chew, Torres, Dilworth y Pratt (2001) utilizan un modelo de control virtual. Es un lenguaje de control de movimiento que utiliza simulaciones, son componentes mecánicos para crear fuerzas que se aplican a través de pares de conjuntos reales, creando la ilusión de que los componentes virtuales están conectados al robot.

Rehbinder y Hu (2001) muestran que una de las técnicas empleadas en el control de robots móviles es la estimación del estado, donde los estados son típicamente posición, velocidad y orientación.

Los dispositivos para realizar esta estimación son un giróscopo y un acelerómetro de tres ejes, a fin de dar estimaciones estables de la postura del robot. Se usa una descripción global de la rotación del cuerpo-rígido para obtener un problema lineal y poder usar un filtro Kalman lineal modificado. De esta forma se logra que no haya restricción en el tipo de movimientos que puede realizar el robot.

La Universidad de Grenoble en Francia construyó el robot bípedo Rabbit (Grizzle, 2002), el cual carece de pies, las piernas terminan como zancos de manera que oscila sobre un punto cuando avanza. El concepto de estabilidad es representado con fórmulas matemáticas que comprenden la dinámica de la marcha y el equilibrio, produciendo automáticamente un algoritmo de control que induce a un movimiento deseado. Se puede variar la velocidad de la marcha y se utiliza conmutación de leyes de control y una acción de control integral.

La investigación de Chevallereau et ál. (2003) muestra el diseño de control mediante restricciones virtuales para la fase de balanceo del robot Rabbit. El robot tiene cinco segmentos, cuatro actuadores, es planar y realiza la marcha bípeda. El diseño del control considera al robot en la fase de único soporte y las restricciones se realizan de acuerdo con un elemento común que es la regulación de las cuatro salidas independientes (actuadores); la elección de los actuadores se realiza para regular el ángulo del torso, la altura

de las caderas y la posición final de la pierna en balanceo.

La mayoría de las estrategias de control de un robot están construidas alrededor del seguimiento de trayectorias, que se generan ya sea fuera de línea, durante la fase de planificación de trayectoria, o en línea, por medio de un planificador de movimiento de alto nivel. Chevallereau et ál. (2003) proponen que para controlar adecuadamente el robot Rabbit se necesita una teoría de control para una clase de sistemas con una dinámica tanto continua como discreta y menos actuadores que grados de libertad; además, se desean órbitas asintóticamente estables, en lugar de puntos de equilibrio, y tener múltiples objetivos como caminar, correr y equilibrar. En la figura 2 se observa la implementación del sistema de control sobre el robot bípedo Rabbit basado en restricciones virtuales y dinámica híbrida cero para la marcha. Otro análisis de Chevallereau, Grizzle y Shih (2009) presenta controladores que permiten una caminata asintóticamente estable, periódica y rápida para un robot bípedo. La primera estrategia consiste en imponer una condición de estabilidad durante la búsqueda de la caminata por optimización periódica. La segunda estrategia utilizada es un controlador basado en eventos para modificar los valores propios del mapa de Poincaré. En el tercer enfoque se analiza el efecto de selección de la salida en la dinámica de cero y se propone una selección pertinente de los productos, lo que lleva a la estabilización sin el uso de un controlador basado en eventos suplementarios.

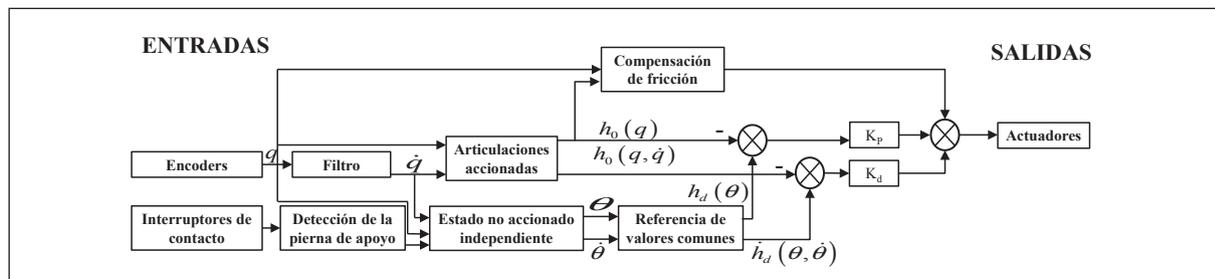


Figura 2. Diagrama de bloques del sistema de control -Rabbit

Fuente: Chevallereau et ál. (2003).

Se han desarrollado sistemas de control híbrido y controladores de compensación para sistemas con múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO) no lineales con incertidumbres. Lin, Chen y Chen (2007) afirman que un sistema de control híbrido se basa en la técnica de modos deslizantes y utilizan un controlador de articulación por modelo de cerebelo recurrente (RCMAC) como un observador de incertidumbre. En la figura 5 se observa que el controlador principal contiene un observador de incertidumbre RCMAC, siendo este el controlador principal, y un controlador de compensación para la aproximación de error del sistema incierto.

Shih, Grizzle y Chevallereau (2007) presentan un controlador por retroalimentación que logra una marcha asintóticamente estable, periódica y rápida para un robot bípedo en 3D, que consta de tres enlaces y pies puntuales pasivos. Cada enlace es modelado por una masa puntual en su centro

y no hay movimiento de viraje sobre el final de la pierna de apoyo. Asumen un contacto puntual no actuado en el final de la pierna y buscan un controlador por realimentación invariante en el tiempo que crea un movimiento exponencialmente estable y periódico.

Uno de los desarrollos es el robot de Honda Asimo¹ (Honda Motor, 2007), que se desarrolla para funcionar en la sociedad y en un entorno de vida humana; se realiza un prototipo de tamaño casi humano. Cuando Asimo pierde el equilibrio y trata de caer, los tres siguientes sistemas de control, como se muestran en la figura 6, funcionan para evitar la caída y permitir una caminata continua. Primero un control de reacción del piso que absorbe las irregularidades del suelo y controla la ubicación de las plantas de los pies cuando la caída es inminente; segundo, el control para referencia de PMC, y tercero, el control de posicionamiento de la planta del pie.

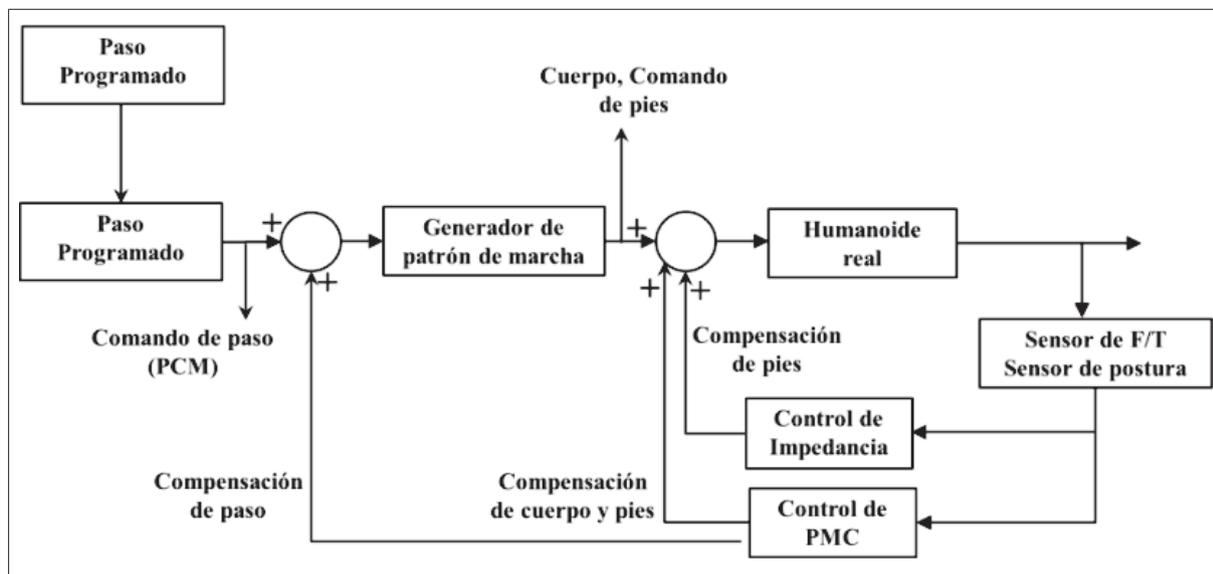


Figura 4. Diagrama del algoritmo de control de marcha

Fuente: Kwon et ál. (2007).

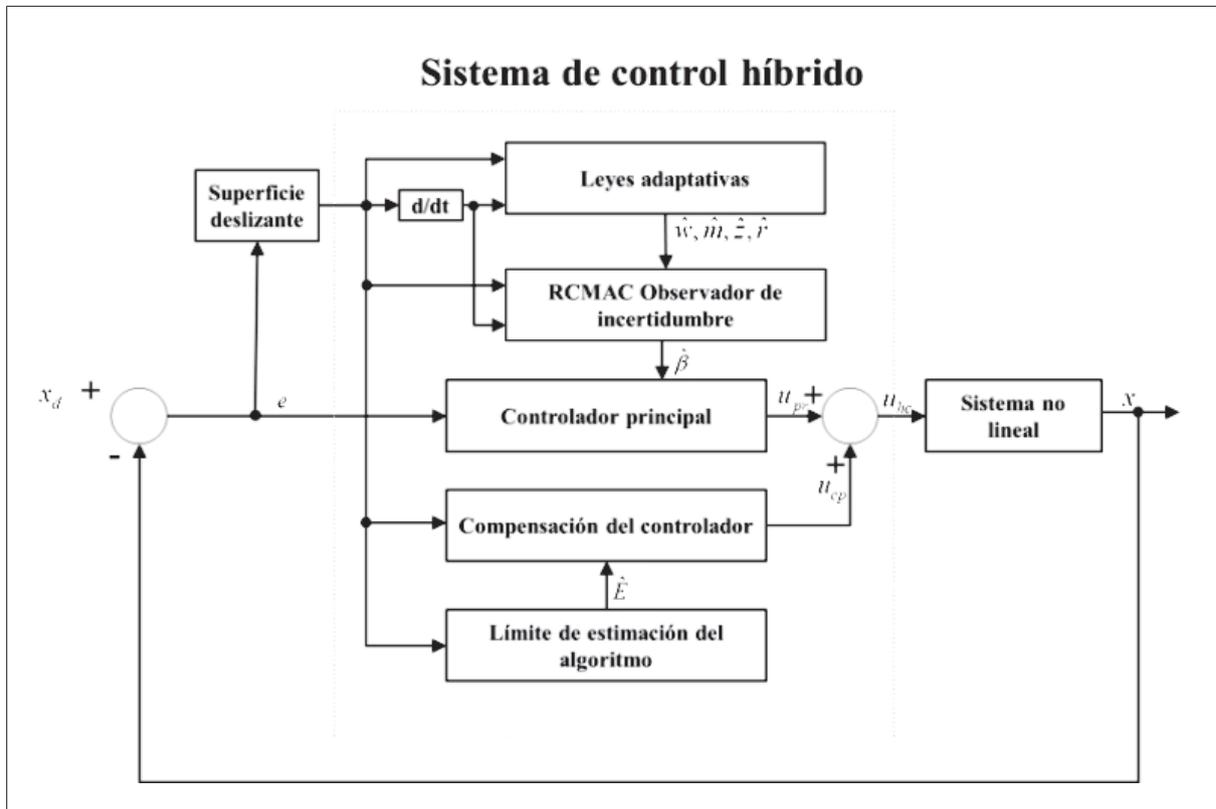


Figura 5. Sistema de control híbrido con RCMAC

Fuente: Lin et ál. (2007).

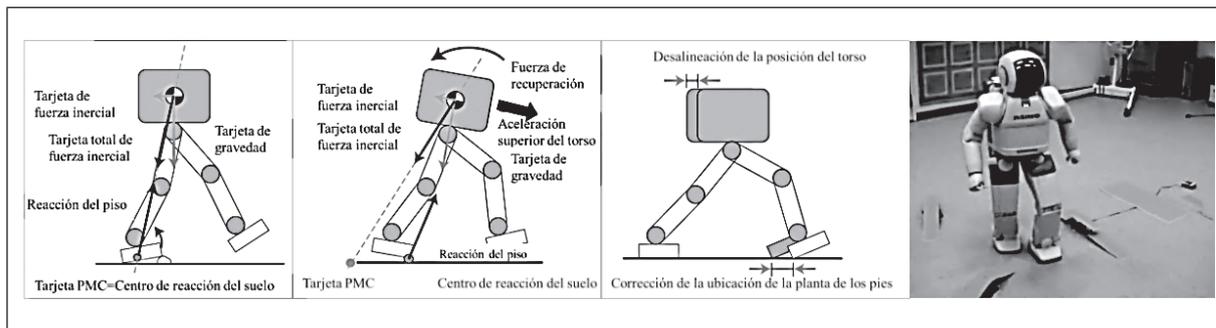


Figura 6. Sistemas de control para el robot Asimo

Fuente: Honda Motor (2007).

La compañía Anybots (2007) presenta a sus dos robots, llamados Dexter y Monty, estos aprenden basados en ensayo y error. Monty es un robot humanoide que atrapa una pelota y la lanza, acción

esta que demuestra una estabilidad de la base con ruedas equilibradas. Este robot tiene el mismo sistema del Segway donde se controla la proyección del CM para que esté dentro de la región de

soporte que forman las dos ruedas. Dexter, el robot caminante, realiza un equilibrio dinámico para caminar, la marcha mejora con la práctica. Cuando está cayendo, el robot conoce la dirección y apoya el pie en el lugar exacto para balancear en la dirección que se desea ir, también la acción de caer se hace porque el CP no se centra sobre el pie (o pies) que está en el suelo.

La Universidad de Michigan desarrolla al robot bípedo Mabel (Grizzle, 2008), un robot que tiene un tronco pesado, piernas ligeras y flexibles, con una serie de muelles (resortes) que actúan como tendones. Se conoce como el robot bípedo más rápido del mundo, capaz de alcanzar casi 11 kilómetros por hora. Está en el aire el 40% de cada paso, su cuerpo cuenta con un gran torso y delgadas piernas que tienen rodillas, las cuales le permiten correr, y se sostiene por medio de una barra mientras corre en círculos por el lugar (Matt, Shane, Allison y Philip, 2010).

En la investigación de Aclan y Ramos (2009) se implementa un control PID multivariable, aplicado al robot YICAL II, que tiene seis grados de libertad y es de accionamiento directo con motores de corriente continua.

Para la marcha bípeda dinámica se propone un algoritmo realizado por Xin y Xiao (2009), este (figura 7) incluye el cálculo del movimiento de la parte superior del cuerpo y la trayectoria del CG del robot. Los disturbios del ambiente son eliminados por el movimiento compensatorio de la parte superior del cuerpo; posteriormente, el error del CG se calcula basado en el error entre el PMC deseado y el PMC real, así como la relación entre el PMC y el CG para obtener la trayectoria del CG. Entonces, el movimiento del robot converge a su movimiento de referencia generando marcha bípeda estable.

Matsumoto y Kawamura (2010) proponen un sistema de control robusto de dirección para am-

bientes con perturbaciones, usando la medida de un giróscopo, ya que puede ser necesario un giro del robot en el espacio de trabajo. En el modelo de control se corrige el ángulo de postura del robot por una acción integral, así como el ángulo de dirección antes de dar el paso. Los autores proponen el control robusto de dirección para mejorar la respuesta debido a disturbios (ver figura 8). Esta técnica tiene un controlador proporcional-derivativo PD en realimentación y en adelante para la fase de soporte.

Ferreira, Crisóstomo y Coimbra (2010) describen el control de un robot bípedo autónomo, el cual combina el uso de las articulaciones del torso y del tobillo para el equilibrio sagital, como se observa en la figura 9. Este controlador combina las articulaciones del tobillo y el torso a fin de corregir el PMC. Para esto utiliza una técnica de inteligencia artificial, regresión de vectores de soporte, con el objeto de controlar el equilibrio del robot. Estos resultados fueron probados en superficies planas y en superficies inclinadas.

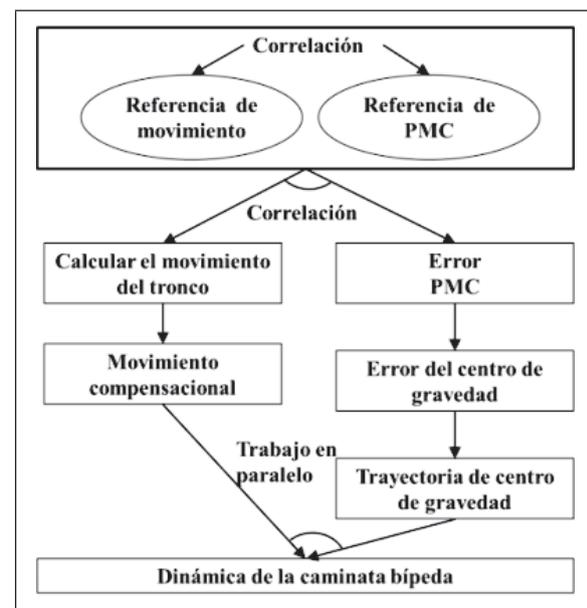


Figura 7. Algoritmo compuesto

Fuente: Xin y Xiao (2009).

Parsa y Farrokhi (2010) analizan el uso de un observador no lineal de perturbaciones, para hacer más robusto un control predictivo basado en un modelo no lineal en robots bípedos. Los autores consideran la robustez del controlador para in-

certidumbres en las dinámicas o variaciones de los parámetros del modelo del bípedo. Para robustecer el controlador se utiliza un observador no lineal de perturbación, como se observa en la figura 10.

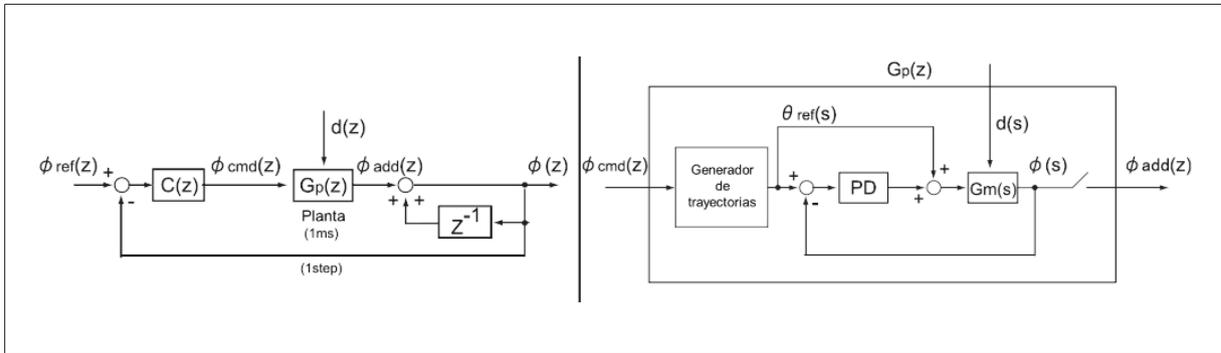


Figura 8. Modelo de control y controlador propuesto

Fuente: Matsumoto y Kawamura (2010).

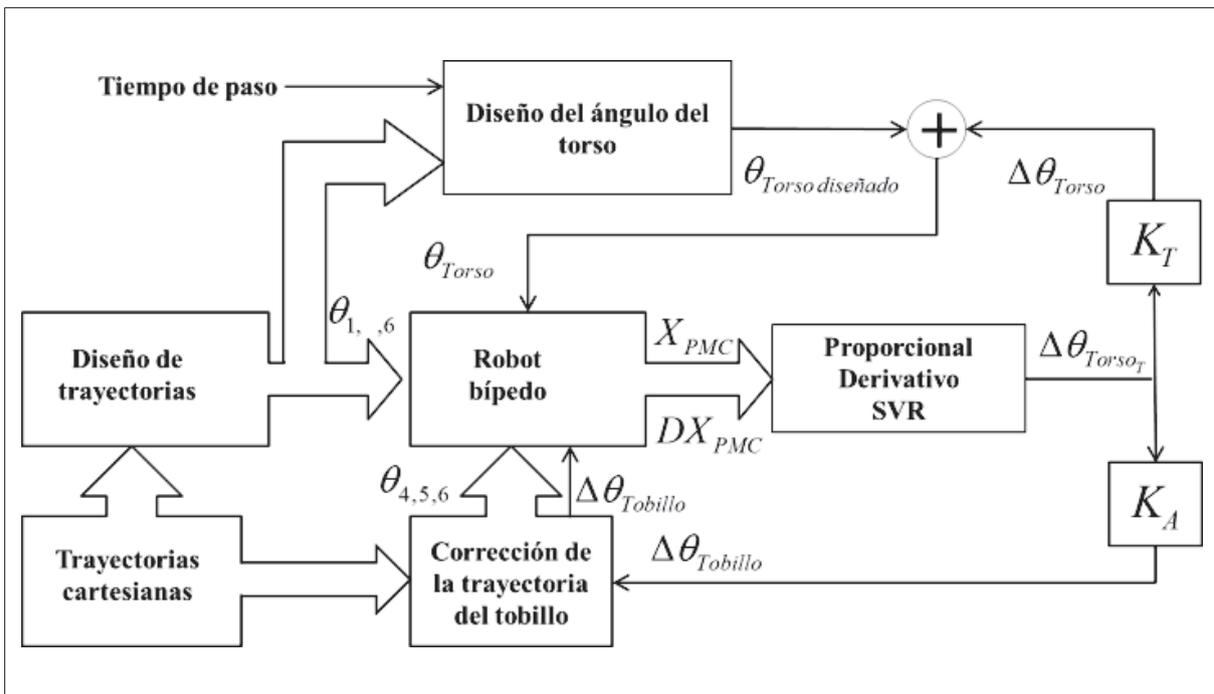


Figura 9. Control para el ángulo del torso y tobillo en el robot

Fuente: Ferreira et ál. (2010).

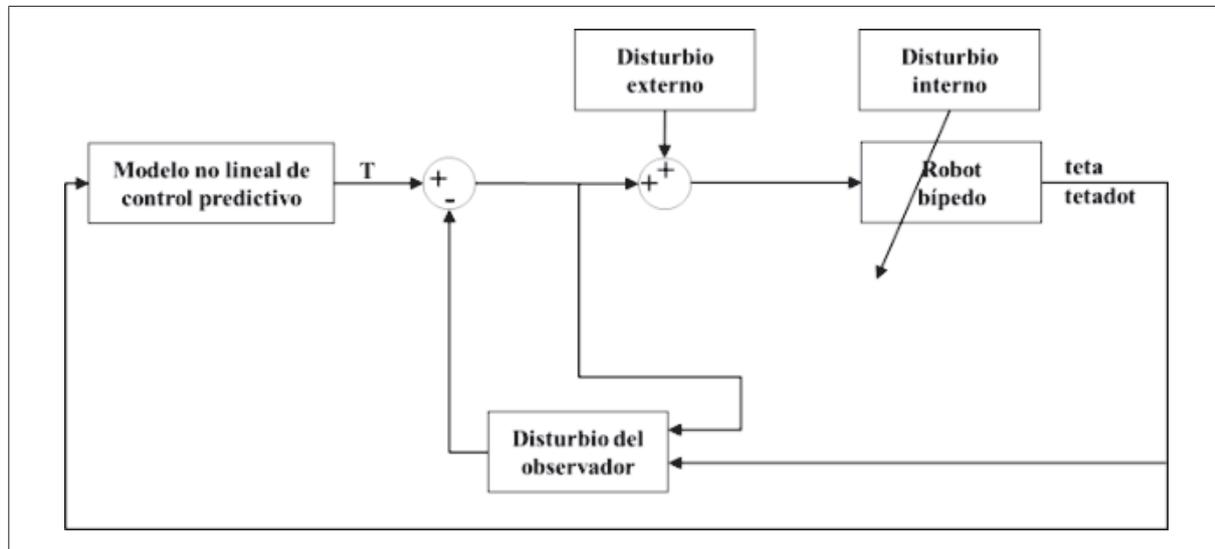


Figura 10. Estructura del observador no lineal de disturbios

Fuente: Parsa y Farrokhi (2010).

Los métodos propuestos por Aghabalaie, Hosseinzadeh, Talebi y Shafiee (2010) se basan en el control de todas las articulaciones, en lugar de controlar solamente la cadera y el tronco. La metodología de diseño para el controlador robusto utiliza el método de Lyapunov. Las restricciones de fuerzas debido a resbalones y levantamiento de los pies se consideran como perturbaciones adicionales que actúan en la dinámica del robot. En la ecuación 1 se observa la ley de control, esta se encuentra en función de los estados y la dinámica del robot.

$$U = (I - C)^{-1} \begin{bmatrix} -(I + P - M(q))x_1 - (M(q) - Q) \\ x_2 + D - kx_2^T + 2P_2^2 x_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

En la investigación realizada por Li et ál. (2010) se desarrolla una estructura de control estabilizante que consiste en un sistema sensorial pie-fuerza y controladores para marcha con respuesta dinámica rápida. Este sistema consta de tres controladores, como se evidencia en la figura 11: el controlador adaptativo, que controla el tobillo del pie que aterriza para lograr un aterrizaje suave y un contacto estable con el suelo; el controlador de

equilibrio, a fin de mantener el PMC actual dentro de la región estable deseada. Este se usa para ajustar el tobillo de la pierna de soporte y asegurar una distancia entre el PMC actual y el límite de la región estable; por último, el controlador de retorno evalúa si el PMC actual está dentro de la región estable deseada o si la pierna se encuentra en la fase de balanceo. En este caso el patrón de la marcha debe retornar al patrón dinámico original. De lo contrario, los ajustes de la articulación del tobillo serán los errores acumulados por el patrón de la marcha dinámica original.

La estructura de control desarrollada en Rokbani, Benbousaada, Ammar y Alimi (2010) tiene un controlador de torso superior y se encuentra compuesta por dos submódulos: el módulo de control de las articulaciones y el controlador de torso superior. Este último ayuda a la estabilidad de la marcha corrigiendo la posición del CM del robot. La arquitectura propuesta integra principalmente tres módulos, como se observa en la figura 12: generador de marcha, módulo de adaptación marcha y el controlador de torso superior para controlar la estabilidad de marcha.

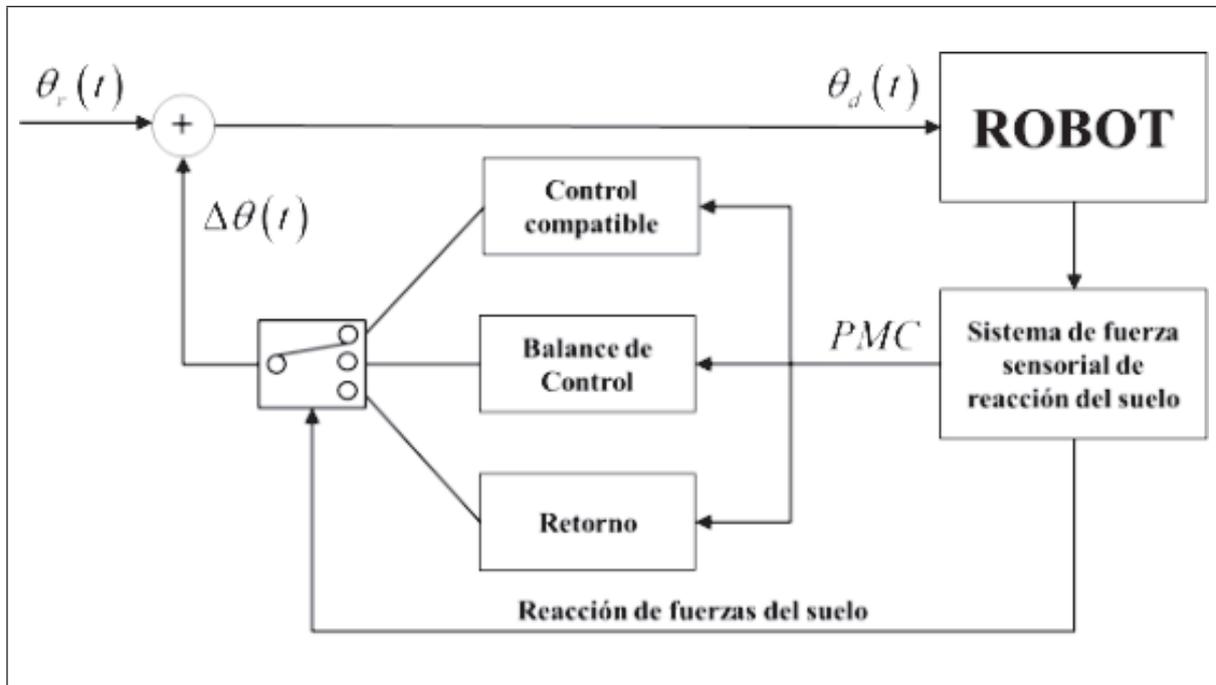


Figura 11. Estructura de control estabilizante para un robot de 14 grados de libertad

Fuente: Li et ál. (2010).

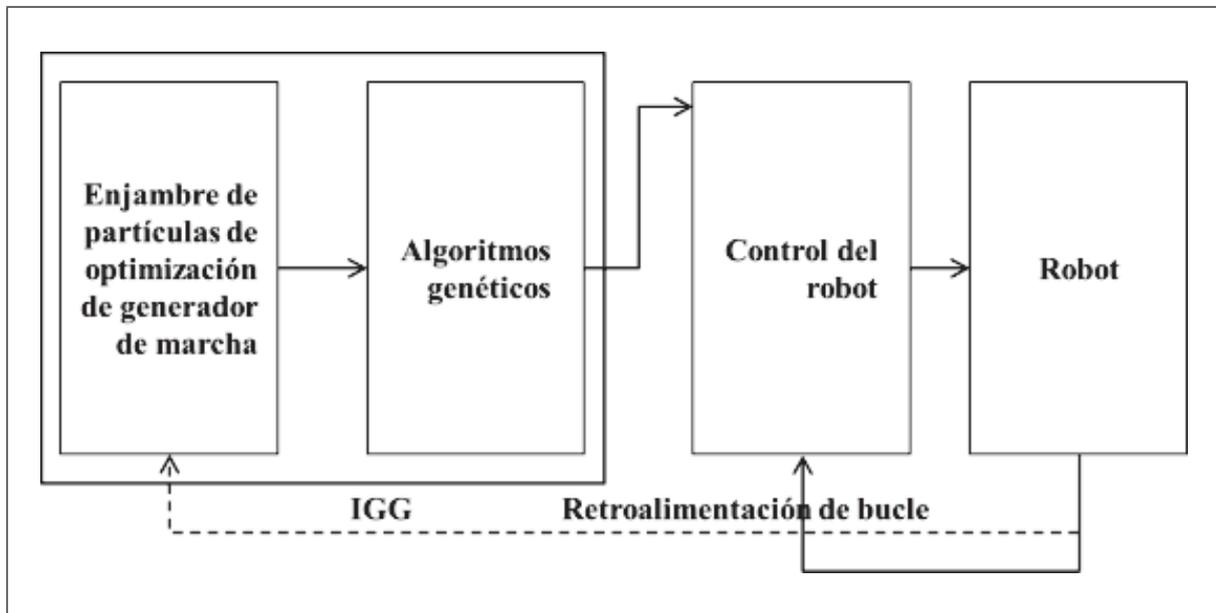


Figura 12. Flujo de control y compensación de torso superior

Fuente: Rokbani et ál. (2010).

En muchos estudios las coordenadas del PMC se calculan utilizando el modelo del robot y la información del ángulo procedente del sensor de cada articulación. Sin embargo, en la investigación de Suwanratchatamane, Matsumoto y Hashimoto (2010) se emplea una técnica que consiste en utilizar una retroalimentación táctil usando los sensores montados en las plantas de los pies del robot. El robot está controlado para mantener igual los tres valores de detección cuando el pie está apoyado. Cuando estos valores son similares, el CM también está en el centro del área de soporte. En otras palabras, esta técnica se puede emplear en el control del robot para mantener el CM constante en el centro del área de soporte en las fases de único y doble apoyo. El control de equilibrio es independiente del control de movimiento del robot; por lo tanto, solo se considera el control de movimiento para lograr la caminata cuando el control de balance está activo.

Kajita et ál. (2010) proponen la estabilización de la marcha para un robot con un mecanismo convencional en los pies. El controlador, como se

muestra en la figura 13, se compone de tres capas: la de control de servo, la de control de fuerza y postura —que se encarga de la geometría del robot para controlar la postura corporal, los torques y las fuerzas de los pies—, y por último se encuentra la capa de control de PMC y CM del robot.

Van Heerden y Kawamura (2010) analizan las perturbaciones externas y la generación de trayectorias dinámicas en un robot bípedo. En el análisis se presenta un método para limitar las fuerzas de reacción del suelo. El método propuesto requiere como entradas la referencia de posición, los estados de las articulaciones y el dato del sensor de fuerza, como se observa en la figura 14. El control de posición basado en la observación del disturbio se utiliza para generar pares en el motor, los cuales robustamente harán que los ángulos de las articulaciones converjan a los valores de referencia. Para el control de fuerza, utilizan una perturbación del espacio de trabajo, a fin de observar y anular los efectos de las dinámicas de fricción, fuerzas externas, etc.

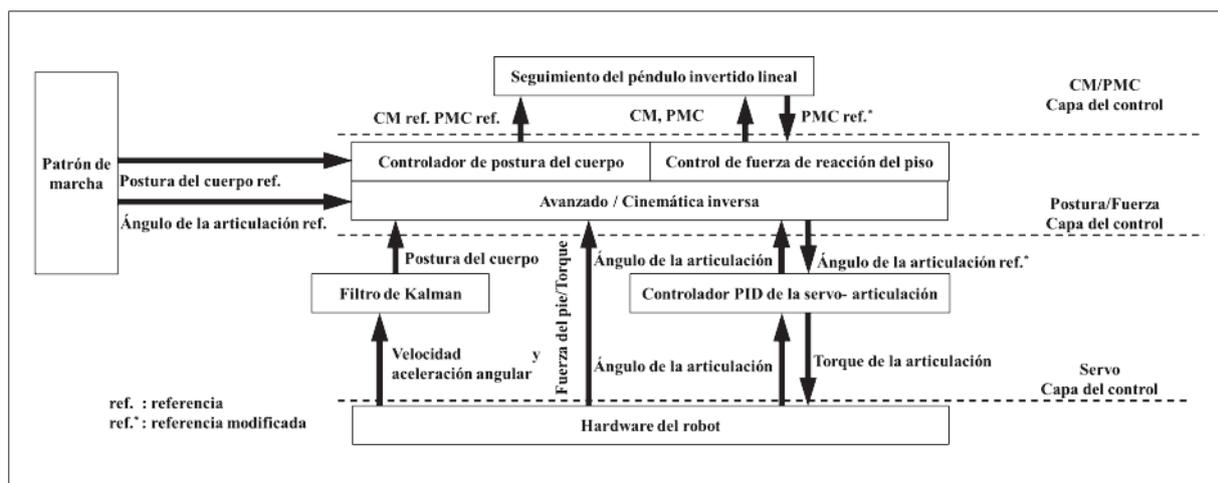


Figura 13. Estructura de control jerárquico

Fuente: Kajita et ál. (2010).

Los péndulos invertidos han sido la base para la realización de la caminata bípeda, como se encuentra en la investigación de Aoyama, Sekiyama, Hasegawa y Fukuda (2010), donde los autores exponen la técnica de control autónomo dinámico pasivo utilizando un bípedo 3D, caminado sobre un terreno irregular. A este efecto realizan el modelado como un péndulo invertido 3D, equivalente a un sistema autónomo 2D mediante la aplicación del control autónomo de dinámica pasiva, basado en el punto de contacto de la base del robot y la restricción holonómica

virtual como a las articulaciones del robot. Los autores afirman que el método del control autónomo dinámico pasivo tiene problemas en dividir la dinámica 3D cuando la dinámica de cada plano está fuertemente acoplada. Para resolver este problema se ha ampliado el enfoque del control autónomo dinámico pasivo sin dividir la dinámica 3D y, además, como se observa en la figura 15, se propone un método de estabilización y control de dirección de marcha para el robot Gorilla Robot II en un terreno irregular.

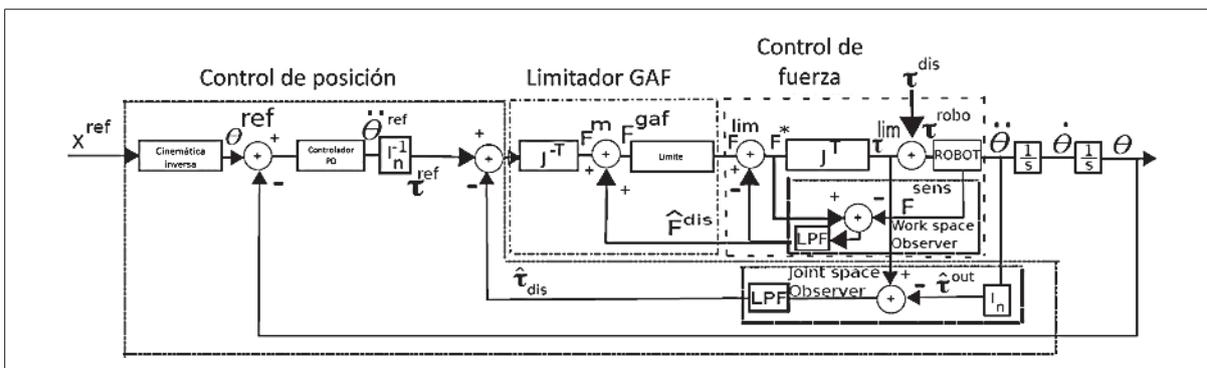


Figura 14. Control de posición con restricciones de fuerza

Fuente: Van Heerden y Kawamura (2010).

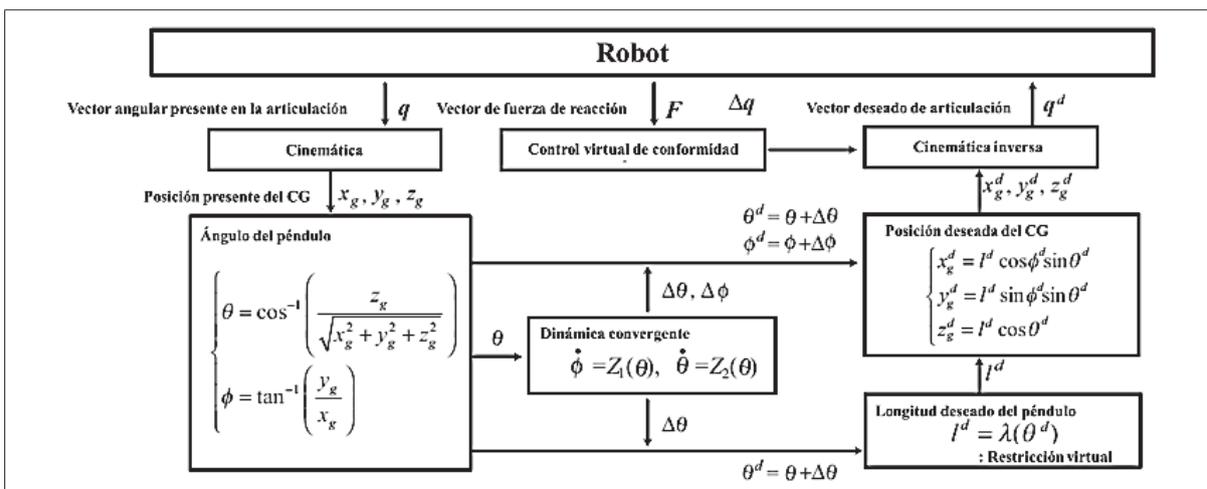


Figura 15. Arquitectura de control para el robot Gorilla

Fuente: Aoyama et ál. (2010).

Yazdekhosti, Sheikholeslam y Ghayour (2010) proponen una ley de control invariante en el tiempo, donde se analiza una estrategia de control para regular la posición del PMC y las articulaciones del robot.

Benjamín y Atkeson (2010) presentan un método basado en modelos llamado control de fuerza para balance (equilibrio) dinámico, para la determinación de torques de todo el cuerpo basado en el CM deseado y las fuerzas de contacto para robots humanoides. La dinámica del CM se ve afectada directamente por el control de la fuerza de contacto para lograr un equilibrio estable. Esta idea se utiliza a fin de formular el control de fuerza para balance (equilibrio) dinámico, teniendo en cuenta toda la dinámica del robot para producir fuerzas de contacto deseadas.

Lim, Oh y Kim (2012) abordan el control del PMC mediante un control de balance. Para realizar el control de equilibrio se necesita la señal de posición del PMC solo como entrada, y a la salida se muestra un ángulo de compensación para las articulaciones afectadas. El rendimiento del sistema de control propuesto se simula y se comprueba en el robot humanoide MHR-1.

Ge, Li y Yang (2012) presentan una técnica de control adaptativo, usando funciones implícitas con soporte de vectores de regresión, en presencia de incertidumbres paramétricas y dinámicas funcio-

nales. Con base en la síntesis de Lyapunov, desarrollan un control adaptativo desacoplado.

Hamed y Grizzle (2013) utilizan un control híbrido; de acuerdo con la simetría derecha-izquierda, se desarrollan desigualdades matriciales lineales y control óptimo robusto. En el primer nivel del controlador híbrido, el bucle de tiempo continuo emplea una clase general de las leyes de retroalimentación invariantes en el tiempo y no lineales para interactuar con el robot bípedo. Las leyes de retroalimentación en tiempo continuo son continuamente diferenciables y definidas por partes.

Las funciones de control de Lyapunov las utilizan Ames, Galloway y Grizzle (2012). Estos autores muestran cómo dichas funciones se pueden utilizar para estabilizar las órbitas periódicas de la dinámica híbrida cero de manera exponencial. Ames y Galloway (2013) también hacen uso de estas funciones. Presentan un método para la ampliación de la clase de controladores que estabilizan exponencialmente órbitas periódicas en sistemas híbridos. A partir de la dinámica cero, se presenta un enfoque del control a partir de las mencionadas funciones, que es exponencialmente estable. Esta técnica de control es probada en el robot Rabbit y en Mabel.

En la tabla 1 se encuentra información técnica sobre los documentos revisados en este estado de arte.

Tabla 1. Tabla de información sobre algunas especificaciones técnicas

Ref.	Pies		Tam. (m)	Super.	Tipo		Indicador de medida	Estrategia de control	Actuador	GDL*
	Sí	No			Sím	Real				
(Corpuz, Lafoteza, Broas, y Ramos, 2009)			0,74	Plano			Acelerómetro, giróscopo	Control de posición	Motor DC	7
(Xin y Xiao, 2009)			-----	-----			-----	Control de posición	-----	5
(Ono, Sato y Ohnishi, 2011)			1,12	Plano			Sensor de fuerza, acelerómetro	Control PD, Control de balance	-----	10

Ref.	Pies		Tam. (m)	Super.	Tipo		Indicador de medida	Estrategia de control	Actuador	GDL*
	Sí	No			Sim	Real				
(Kim et ál., 2012)			1,55	Plano			Sensor de fuerza/torque	Control de par	Motor DC sin escobillas	6
(Roa y Ott, 2013)			1,433	Plano inclinado			Sensor de fuerza/torque	Control de balance	Motor DC-elástico	6
(Zheng y Shen, 1990)				Plano inclinado			Sensor de posición, sensor de fuerza	Esquema de control	Motor DC	8
(Kajita, Yamaura y Kobayashi, 1992)			0,37	Plano			Potenciómetro	PD	Motor DC	4
(Kajita y Tani, 1996)			0,45	Plano			Potenciómetros, Encoder de pulso	Realimentación local, robot con piernas ligeras	Motor DC	6
(C. Shih, 1996)			0,8	Plano			-----	Jerárquico	Servomotor DC	7
(Goswami, 1999)			-----	Plano			-----	Control del FRI	-----	-----
(Lim, Setiawan, y Takanishi, 2001)			1,88	Plano			Sensor de fuerza/torque	Híbrido posición/fuerza, impedancia	Motor lineal	43
(Pratt, Chew, Torres, Dilworth y Pratt, 2001)			ST: 0,6 SF: 0,9	Plano inclinado			Potenciómetros lineales	Modelo virtual	Motor DC, motor DC-elástico	4 6
(Rehbinder y Hu, 2001)			-----	Plano inclinado			-----	Arquitectura de conmutación	-----	-----
(Grizzle, 2002)			1,43	Plano			Encoder absoluto e incremental	Feedback	Motor DC	7
(Chevallereau et ál., 2003)			1,43	Plano			Encoder absoluto e incremental	Limitaciones virtuales, dinámica híbrida cero	Motor DC	7
(Canudas-de-Wit, 2004)			1,43	Plano			Encoder absoluto e incremental	Limitaciones virtuales	Motor DC	7
(García, 2007)			0,3	Plano			Sensor de presión, acelerómetros	Control de secuencia, control de par	Servomotor DC	2
(Kwon et ál., 2007)			1,5	Plano			Sensor de fuerza/torque, Giróscopo, micrófono, cámara	Control de impedancia	Motor DC	35
(Lin, Chen y Chen, 2007)			-----	Plano			-----	Control híbrido	-----	6
(C. L. Shih, Grizzle y Chevallereau, 2007)			-----	Plano			-----	Control <i>feedback</i> , Control basado en eventos	-----	6
(Honda Motor Co. Ltd, 2007)			1,2	Plano			Giróscopo, sensor de fuerza, cámara, antena, acelerómetro	Control de predicción de movimiento	Servomotor DC, reductor de velocidad	12
(Anybots, 2007)			-----	Plano			-----	Control del CM	-----	-----

Ref.	Pies		Tam. (m)	Super.	Tipo		Indicador de medida	Estrategia de control	Actuador	GDL*
	Sí	No			Sim	Real				
(Jessy W. Grizzle, 2008)			2,25	Plano, escalera			Sensor de contacto, sensor de ángulo	Control híbrido cero	Motor DC sin escobillas	7
(Matt, Shane, Allison y Philip, 2010)			2,25	Plano, escalera			Sensor de contacto, sensor de ángulo	Control híbrido cero	Motor DC sin escobillas	7
(Aclan y Ramos, 2009)			1,31	Plano			Potenciómetro de precisión, giróscopo, acelerómetro	Control multivariable PID	Motor DC	6
(Matsumoto y Kawamura, 2010)			1,22	Plano			Giróscopo, acelerómetro, sensor de fuerza/torque	Control de dirección robusto	Servomotor DC	13
(Ferreira, Crisóstomo y Coimbra, 2010)			0,5	Escaleras, plano, inclinado			Sensor de fuerza	Control de inteligencia artificial	Servomotor DC	6
(Parsa y Farrokhi, 2010)			1,32	Plano			-----	Modelo de control predictivo no lineal	-----	5
(Aghabalaie, Hosseinzadeh, Talebi y Shafiee, 2010)			1,12	Plano			-----	Control robusto no lineal	-----	5
(G. Li et ál., 2010)			0,27	Plano			Sensor de fuerza	Control de estabilidad	Servomotor DC	7
(Rokbani, Benbousaada, Ammar y Alimi, 2010)			-----	-----			Sensor infrarrojo, micrófono	Control de CM	Servomotor DC	7
(Suwanratchatamane, Matsumoto y Hashimoto, 2010)			0,34	Plano, inclinado			Sensor táctil	Control distribuido	Servomotor DC	17
(Shuuji Kajita et ál., 2010)			1,58	Plano, inclinado			Sensor de fuerza, giróscopo, acelerómetro, sensor de posición, Encoder incremental	Control de postura/fuerza, PID	Servomotor DC	42
(Chevallereau, Grizzle y Shih, 2009)			1,43	Plano			Encoder absoluto e incremental	Control de realimentación invariante en el tiempo	Motor DC	7
(Van Heerden y Kawamura, 2010)			1,216	Plano			Sensor de fuerza, giróscopo, Acelerómetro	Control basado en la observación del disturbio	Servomotor DC	6
(Aoyama, Sekiyama, Hasegawa y Fukuda, 2010)			0,905	Plano			Sensor de fuerza, giróscopo, Encoder	Control autónomo dinámico pasivo	Servomotor AC	10
(Yazdekhasti, Sheikholeslam y Ghayour, 2010)			1,685	-----			-----	Control de PMC	-----	7
(Li, Su y Liu, 2012)			0,22	Plano			Sensor de fuerza/torque, acelerómetro	Control de fuerza de balance dinámico	Hidráulico	33

Ref.	Pies		Tam. (m)	Super.	Tipo		Indicador de medida	Estrategia de control	Actuador	GDL*
	Sí	No			Sim	Real				
(S. Lim, Oh y Kim, 2012)			1,45	Plano			Sensor de fuerza, giróscopo, sensor infrarrojo	Control de posición del PMC	Servomotor DC	24
(Ge, Li y Yang, 2012)			1,1228	Plano			-----	Control adaptativo predictivo	-----	7
(Hamed y Grizzle, 2013)			-----	Plano			Encoder absoluto e incremental	Control híbrido (control óptimo)	Motor-elástico	13
(Ames, Galloway y Grizzle, 2012)			-----	Plano			-----	Control de función de Lyapunov	-----	-----
(Ames y Galloway, 2013)			R: 2,25 M: 2,25	Plano, escalera			Sensor de contacto, sensor de ángulo	Control de función de Lyapunov	Motor DC sin escobillas	7

* GDL: Grados de libertad

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

El estado actual de las investigaciones en robots bípedos muestra que la locomoción bípeda estable no está totalmente resuelta y que en el mercado no hay un gran número de robots con tamaño de un humano, debido a que el problema de locomoción bípeda aumenta con la altura y el peso del robot.

Obtener una marcha correcta y rápida en un robot bípedo implica transformar en cada instante la posición de cada pie en una posición de articulación, es decir, generar trayectorias de marcha en espacio y tiempo. Para ello se necesita hacer el cálculo de las cinemáticas directa e inversa del modelo diseñado, lo cual requiere un cálculo computacional.

Como un índice de desempeño en la estabilidad de un robot bípedo, el PMC es el criterio más utilizado e implementado en esta área. Todas estas técnicas de control para el equilibrio y la variedad

de metodologías para la obtención de una marcha natural, fácilmente se pueden aplicar a sistemas de exoesqueletos para lograr la rehabilitación de la marcha y el equilibrio en humanos.

Finalmente, con la clasificación obtenida para estrategias de control aplicadas a los robots bípedos, se logró evidenciar que el control de equilibrio dinámico y la generación de patrones de marcha son temas de interés para estudios posteriores, porque el objetivo general para la robótica bípeda es obtener movimientos suaves y naturales como el ser humano interactuando en diferentes ambientes.

FINANCIAMIENTO

Esta investigación forma parte del proyecto *Marcha asistida con un exoesqueleto*, de la Universidad del Valle y Colciencias.

REFERENCIAS

- Abdallah, M. y Goswami, A. (2005). A Biomechanically Motivated Two-Phase Strategy for Biped Upright Balance Control. En *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (vol. 2, pp. 1996-2001). IEEE. doi:10.1109/ROBOT.2005.1570406.
- Aclan, M. C. y Ramos, M. C. (2009). Bipedal Robot Locomotion Using Multivariable Control. En *TENCON 2009-2009 IEEE Region 10 Conference* (pp. 1-6). IEEE. doi:10.1109/TENCON.2009.5396036.
- Aghabalaie, P., Hosseinzadeh, M., Talebi, H. A. y Shafiee, M. (2010). Nonlinear Robust Control of a Biped Robot. En *2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics* (pp. 1907-1912). IEEE. doi:10.1109/ISIE.2010.5637535.
- Ames, A. D., Galloway, K. y Grizzle, J. W. (2012). Control Lyapunov Functions and Hybrid Zero Dynamics. *2012 IEEE 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC)* (pp. 6837-6842). doi:10.1109/CDC.2012.6426229.
- Ames, A. y Galloway, K. (2013). Rapidly Exponentially Stabilizing Control Lyapunov Functions and Hybrid Zero Dynamics. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 59 (4), 1-15.
- Anybots, I. (2007). *Anybots*. Recuperado el 10 de agosto del 2011, de <https://www.anybots.com>
- Aoyama, T., Sekiyama, K., Hasegawa, Y. y Fukuda, T. (2010). 3-D Biped Walking over Rough Terrain Based on the Assumption of Point-Contact. En *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (pp. 3163-3168). IEEE. doi:10.1109/IROS.2010.5650891
- Canudas-de-Wit, C. (2004). On the Concept of Virtual Constraints as a Tool for Walking Robot Control and Balancing. *Annual Reviews in Control*, 28 (2), 157-166. doi:10.1016/j.arcontrol.2004.03.002.
- Chevallereau, C., Abba, G., Aoustin, Y., Plestan, F., Westervelt, E. R., Canudas-de-Wit, C. y Grizzle, J. W. (2003). RABBIT: A Testbed for Advanced Control Theory. *IEEE Control Systems Magazine*, 23 (5), 57-79. doi:10.1109/MCS.2003.1234651.
- Chevallereau, C., Grizzle, J. W. y Shih, C. L. (2009). Asymptotically Stable Walking of a Five-Link Underactuated 3-D Bipedal Robot. *IEEE Transactions on Robotics*, 25 (1), 37-50. doi:10.1109/TRO.2008.2010366.
- Corpuz, F. J. O., Lafoteza, B. C. Y., Broas, R. A. L. y Ramos, M. (2009). Design and Implementation of a Closed-Loop Static Balance System for the YICAL Leg 2 Biped. En *TENCON 2009-2009 IEEE Region 10 Conference* (pp. 1-6). Singapur: IEEE. doi:10.1109/TENCON.2009.5395815.
- Fernández Iglesias, S. (2009). *Locomoción bípeda del robot humanoide Nao*. Universidad de Cataluña.
- Ferreira, J. P., Crisóstomo, M. M. y Coimbra, A. P. (2010). SVR Sagittal Balance of a Biped Robot Controlling the Torso and Ankle Joint Angles. En *2010 IEEE International Conference on Industrial Engineering and*

- Engineering Management* (pp. 1931-1936). IEEE. doi:10.1109/IEEM.2010.5674629
- García, I. (2007). *Introduction to Dynamic Balance for Humanoid Robots, the Key of Biped Locomotion. Communications* (pp. 1-4). Málaga.
- Ge, S. S., Li, Z. y Yang, H. (2012). Data Driven Adaptive Predictive Control for Holonomic Constrained Under-Actuated Biped Robots. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 20 (3), 787-795. doi:10.1109/TCST.2011.2145378.
- Grizzle, J. W. (2002). *Rabbit Robot Biped*. Recuperado el 1º de septiembre del 2011, de <http://web.eecs.umich.edu/~grizzle/papers/RABBITExperiments.html>.
- Grizzle, J. W. (2008). *Mabel*. Recuperado el 1º de septiembre del 2008, de <http://web.eecs.umich.edu/~grizzle/papers/MABEL.html>.
- Guihard, M. y Gorce, P. (2002). Dynamic Control of Bipedes Using Ankle and Hip Strategies. En *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System* (vol. 3, pp. 2587-2592). IEEE. doi:10.1109/IRDS.2002.1041660.
- Guzmán Valdivia, C. H. (2010). *Construcción de un robot bípedo basado en caminado dinámico*. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.
- Hamed, K. y Grizzle, J. W. (2013). Event-Based Stabilization of Periodic Orbits for Underactuated 3D Bipedal Robots with Left-Right Symmetry. *IEEE Transactions on Robotics, en revisión*, 1-16.
- Honda Motor (2007). *Robot Asimo*. Recuperado de <http://asimo.honda.com/downloads/pdf/asimo-technical-information.pdf>.
- Kajita, S., Morisawa, M., Miura, K., Nakaoka, S., Harada, K., Kaneko, K., Yokoi, K. et ál. (2010). Biped Walking Stabilization Based on Linear Inverted Pendulum Tracking. En *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (pp. 4489-4496). IEEE. doi:10.1109/IROS.2010.5651082
- Kim, J., Kwak, H., Lee, H., Seo, K., Lim, B., Lee, M., Roh, K. et ál. (2012). Balancing Control of a Biped Robot. En *2012 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)* (pp. 2756-2761). IEEE. doi:10.1109/ICSMC.2012.6378165.
- Kwon, W., Kim, H. K., Park, J. K., Roh, C. H., Lee, J., Park, J., Roh, K. et ál. (2007). Biped Humanoid Robot Mahru III. En *2007 7th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots* (pp. 583-588). IEEE. doi:10.1109/ICHR.2007.4813930.
- Li, G., Huang, Q., Xu, Q., Li, G., Li, J. y Li, M. (2010). Design of a Small Biped Mechanism with 7 DOFs Legs and Double Spherical Hip Joint. En *2010 8th World Congress on Intelligent Control and Automation* (pp. 264-269). IEEE. doi:10.1109/WCICA.2010.5554999.
- Li, T., Su, Y. y Liu, S.-H. (2012). Dynamic Balance Control for Biped Robot Walking Using Sensor Fusion, Kalman Filter, and Fuzzy Logic. *IEEE Transactions on Robotics*, 59 (11), 4394-4408. doi:10.1109/TIE.2011.2175671.
- Li, Z. y Ge, S. S. (2012). Adaptive Robust Controls of Biped Robots. *IET Control Theory Applications*, 7 (2), 161-175. doi:10.1049/iet-cta.2012.0066.
- Lim, H., Setiawan, S. A. y Takanishi, A. (2001). Balance and Impedance Control for Biped

- Humanoid Robot Locomotion. En *Proceedings 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Expanding the Societal Role of Robotics in the Next Millennium (Cat. No.01CH37180)* (vol. 1, pp. 494-499). IEEE. doi:10.1109/IROS.2001.973405.
- Lim, S., Oh, S. N. y Kim, K. I. (2012). Balance Control for Biped Walking Robots Using Only Zero-Moment-Point Position Signal. *Electronics Letters*, 48 (1), 19. doi:10.1049/el.2011.3091.
- Lin, C. M., Chen, L. Y. y Chen, C. H. (2007). RC-MAC hybrid control for MIMO Uncertain Nonlinear Systems Using Sliding-Mode Technology. *IEEE Transactions on Neural Network*, 18 (3), 708-20. doi:10.1109/TNN.2007.891198.
- Liu, G., Li, M., Guo, W. y Cai, H. (2012). Control of a Biped Walking with Dynamic Balance. *2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation* (pp. 261-267). doi:10.1109/ICMA.2012.6282852.
- Matsumoto, K. y Kawamura, A. (2010). The Direction Control of a Biped Robot Using Gyro Sensor Feedback. En *2010 11th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control (AMC)* (pp. 137-142). IEEE. doi:10.1109/AMC.2010.5464012.
- Matt, R., Shane, B., Allison, L. y Philip, V. (2010). *MABEL Robotic Foot Design Final Report ME 450 Fall 2010*.
- Ono, H., Sato, T. y Ohnishi, K. (2011). Balance Recovery of Ankle Strategy: Using Knee Joint for Biped Robot. *Access Spaces, 1*, 236-241. doi:10.1109/ISAS.2011.5960955.
- Pardos Gotor, J. M. (2005). *Algoritmos de geometría diferencial para la locomoción y navegación bípedas de robots humanoides aplicación al robot RH0 director*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.
- Parsa, M. y Farrokhi, M. (2010). Robust Nonlinear Model Predictive Trajectory Free Control of Biped Robots Based on Nonlinear Disturbance Observer. En *2010 18th Iranian Conference on Electrical Engineering* (pp. 617-622). IEEE. doi:10.1109/IRANIANCEE.2010.5506996.
- Pratt, J. E., Chew, C. M., Torres, A., Dilworth, P. y Pratt, G. (2001). Virtual Model Control: An Intuitive Approach for Bipedal Locomotion. *The International Journal of Robotics Research*, 20 (2), 129-143. doi:10.1177/02783640122067309.
- Rehbinder, H. y Hu, X. (2001). Drift-Free Attitude Estimation for Accelerated Rigid Bodies. En *Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.01CH37164)* (vol. 4, pp. 4244-4249). IEEE. doi:10.1109/ROBOT.2001.933281
- Roa, M. y Ott, C. (2013). Balance and Posture Control for Biped Robots. En *Multibody System Dynamics, Robotics and Control* (pp. 129-143). doi:10.1007/978-3-7091-1289-2_8.
- Rokbani, N., Benbousaada, E., Ammar, B. y Alimi, A. M. (2010). Biped Robot Control Using Particle Swarm Optimization. En *2010 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics* (pp. 506-512). IEEE. doi:10.1109/ICSMC.2010.5642027
- Santana Hernández, J. L. (2006). *Control del equilibrio en el proceso de caminado de un robot bípedo*. Universidad de Guadalajara.

- Sheng-jun, P., Hai-tao, S., Tao, S. y Hong-xu, M. (2009). A novel Stability Criterion for Underactuated Biped Robot. En *2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)* (pp. 1912-1917). IEEE. doi:10.1109/ROBIO.2009.5420550.
- Shih, C. L., Grizzle, J. W. y Chevallereau, C. (2007). Asymptotically Stable Walking of a Simple Underactuated 3D Bipedal Robot. *IECON 2007-33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (vol. 1, pp. 2766-2771). doi:10.1109/IECON.2007.4460177.
- Stephens, B. J. y Atkeson, C. G. (2010). Dynamic Balance Force Control for Compliant Humanoid Robots. En *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (pp. 1248-1255). IEEE. doi:10.1109/IROS.2010.5648837.
- Suwanratchatamane, K., Matsumoto, M. y Hashimoto, S. (2010). Walking on the Slopes with Tactile Sensing System for Humanoid Robot. En *Control Automation and Systems (ICCAS), 2010 International Conference on* (pp. 350-355). IEEE.
- Van Heerden, K. y Kawamura, A. (2010). An Investigation on Robust Biped Walking Using Compliant Force Control and a Online Walking Pattern Generator. En *IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 1453-1458). IEEE. doi:10.1109/IECON.2010.5675470.
- Xin, R. y Xiao, N. (2009). A Novel Compound Biped Locomotion Algorithm for Humanoid Robots to Realize Biped Walking. *Journal of Control Theory and Applications*, 7 (1), 23-28. doi:10.1007/s11768-009-7153-z
- Yazdekhasi, S., Sheikholeslam, F. y Ghayour, M. (2010). Stability Analysis of Biped Robot with Direct Control of Zero Moment Point. En *Computer and Automation Engineering ICCAE 2010 The 2nd International Conference* (pp. 528-532). IEEE. doi:10.1109/ICCAE.2010.5451643.
- Yeoun-Jae, K., Joon-Yong, L. y Ju-Jang, L. (2012). A Balance Control Strategy of a Walking Biped Robot in an Externally Applied Force. *Information and Automation*, 572-577.
- Zermeño Sobrino, P. M. (2006). Elementos con rotación atrás. En *Manual para el entrenador de gimnasia de trampolín Nivel 2* (pp. 25-39). México: Dirección de la Escuela Nacional de Entrenadores Deportivos.

Compuestos orgánicos persistentes en Colombia: cuantificación y diagnóstico para pesticidas organoclorados

Persistent organic pollutants in Colombia: quantification and diagnosis for organochlorine pesticides

CÉSAR AUGUSTO GARCÍA UBAQUE

Ingeniero civil, magíster en Ingeniería Ambiental, Ph.D. en Ingeniería, profesor asociado de la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D. C., Colombia. Contacto: cagarciau@udistrital.edu.co

JUAN CARLOS GARCÍA UBAQUE

Médico, magíster en Salud Pública, Ph.D. en Salud Pública, profesor titular de la Facultad de Medicina de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D. C., Colombia. Contacto: jcgarciau@unal.edu.co

MARTHA LUCÍA VACA BOHÓRQUEZ

Psicóloga, especialista en Salud Ocupacional, especialista en Derecho Ambiental, magíster en *Business Administration*, consultora independiente, Bogotá D.C., Colombia. Contacto: ml.vaca@uniandes.edu.co

Fecha de recepción: 5 de febrero del 2014

Clasificación del artículo: estudio de caso

Fecha de aceptación: 15 de agosto del 2014

Financiamiento: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)

DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.1.a011>

Palabras clave: compuestos orgánicos persistentes, plaguicidas, ecotoxicidad, inventarios.

Keywords: pesticides, persistent organic pollutants, ecotoxicity, inventories.

RESUMEN

Como parte del cumplimiento de los compromisos de Colombia con el Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP), el país llevó a cabo la identificación y cuantificación de existencias de plaguicidas organoclorados, con el fin de actualizar y consolidar la información sobre sitios de almacenamiento y suelos contaminados. Se utilizó la metodolo-

gía propuesta por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), que cubrió las siguientes etapas: a) consulta de información secundaria disponible en inventarios anteriores; b) revisión de las actividades relacionadas con las etapas del ciclo de vida de estos productos; c) ubicación de bodegas y sitios de destrucción o enterramiento; y d) visita a una muestra de los lugares identificados. Se encontró que el país tiene 159 812 kg de existencias de DDT almacenado y

estudio de caso |

se estimó que existen 88 629 m³ de suelo contaminado por plaguicidas COP. Se pudo identificar un amplio subregistro de las cantidades de pesticidas utilizadas y de sitios contaminados, no solo en el país, sino también en inventarios de otros países de la región, lo que refleja que los resultados reportados son parciales y pueden presentarse focos de contaminación no identificados. Es importante que ante esta situación se intensifiquen actividades de investigación e innovación para el tratamiento de estos residuos y tierras contaminadas, pero también en las áreas de producción agrícola y protección de cultivos.

ABSTRACT

To meet Colombia commitments with Stockholm Convention on persistent organic pollutants (POPs), the country carried out identification and quantification of organochlorine pesticide stocks,

* * *

INTRODUCCIÓN

La problemática relacionada con el uso de pesticidas tiene una doble cara. Por un lado, su uso permite mayores rendimientos en el cultivo de alimentos y, consecuentemente, mejora las condiciones de abastecimiento tanto en el ámbito local como en el regional. Según Falconer y Hodge (2000), la producción mundial de alimentos disminuiría aproximadamente un 30% sin el uso de estas sustancias. Sin embargo, es innegable que su sobreutilización ha ocasionado graves daños al ambiente y a la salud de las personas. Es importante plantear un balance entre la protección del medio ambiente y la reducción del uso de pesticidas con la necesidad de optimizar la producción agrícola.

Es importante tener en cuenta que en la región andina Colombia es uno de los países con mayor consumo de pesticidas (García-Santos, Scheibeny

in order to update and consolidate information on storage sites and contaminated soils. Methodology proposed by the United Nations program for development (UNDP) was used and covered the following stages: (a) consultation of secondary information available in previous inventories, (b) review activities related to these products life cycle, (c) location of warehouses and sites of destruction or burial and (d) visit a sample of identified sites. Colombia has 159 812 kg of DDT in stock and it was estimated 88 629 m³ of contaminated soil by POPs pesticides. It were unable to identify a vast underreporting quantities of pesticides used and contaminated sites, not only in the country, but in inventories in other countries of the region; reflecting that the reported results are partial and contamination from unidentified sources may occur. It is important to intensify activities of research and innovation not only for wastes and contaminated soils treatment, but for agricultural production and crop protection.

Binder, 2011), principalmente en cultivos de algodón (45%), maíz, arroz y papa (estos tres con el 45% de participación) (Machado, 1998). Como respuesta al incremento de la demanda, en la década de los años setenta, el país comenzó a producir toxafeno, aldrin y DDT. Hacia la década de los noventa, esta actividad fue totalmente suspendida, para cumplir con normas de la legislación nacional e internacional.

Como parte de los compromisos adquiridos por el país con la firma del Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP), se llevó a cabo la identificación y cuantificación de existencias de plaguicidas organoclorados. El alcance de este inventario fue actualizar y consolidar la información relacionada con las existencias en el país de nueve plaguicidas COP: aldrin, dieldrin, endrin, clordano, heptacloro, hexaclorobenceno, mirex, toxafeno y DDT (Ministerio

de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007). Los objetivos específicos fueron: a) consolidar el inventario nacional de plaguicidas COP, mediante la revisión, la evaluación y la complementación de información secundaria disponible; b) recopilar y evaluar datos de producción, uso, importación y exportación de plaguicidas COP; y c) consolidar la información nacional sobre existencias, enterramientos y posibles sitios contaminados con estas sustancias.

METODOLOGÍA

La metodología utilizada para este inventario siguió los lineamientos planteados por el PNUD para la aplicación el Convenio de Estocolmo (PNUD, 2005). Una primera etapa consistió en consultar inventarios previos de plaguicidas obsoletos. Luego se recopiló y analizó la información secundaria relacionada con importaciones de plaguicidas COP y las actividades relacionadas con las diferentes

etapas del ciclo de vida de estos productos. Además, se ubicaron bodegas y sitios de destrucción de plaguicidas en el país que generaron material de empaque contaminado o productos obsoletos por devoluciones; asimismo, se ubicaron instalaciones asociadas con el uso de plaguicidas COP como: pistas de fumigación, almacenes agrícolas y granjas de experimentación. Finalmente, se realizaron visitas a una muestra de estos sitios, correspondientes a los siguientes grupos: a) empresas estatales, b) agremiaciones y asociaciones y c) pistas de fumigación y empresas de agroquímicos.

RESULTADOS

Las tablas 1 a 5 muestran los resultados obtenidos en el inventario.

En la tabla 4 se presenta el total de existencias de plaguicidas COP almacenados y de suelo contaminado en el país.

Tabla 1. Material de residuos contaminados

Material	Cantidad	Observaciones
Canecas plásticas de tapa ancha de 200 litros	8	Canecas sobre estibas de madera, en regular estado, mal tapadas, algunas con aros reventados. Contaminadas con residuos de methilparathion y toxafeno, mezcladas con agua lluvia.
Canecas metálicas de 200 litros	66	Oxidadas y con la cubierta superior corroída y rota, ingreso de agua lluvia.
Cartón	1 m ²	Apilamiento de cartón contaminado a la intemperie.
Contenedores tipo <i>big-bag</i> de polipropileno. Capacidad: 1 m ³	60	Contienen bolsas plásticas y de papel, madera y retal de tambores metálicos. Todos los materiales contaminados y a medio quemar. Están a la intemperie.
Contenedores tipo <i>big-bag</i> de polipropileno. Capacidad: 1 m ³	ND	Bolsas rotas que contienen bolsas plásticas y de papel, madera y retal de tambores metálicos. Todos contaminados y a medio quemar, a la intemperie, invadidas por maleza.
Materiales varios como: guantes, manguera, cascos	ND	Guantes quemados, cascos, pedazos de bolsas y canecas plásticas negras semidestruidas.
Bodegas y construcciones con pisos en cemento y colectores perimetrales de agua lluvia, con agua	ND	Construcciones semidestruidas, sin techo o con techos destruidos, con paredes y pisos contaminados. Se observan grietas en algunos sectores y partes externas con hundimientos.

Fuente: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2007).

Tabla 2. Existencias almacenadas de plaguicidas

Producto	Cantidad	Unidades	Ubicación
DDT	21 920	kg	Bogotá, Cundinamarca
DDT	1890	kg	Cartagena, Bolívar
DDT	135 402	kg	Mariquita, Tolima
DDT	600	kg	Puerto Inírida, Guainía
Total	159 812	kg	

Fuente: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2007).

Tabla 3. Estimativo de suelo contaminado con plaguicidas COP

Elemento	Tipo de producto	Cantidad	Sitios identificados	Cantidad estimada de suelo contaminado (m ³)
Plaguicidas COP almacenados	DDT	159 812 kg	4	5
Plaguicidas COP enterrados	Varios	Desconocida	7	88 160
Suelo contaminado por plaguicidas COP	Varios	Desconocida	12	464
Plaguicidas obsoletos almacenados	Varios	40 440 kg · L	29	ND
Plaguicidas obsoletos enterrados	Varios	Desconocida	5	ND
Total				88 629

Fuente: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2007).

Tabla 4. Total de plaguicidas COP almacenados y suelo contaminado

Producto: DDT	159 812 kg
Estimación de suelo contaminado	88 629 m ³

Fuente: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2007).

No se pudieron identificar existencias significativas de otros plaguicidas diferentes a DDT, por lo cual solo se presentan los registros y las evidencias de esta sustancia.

Con el fin de comparar estos resultados con los de otros países de la región, se recopiló la infor-

mación sobre existencias de DDT reportada por inventarios realizados por otros países como Chile (Conama, 2005), Ecuador (Ministerio del Ambiente, 2004), Perú (Conam, 2006) y Venezuela (Ministerio del Ambiente, 2006). En la figura 1 se puede apreciar la comparación de estos resultados con los datos reportados por Colombia.

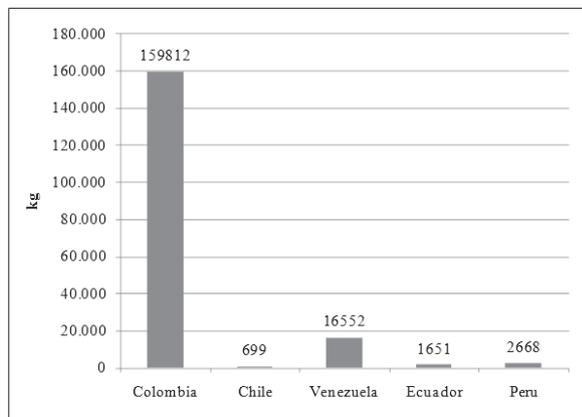


Figura 1. Existencias de DDT reportadas por países de la región

Fuente: elaboración propia.

DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados obtenidos en el inventario y su comparación con los registros presentados por los países vecinos, Colombia es de lejos el país que reporta mayores existencias de DDT en la región, lo cual es coherente con lo planteado por García-Santos, Scheiben y Binder (2011) sobre el mayor consumo de plaguicidas de nuestro país con respecto a los consumos en Suramérica. Sin embargo, estas diferencias también pueden deberse a subregistros en estos países y a que aun cuando existe una metodología propuesta por el PNUD, la presentación de los resultados de cada país difiere sustancialmente de acuerdo con la información disponible y la interpretación del equipo que realizó el trabajo.

Con respecto a los resultados encontrados específicamente en Colombia, durante el proceso de recolección de información se encontró que en algunas de las fuentes consultadas, tanto del sector privado como del público, existe desconocimiento sobre el tema y sobre los compromisos de Colombia con relación a los COP y al Convenio de Estocolmo, situación que plantea importantes re-

tos sobre la manera en que el país puede mejorar sus estrategias para la erradicación de existencias de pesticidas COP y sitios contaminados; ya que existe un importante campo de acción para realizar acciones de mejora en términos de educación y entrenamiento.

Como lo plantean Falconer y Hodge (2000), más que instrumentos de mercado o de comando y control, se requiere fomentar la investigación y la innovación en el tema de protección de cultivos que generen soluciones económicamente rentables y que permitan un cambio de actitud tanto en los productores agrícolas como en consultores y tomadores de decisiones en esta área. Asimismo, es fundamental analizar las conductas a pequeña escala o a nivel micro (granjas/cultivos) para evaluar patrones de producción, requerimientos, intensidad, etc., con el fin de proponer políticas agrícolas pertinentes que realmente provean soluciones efectivas a la producción de alimentos de una manera sostenible y priorizar estrategias de educación y entrenamiento. Aunque se puede transferir tecnologías agrícolas exitosas en otras regiones, se deben ajustar a las condiciones locales, lo cual plantea retos de trabajo comunitario interdisciplinario más que de aplicación de recomendaciones de expertos.

Teniendo en cuenta las características de persistencia, poca movilidad y ecotoxicidad de los plaguicidas COP, que además fueron usados de manera intensiva y sobredosificada y eliminados mediante prácticas no adecuadas, el principal problema del país relacionado con estas sustancias es la existencia de suelos contaminados. Colombia debe desarrollar capacidades para remediación por este tipo de sustancias, ya que su mayor experiencia ha sido el manejo de la contaminación por derrame de hidrocarburos (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2008). Algunas alternativas que se han venido estudiando es el uso de microorganismos para reducir las cantidades de pesticidas y rehabilitar los servicios ambientales

estudio de caso |

de estas tierras (Betancur, 2013; Mosquera y Peñuela, 2009), con índices de eficiencia entre 75 y 95%, pero dada la complejidad química de estas sustancias, es necesario intensificar la investigación para hallar soluciones más eficientes (Arbeli, 2009).

Para generar estrategias integrales a esta problemática se requiere la sensibilización y la generación

de ambientes de confianza entre todas las partes involucradas tanto del sector público como del privado, mediante mesas de trabajo que incluyan: empresas, institutos de investigación, entidades del gobierno y otros, para desarrollar acciones conjuntas y coordinadas que permitan la eliminación de existencias y sitios contaminados con pesticidas COP y el desarrollo de nuevas tecnologías de protección de cultivos ambientalmente sostenibles.

REFERENCIAS

- Arbeli, Z. (2009). Biodegradación de compuestos orgánicos persistentes (COP): el caso de los bifenilos policlorados (PCB). *Acta Biológica Colombiana*, 14 (1), 57-88.
- Betancur, B. (2013). *Biorremediación de suelo contaminado con el pesticida 1,1,1-Tricloro-2,2'BIS (p-clorofenil) etano (DDT) mediante protocolos de bioestimulación* (tesis de grado de Maestría en Biotecnología). Universidad Nacional, Sede Medellín.
- Consejo Nacional del Ambiente (Conam) (2006). *Inventario nacional de plaguicidas COP*. Lima: CONAM.
- Comisión Nacional del Medio Ambiente (Conama) (2005). *Plan Nacional de Implementación para la Gestión de los COP's*. Santiago de Chile: Conama.
- Falconer, K. y Hodge, I. (2000). Using Economic Incentives for Pesticide Usage Reductions: Responsiveness to Input Taxation and Agricultural Systems. *Agricultural Systems*, 63 (3), 175-194.
- García-Santos, G., Scheiben, D. y Binder, C. (2011). The Weight Method: A New Screening Method for Estimating Pesticide. *Chemosphere*, 82 (11), 1571-1577.
- Machado, A. (1998). *La industria de agroquímicos y la agricultura colombiana*. Bogotá: Asociación Nacional de Industriales (Andi).
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2007). *Consolidación del inventario de plaguicidas COP*. Bogotá: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2008). *Plan Nacional de Aplicación para Plaguicidas en el Marco del Convenio de Estocolmo*. Recuperado el 22 de noviembre de 2013, de http://www.minambiente.gov.co/documentos/3027_plan_accion_plaguicidas_consulta.pdf
- Ministerio del Ambiente (2004). *Inventario de Plaguicidas COPs en el Ecuador*. Quito: Ministerio del Ambiente.
- Ministerio del Ambiente (2006). *Informe preliminar de inventarios de COPs en la República Bolivariana de Venezuela*. Caracas: Ministerio del Ambiente.
- Mosquera B., R. y Peñuela M., G. (2009). Biodegradación del malatión utilizando microorganismos nativos de suelos agrícolas. *Re-*

vista Colombiana de Ciencias Pecuarias,
22 (2), 189-198.

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (2005). *Guía para el desarrollo de un plan nacional de aplicación del Convenio de Estocolmo, Anexo 2*. Ginebra: PNUD.

INSTRUCCIONES PARA LOS AUTORES

REVISTA *TECNURA* UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS FACULTAD TECNOLÓGICA

CONTENIDO

1. ALCANCE Y POLÍTICA EDITORIAL DE LA REVISTA.
2. TIPOS DE ARTÍCULOS ACEPTADOS.
3. FORMATO DEL ARTÍCULO.
4. ENVÍO DE ARTÍCULOS.
5. PROCEDIMIENTO PARA LA PUBLICACIÓN.
6. ARBITRAJE DE ARTÍCULOS.
7. CONTACTO.

1. ALCANCE Y POLÍTICA EDITORIAL DE LA REVISTA

La revista *Tecnura* es una publicación institucional de la Facultad Tecnológica de la Universidad Francisco José de Caldas, de carácter científico-tecnológico y con periodicidad trimestral, que se publica los meses de enero, abril, julio y octubre. Su primer número apareció en el segundo semestre de 1997 y hasta la fecha ha mantenido su regularidad.

Las áreas temáticas de interés de la revista *Tecnura* están enfocadas 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 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 los 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 en inglés, sin embargo, tendrán preferencia los artículos que muestren conceptos innovadores de gran interés, que traten sobre asuntos relacionados con el objetivo y la cobertura temática de la revista.

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

Tecnura es una revista arbitrada mediante un proceso de revisión entre pares de doble ciego. La periodicidad de la conformación de sus comités científico y editorial está sujeta a la publicación de artículos en revistas indexadas internacionalmente por parte de sus respectivos miembros.

La Universidad Distrital Francisco José de Caldas, sus directivas, el Editor, el Comité Editorial y Científico no son responsables por la opinión ni por los criterios expresados en el contenido de los artículos, estos se publican bajo la exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento del Comité Editorial.

Además de la versión impresa, la revista *Tecnura* tiene también una versión digital disponible en su página web: <http://tecnura.udistrital.edu.co>

2. TIPOS DE ARTÍCULOS ACEPTADOS

De acuerdo con la clasificación del Índice Nacional de Publicaciones Científicas y Tecnológicas (Publindex-Colciencias), la revista *Tecnura* recibe postulaciones de artículos inéditos de los siguientes tipos:

- ▶ *Artículos de investigación científica y tecnológica*: documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos de investigación. La estructura generalmente utilizada contiene cuatro apartes importantes: introducción, metodología, resultados y conclusiones.

- ▶ *Artículos de reflexión*: documento que presenta resultados de investigación desde una perspectiva analítica, interpretativa o crítica del autor, sobre un tema específico y recurriendo a fuentes originales.
- ▶ *Artículo de revisión*: documento resultado de una investigación en el que se analizan, se sistematizan y se 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 el estilo apropiados 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; así mismo, el significado de las siglas debe presentarse la primera vez que estas aparecen en el texto.
- ▶ Los autores son responsables de que su trabajo sea conducido de una manera profesional y ética.

3.2. De la extensión de los documentos

Los artículos no deben tener una extensión de más de 25 páginas en tamaño carta y a doble espacio, con márgenes simétricas de 3 cm. Solo en el caso de los artículos de revisión las 25 páginas no incluyen las referencias bibliográficas.

3.3. Del formato de presentación

Los artículos presentados deben ser trabajos inéditos escritos en español o inglés y deben digitarse en Microsoft Word (2003 en adelante), cumpliendo con las siguientes indicaciones:

- ▶ Letra *Times New Román* de 12 puntos (a excepción de que se requiera lo contrario para algunos apartados).
- ▶ Una columna a doble espacio.
- ▶ Todas las márgenes de 3 cm.
- ▶ Los párrafos se justifican, y no debe haber espacio entre los consecutivos.
- ▶ No incluir saltos de página o finales de sección.
- ▶ Si se desea resaltar palabras o frases del texto, no usar letra negrita sino letra cursiva.

- ▶ Los decimales se deben señalar con coma (,) y no con un punto.
- ▶ Los 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 estar escrito en español y en inglés, separado por un espacio doble, y debe tener un máximo de 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 quedar inmediatamente debajo del nombre del autor.

Resumen

Debe establecer el objetivo y el alcance del trabajo, una descripción clara y concisa de la metodología, los resultados y las conclusiones obtenidas, con un máximo de 250 palabras.

Palabras clave

Debe escogerse entre 3 y 10 palabras clave, escritas en español con letra *Times New Roman*, en negrita y cursiva. Estas deben escribirse en orden alfabético y ser de uso estandarizado, para lo cual se sugiere utilizar bases de datos internacionales según el área del conocimiento. Por ejemplo, en el área de Eléctrica y Electrónica se sugiere utilizar el tesoro de la Unesco, que se puede encontrar en la página web:<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 o World Bank que se pueden encontrar en las siguientes paginas respectivamente:http://www.ieee.org/documents/2009Taxonomy_v101.pdf, <http://multites.net/mtsql/wb/site/default.asp>

Introducción

Debe describir el planteamiento general del trabajo, así como contexto, antecedentes, estado de arte de la temática abordada, objetivos y posible alcance del trabajo.

Metodología

La redacción de este apartado debe permitir a cualquier profesional especializado en el tema replicar la investigación.

Resultados

Explicación e interpretación de los hallazgos. Si es necesario, se puede presentar una discusión breve y enfocada a la interpretación de los resultados.

Conclusiones

Implicación de los resultados y su relación con el objetivo propuesto.

Financiamiento

Mencionar la investigación asociada de la cual se derivó el artículo y la entidad que avaló y financió dicha investigación.

Agradecimientos

Preferiblemente deben ser breves y deben incluir los aportes esenciales para el desarrollo del trabajo.

Ecuaciones

Deben aparecer centradas con respecto al texto principal. Las ecuaciones deben ser referenciadas con números consecutivos (escritos entre paréntesis cerca al margen derecho). Las ecuaciones se citan en el texto principal empleando la palabra ecuación y seguida del número entre paréntesis. Las ecuaciones deben ser elaboradas en un editor de ecuaciones apropiado y compatible con el paquete de software InDesign, por ejemplo, el editor de ecuaciones de Windows.

Tablas

Para la elaboración 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 PNGo 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 ser 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 escribirse en cursiva. En cambio, los símbolos matemáticos y los núme-

ros no deben escribirse en cursiva. Se deben identificar los símbolos inmediatamente después de la ecuación. Se deben utilizar las unidades, dimensiones y símbolos del sistema internacional.

Cuando se empleen siglas o abreviaturas, se debe anotar primero la equivalencia completa, seguida de la sigla o abreviatura correspondiente entre paréntesis y en lo subsecuente se escribe solo la sigla o abreviatura respectiva.

Referencias bibliográficas

Las citas, referencias bibliográficas e infografía se incluyen al final del artículo. Las referencias bibliográficas deben ordenarse alfabéticamente de acuerdo con el primer apellido del primer autor, sin numeración.

Solo deben aparecer las referencias que fueron citadas en el texto principal del trabajo, en las tablas o en las figuras. Es decir, en la lista no deben aparecer otras referencias aunque hayan sido consultadas por los autores para la preparación del trabajo.

El llamado de una referencia bibliográfica se inserta en el texto, en el punto pertinente, mediante el primer apellido del primer autor y el año entre paréntesis, como se muestra a continuación: (Hernández, 2012).

El estilo de citación de referencias adoptado por la revista *Tecnura* es APA sexta edición. A continuación se describen dos ejemplos de las referencias más utilizadas, según el estilo de referencias adoptado por la revista *Tecnura*:

Referencia de un artículo: debe incluir la siguiente información en el orden descrito:

- ▶ Apellido del autor, iniciales del nombre del autor.
- ▶ Año, entre paréntesis
- ▶ Título del artículo.
- ▶ Nombre de la revista en cursiva.
- ▶ Volumen y número.
- ▶ Páginas de referencia del artículo.

Ejemplo:

Weiming H., Tieniu T., Liang W. y Maybank, S. (2004). A Survey on Visual Surveillance of Object Motion and Behaviors. *IEEE Trans. Systems, Man, Cybern.*, 34 (3), 334-352.

Referencia de un libro: debe incluir la siguiente información en el orden descrito:

- ▶ Apellido del autor, iniciales del nombre del autor.
- ▶ Año, entre paréntesis

- ▶ Título de la obra en cursiva.
- ▶ Número de edición, si es diferente a la primera, entre paréntesis.
- ▶ Lugar de publicación, ciudad y país.
- ▶ Nombre de la editorial.

Ejemplo:

Hamilton, J. (1994). *Time Series Analysis*. New Jersey, Estados Unidos: Princeton University Press.

En caso de una referencia tomada de Internet se debe escribir el nombre de la URL del sitio y la fecha de consulta.

4. ENVÍO DE ARTÍCULOS

Los autores deben enviar sus artículos a través de la aplicación para tal fin del Open Journal System, en formato digital, 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. César Augusto García Ubaque, donde incluya:

- ▶ Solicitud expresa de considerar su artículo para publicarlo en la revista *Tecnura*.
- ▶ Título completo del trabajo.
- ▶ Nombres completos de todos los autores del trabajo.
- ▶ Certificación de la originalidad y el carácter inédito del trabajo.
- ▶ Exclusividad de su remisión a la revista *Tecnura*.
- ▶ Confirmación de la autoría con la firma de todos los autores.

Esta carta deberá estar firmada por todos los autores, escanearse y enviarse junto con los demás documentos solicitados.

4.2. Formato de información artículo-autores

El artículo además debe ir acompañado de un formato de información sobre el artículo y sus autores, el cual se puede descargar de la página web de la revista *Tecnura*: <http://tecnura.udistrital.edu.co>, en la sección "Guía de autores". Es importante completar todos los campos

de información solicitados, algunos de ellos tienen comentarios para aclarar mejor lo que se está solicitando. El formato no debe escanearse.

4.3. Artículo

Artículo en formato digital (Word 2003 en adelante) que cumpla con todas las normas de presentación descritas en el capítulo 3: "Formato del artículo", de la presente guía de instrucciones a los autores.

5. PROCEDIMIENTO PARA LA PUBLICACIÓN

El procedimiento que sigue la revista *Tecnura* para la evaluación y posible publicación de los trabajos enviados por los autores, es el siguiente, en orden cronológico:

- i. Envío del artículo acompañado de la carta de presentación y el formato de información por parte de los autores.
- ii. Notificación al autor de correspondencia de la recepción del artículo.
- iii. Verificación del tema del artículo con respecto a las áreas de interés de la revista.
- iv. Verificación de las normas de presentación por parte del monitor de la revista.
- v. Notificación al autor de correspondencia de la evaluación de las normas de presentación.
- vi. Envío de las correcciones realizadas por los autores con respecto a la evaluación de las normas de presentación.
- vii. Envío del artículo a los árbitros seleccionados.
- viii. Notificación del inicio del proceso de arbitraje del artículo.
- ix. Notificación a los autores de la decisión tomada por el Comité Editorial y de las evaluaciones hechas por los árbitros.
- x. Envío de las correcciones realizadas por los autores con respecto a las evaluaciones de los árbitros.
- xi. Estudio de la versión final del artículo y de las evaluaciones de los árbitros por parte del Comité Editorial.
- xii. Envío por parte de los autores de la carta de cesión de derechos al editor de la revista.
- xiii. Envío de la versión con corrección de estilo y diagramada a los autores.

- xiv. Verificación de errores y aprobación final de la versión con corrección de estilo y diagramada por parte de los autores.
- xv. Publicación del artículo en el número correspondiente de la revista *Tecnura*.
- xvi. Notificación a los autores de la publicación del número de interés.
- xvii. Envío de un ejemplar de la revista a cada autor del artículo publicado.

6. PROCESO DE ARBITRAJE DE ARTÍCULOS

Considerando la periodicidad trimestral de la revista, el Comité Editorial realiza cuatro convocatorias anuales para la recepción de artículos, aproximadamente en 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.

7. CONTACTO

Para cualquier solicitud de información adicional puede comunicarse a través del correo electrónico de la revista *Tecnura*: tecnura@udistrital.edu.co, tecnura@gmail.co, o por mensajería con el Ing. Cesar Augusto García Ubaque, Director y Editor de la revista *Tecnura*, a la dirección:

Revista *Tecnura*
Sala de Revistas, Bloque 5, Oficina 305.
Facultad Tecnológica
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Transversal 70 B N. 73 a 35 sur
Teléfono: 571 – 3238400 Extensión: 5003
Celular: 57 - 3153614852
Bogotá D.C., Colombia
Email: tecnura@udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com
Página web: <http://tecnura.udistrital.edu.co>

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

**TECNURA JOURNAL
DISTRICT FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS UNIVERSITY
FACULTY OF TECHNOLOGY**

CONTENT

1. SCOPE AND EDITORIAL POLICY OF THE JOURNAL
2. TYPE OF ACCEPTED ARTICLES
3. ARTICLE FORMAT
4. ARTICLE SUBMISSION
5. PUBLICATION PROCEDURE
6. ARBITRATION OF ARTICLE PROCESS
7. CONTACT

1. SCOPE AND EDITORIAL POLICY OF THE JOURNAL

Tecnura journal is an institutional journal of the Faculty of Technology of Francisco José de Caldas University. It is a scientific-technological publication with quarterly periodicity, which is published in January, April, July and October. The first issue appeared in the second semester of 1997 and the date has maintained regularity.

The areas of interest of Tecnura journal are focused on all engineering fields, as electronics, telecommunications, electricity, systems, industrial, mechanic, civil, environmental, etc. as well as it has room for education and health issues, if they are related with engineering. The journal will only publish research, reflection and revision articles of scientific and technologic research. In consequence, during the initial editorial evaluation, short articles and case reports will be rejected.

Tecnura Journal is published for professors, researchers, students and professionals interested in permanent update of their knowledge and monitoring their scientific-technologic processes in the field of engineering.

Tecnura Journal has as mission to disseminate results of research projects in the areas of engineering, through the publication of original and unpublished articles, conducted by academics and professionals belonging to public or private national or foreign institutions.

Articles submitted to Tecnura journal must be unpublished works written in Spanish or English; nevertheless, but preference will be given to articles that show innovative concepts of great interest, related to the objective and scope of the journal.

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

Tecnura is a journal arbitrated by a revision process among double blind peers. The schedule of the conformation of its scientific and editorial committee is subject to the publication of articles in internationally indexed journals by their members.

Francisco José de Caldas Distrital University, its directors, the editor, the editorial and scientific committee is not responsible for the opinions and the criteria expressed in the content of the articles and they are published under the exclusive responsibility of the authors and do not necessarily reflect the ideas of the editorial committee.

In addition to the printed version, Tecnura journal also has a digital version available in its web page: [//tecnura.udistrital.edu.co](http://tecnura.udistrital.edu.co)

2. TYPE OF ARTICLES ACCEPTED

Tecnura journal, according to the classification of the Scientific and Technological Publications National Index (Publindex-Colciencias) receives nominations of unpublished articles on the following topics:

- ▶ ***Scientific and technologic research articles:*** document that presents, in a detailed manner, the original results of research projects. The structure generally used contains four main parts: introduction, methodology, results and conclusions.
- ▶ ***Reflection articles:*** document that presents research results from an analytic, interpretative of critic perspective from the author, over a specific topic y adopting original sources.
- ▶ ***Review article:*** document that results from a research where are analyzed and integrated the results of published or unpublished research's, on a science or technology

field, to state the advances and tendencies in development. It is characterized by presenting a careful bibliographical check of at least 50 references.

3. ARTICLE FORMAT

3.1. Of the appropriate language and style for writing articles

- ▶ It is necessary that the articles be written for an international audience, avoiding excessive centralization in strictly local or particular experiences.
- ▶ Must use simple sentence structures, avoiding the ones that are too long or complex.
- ▶ The vocabulary used must be basic and common, technic terms must be briefly explained; also, the meaning of the acronyms must be given the first time they appear in the text.
- ▶ The authors are responsible that their work is conducted in a professional and ethic manner.

3.2. Of the length of articles

The articles should not exceed 25 pages in letter size and double space, with symmetric margins of 3 cm. Only in the case of review articles, 25 pages not including references.

3.3. Presentation format

Submitted articles must be unpublished works written in Spanish or English and made in Microsoft Word (2003 and beyond), complying with the following indications:

- ▶ *Times New Roman* letter, 12 point (except otherwise said for some sections).
- ▶ One column double-spaced.
- ▶ All the margins 3 cm.
- ▶ Paragraphs should be justified without spaces between consecutives and without cutting words.
- ▶ Do not include page breaks or section finals.
- ▶ If you want to emphasize words or phrases from the text, do not use bold letters but italic.
- ▶ Decimals should be pointed with point (,) and not with coma (.), and thousands and millions with coma (,).
- ▶ Avoid footnotes.
- ▶ Arabic nomenclature must be used only until the third level.

3.4. Of the structure of the article

The papers must have the following structure and comply with the following requirements:

Composition of an article

All the articles submitted for their evaluation and possible publication by the Tecnura Journal must have at least the following components:

- ▶ Title in Spanish and English.
- ▶ Information about the authors.
- ▶ Summary in Spanish and English.
- ▶ Key words in Spanish and English.
- ▶ Introduction.
- ▶ Conclusions.
- ▶ Future work (optional).
- ▶ Acknowledgements (optional).
- ▶ Bibliographical references.

If the article is related to scientific and technological research must have, in addition to the above, the following components:

- ▶ Methodology.
- ▶ Results.
- ▶ Financing.

Title

The title of the article has to be short or divided in title and subtitle, attractive for the potential reader and written in capital letters. It should appear centered between the margins, written in *Times New Roman* letter, in bold, font size 18. The title of the article has to be in Spanish and English separated by double space. Maximum 20 words.

Authors

After the title must be written the complete name(s) of the author(s), with their basic biographical data: undergraduate degree, graduate degree, occupation or position, institutional affiliation (institution where works), dependency, city, country and e-mail. The above information must be immediately below the author's name.

Abstract

The scope and purpose of the work must be established giving a clear and concise description of the methodology, results presented and the conclusions obtained. Maximum of 250 words.

Keywords

Three out of ten key words must be chosen, written in English with *Times New Roman* letter in bold and italic.

Key words must be written in alphabetic order and must be as standard as possible, for which is suggested the international databases according to the area of knowledge. For example, in the area of Electrics and Electronics it is suggested to use the IEEE thesaurus and World Bank thesaurus that can be found at the following web pages respectively:

http://www.ieee.org/documents/2009Taxonomy_v101.pdf

<http://multites.net/mtsql/wb/site/default.asp>

Summary in Spanish

Translation to the Spanish language of the text that appears in the abstract, must be corrected and précised.

Keywords in Spanish

Translation to the English language of the keywords in Spanish must be corrected and précised.

Key words must be written in the order of the key words in English and must be as standard as possible, for which is suggested the international databases according to the area of knowledge. For example, in the area of Electrics and Electronics it is suggested to use the UNESCO thesaurus that can be found at the following web pages:

<http://databases.unesco.org/thessp>

Introduction

The general idea of the work must be described, its context, precedents, state of the art of the topic, objectives and possible scope of the work.

Methodology

The writing of this part must allow that any specialized professional in the topic replicates the research.

Results

Explanation and interpretation of the findings. If necessary, a brief discussion focused on the interpretation of the results can be presented.

Conclusions

Implication of the results and their relation with the proposed objective.

Financing

Mention the associated research from where was derived the article and the entity that endorsed and financed the research.

Acknowledgments

Preferably will be brief and should include the essential contributions for the development of the paper.

Equations

Equations must appear centered with respect to the main text. They must be referenced with consecutive numbers (written in parenthesis near the right margin). Equations are cited in the main text employing the word equation, and followed by the number in parenthesis. Equations must be made in an appropriate equation editor and compatible with "InDesign" software, as for example the equation editor of Windows.

Tables

In the case of implementation of tables, is recommended that these are not inserted as images, considering that in that format they cannot be modified. The title of each table includes the word table (in italic) followed by the corresponding consecutive number and a brief name of the table. The heading must be written in TNR letter, italic and font size 9.

Charts are not presented but tables and they should be automatically raised from the text processor. Tables should be named and referenced in the article, in strict order. Every table must have at the bottom the source from which it was taken, or to mention self-authorship if is the case.

Figures

All the figures or pictures have to be sent in JPG or PNG format with a minimum resolution of 300 DPI, adapted to gray scale.

The footnote or name of each figure must include the word figure (in italic) followed by the corresponding consecutive number and a brief description of the content of the figure. The footnote of the figure must be written in *Times New Roman* letter, italic and font size 9. Figures must be named and referenced in the article, in strict order. Every figure must have at the bottom the source from which it was taken, or to mention self-authorship if is the case.

Symbols

The symbols of the constants, variables and functions in Latin or Greek letters –included in the equations- must be in italic; the mathematical symbols and the numbers do not go in italic. The symbols must be identified immediately after the equation. Must be used units, dimensions and symbols of the international system.

When used acronyms or abbreviations, it should be written first the complete equivalence, followed by the corresponding acronym or abbreviation in parenthesis and from there it is only written the respective acronym or abbreviation.

Bibliographic references

Citations, bibliographic references and infography are included at the end of the article. The bibliographic references must be arranged alphabetically according to the surname of the first author, without numbers.

The references that were made in the main text of the work only should appear in tables or in figures. This means that in the list should not appear other references even though they may have been consulted by the authors for the development of the paper.

The call of a bibliographic reference in the text is inserted at the relevant point by the first authors' surname and the year in parentheses, as shown: (Hernández, 2012).

El estilo de citación de referencias adoptado por la revista **Tecnura** es APA sexta edición. Below are described two examples of the references used in the style of references adopted by Tecnura journal:

Reference of an article: must include the following information in the order described:

- ▶ Surname(s) of the author, initials of the name(s) of the author.
- ▶ Title of the article between quotation marks.
- ▶ Name of the journal in italic.
- ▶ Volume and number or year and number of the journal.
- ▶ Date of publication, month and year.
- ▶ Reference pages of the article.

Example:

Weiming H., Tieniu T., Liang W., Maybank, S., "A survey on visual surveillance of object motion and behaviors", *IEEE Trans. Systems, Man, Cybern.*, Vol. 34, No. 3, Aug. 2004, pp. 334–352.

Reference of a book: must include the following information in the order described:

- ▶ Surname(s) of the author, initials of the name(s) of the author.
- ▶ Title of the work in italic.
- ▶ Edition Number if different from the first.
- ▶ Place of publication, city and country.
- ▶ Publisher name.

- ▶ Year of publication.
- ▶ Number of pages in case it applies.

Example:

Hamilton, J., *Time series analysis*. New Jersey, United States of America: Princeton University Press, 1994.

In the case of a reference taken from internet, the URL of the site must be written and the date it was taken.

4. ARTICLE SUBMISSION

The article of the authors have to be submit through the application Open Journal System in digital format, the cover letter and the format article-authors.

4.1. Cover letter

The article must be submitted with a cover letter addressed to the director and editor of the journal Engineer Cesar Augusto Garcia Ubaque, where is included:

- ▶ Specific request to consider your article to be published in Tecnura journal.
- ▶ Full name of the article.
- ▶ Full names of all the authors of the paper.
- ▶ Certification of the originality and unpublished character of the paper.
- ▶ Exclusivity submission to Tecnurajournal.
- ▶ Confirmation of being the author with signature of all the authors.

This letter must be signed by all the authors, scanned and sent with the remaining requested documents.

4.2. Article-authors information format

The article has to be submitted with an information format about the article and its authors which can be downloaded from the web page of Tecnura journal <http://tecnura.udistrital.edu.co>, in the section "guide to authors". It is important to complete all the fields of information requested, some of them have comments to clarify better what is being requested. Not to be scanned.

4.3. Article

Article in digital format (Word 2003 and later editions) that comply with all the presentation rules describe in chapter three "Article structure" of this guide of instructions for authors.

5. PUBLICATION PROCEDURE

The procedure to be followed by Tecnura journal for the evaluation and possible publication of the papers sent by the authors is the following in chronological order:

- i. Delivery of the article with the cover letter and the information format by the authors.
- ii. Notification to the author about the reception of the article.
- iii. Verification of the presentation rules by the monitor of the journal.
- iv. Notification to the author about the evaluation of the presentation rules.
- v. Submission of corrections made by the authors related to the evaluation of presentation rules.
- vi. Submission of the articles to the selected arbitrators.
- vii. Notification of the beginning of the arbitration process of the article.
- viii. Notification to the authors about the decision made by the editorial committee, and of the evaluations made by the arbitrators.
- ix. Delivery of the corrections made by the authors with respect to the evaluations made by the arbitrators.
- x. Study of the final version of the article and the evaluations of the arbitrators by the editorial committee.
- xi. Delivery by the authors of the letter that surrenders right to the editor of the journal.
- xii. Submission of the version with style corrections and diagrammed to the authors.
- xiii. Verification of errors and final approval of the version with style corrections and diagrammed by the authors.
- xiv. Publication of the article in the corresponding number of Tecnura journal.
- xv. Notification to the authors of the number of interest.
- xvi. Delivery of a copy of the journal to each one of the authors of the published article.

6. ARTICLE ARBITARION PROCESS

Considering the quarterly periodicity of the journal, the Editorial Committee makes four calls every year for the submission of articles, approximately in the months of February, May, August and November. The articles will be received until the date established in the call.

Once received the articles the monitor of the journal will make an initial form evaluation to verify the completion of the elements mentioned in this guide of instructions to authors. After receiving again the article with the requested corrections by the journal's monitor, the paper will be submitted to evaluation by three academic peers (through time is expected to include more external peers that participate in the process).

Each article sent to Tecnura journal is checked by two expert academic peers external to the institution of the authors, by a process of "Peer-review" of double blind, guaranteeing the anonymity of authors and evaluators; it is considered confidential every paper sent and this is imposed this way to evaluators.

Possible conclusions of the result of the evaluation by the judges are only three: publish the article without modifications, publish the article with modifications and not publish the article.

Subsequently, the Editorial Committee takes the decision to publish or not the articles, based on the results of the evaluations made by the assigned arbitrators. In case of contradictions in the evaluations with respect of the publication of an article, the editorial committee will send the article to third peer and will be inclined for the two evaluations that have the same concept with respect to the publication of the article.

In each call the main author must suggest at least four possible external to his work institution evaluators, which must be specialists in the specific topic sent and at least must have Masters level and at least two must to be internationals. Potential evaluators can belong to a university or industry, public or private; of them must be provided complete name, highest academic formation, institutional affiliation and e-mail. The editorial committee to enrich the database of arbitrators of Tecnura journal will analyze these four potential evaluators.

The Editorial Committee of Tecnura journal reserves the right to print, reproduce total or partially the article, as the right to accept or reject it. In the same way, has the right to make any editorial modification that considers necessary; in this case the author will receive written recommendations from the evaluators, that if accepted, must deliver the article with the suggested adjustments within the dates given by the journal to guarantee its publication in the programmed number.

As copyrights are recognized a copy of the journal in which the collaboration is published

7. CONTACT

For any additional information request, please send an e-mail to Tecnura journal tecnura@udistrital.edu.co, tecnura@gmail.co or by mail to Cesar Augusto Garcia Ubaque, Director and Publisher of the Journal Tecnura to the following address: Journal Tecnura

Journals Room, Block 5, Office 305.
Technology Faculty
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Transversal 70 B N. 73 a 35 sur
Phone: 571 - 3238400 Extension: 5003
Mobile: 57 - 3153614852
Bogotá D.C., Colombia
Email: tecnura@udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com
Web page: <http://tecnura.udistrital.edu.co>

SUSCRIPCIÓN REVISTA TECNURA

Nombre completo: _____

Institución u organización: _____

Factura a nombre de: _____

Dirección de envío: _____

Ciudad: _____ Departamento, estado o provincia: _____

Código postal: _____ Apartado aéreo / P.O. Box: _____

País: _____ Correo Electrónico: _____

Teléfono: _____ Fax: _____ Firma: _____

Tabla de costos de suscripción:

Región	1 Año	2 Años
Bogotá	40.000 COP	70.000 COP
Colombia	45.000 COP	80.000 COP
América Latina y el Caribe	40 USD	70 USD
Estados Unidos y Canadá	40 USD	70 USD
Otras Regiones	60 USD	100 USD

Nota: los precios tanto en dólares como pesos incluyen el valor del envío.

Diligenciar el formato de suscripción y enviarlo por correo junto con la copia del recibo de consignación a la dirección postal que aparece en la parte inferior de esta página o escaneado a los correos electrónicos *tecnura@udistrital.edu.co* y *tecnura@gmail.com*. La consignación nacional se realiza en el banco de Occidente a nombre de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas en la cuenta de ahorros número 230-81461-8.

Canje y suscripciones

Enviar a Ing. César Augusto García Ubaque Ph.D.

Director y editor Revista Tecnura

Biblioteca

Facultad Tecnológica

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Transversal 70B No. 73A - 35 sur

Teléfono: 571 - Tel: 7311542

Celular: 57 - 3153614852

Bogotá D.C., Colombia

Correo electrónico: *Tecnura@udistrital.edu.co*, *Tecnura@gmail.com*

Tecnura en internet: <http://Tecnura.udistrital.edu.co>

**SIGN UP
TECNURA JOURNAL**

Full Name: _____
Institution or Organization: _____
Invoice Name: _____
Mailing Address/Address: _____
City: _____ Department, State or Province: _____
Zip Code: _____ P.O. Box: _____
Country: _____ E-mail: _____
Phone Number: _____ Fax: _____
Signature: _____

Table of subscription costs:

Región	1 year	2 year
Bogotá	23 USD	40 USD
Colombia	26 USD	46 USD
Latin America and The Caribbean	40 USD	70 USD
The United States of America and Canada	40 USD	70 USD
Other regions	60 USD	100 USD

Note: prices in both dollars and pesos include the value of the shipment.

Fill out the subscription form and mail it along with a copy of the receipt of consignment to the e-mail address that appears in the bottom of this page or scanned to the following E-mails: tecnura@udistrital.edu.co 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

