

EDITORIAL

INVESTIGACIÓN

Propuesta de acceso múltiple al espectro en redes inalámbricas cognitivas

Proposal for multiple spectrum access in cognitive wireless networks

CÉSAR AUGUSTO HERNÁNDEZ SUÁREZ, JORGE ALEXIS RODRÍGUEZ GARCÍA HAROLD

INVESTIGACIÓN

Caracterización de etapas de perforado en probetas multicapas mediante la emisión acústica generada durante la perforación

Characterization of drilling stages in multilayer specimens through the Acoustic Emission generated during the drilling process

GUIDO CLAUDIO FERRAR, MARTÍN PEDRO GÓMEZ

INVESTIGACIÓN

Análisis de expansión de una microrred en una zona no interconectada

Expansion analysis of a microgrid in a non-interconnected zone

DANIEL NICOLAS GONZÁLEZ CEY, ALEJANDRO MUÑOZ RINCÓN, MAXIMILIANO BUENO LÓPEZ

REFLEXIÓN

Intuición colectiva y estadísticas alternativas para acertar

Collective intuition and alternative statistics to hit

CARLOS HILDEBRANDO FONSECA ZÁRATE, JUAN CARLOS GARCÍA UBAQUE, PAULA FERNANDA GARCÍA BENÍTEZ

ESTUDIO DE CASO

Una visión de ciudad sostenible desde el Modelo de gestión de los residuos de Construcción y demolición (rcd) caso de Estudio: Barranquilla

A vision of sustainable city from its Management model of construction and Demolition waste (cdw) – case study: Barranquilla

CARLOS ALBERTO PACHECO BUSTOS, EDGAR HUMBERTO SÁNCHEZ COTE, CAROLINA PÁEZ

11 ESTUDIO DE CASO
Análisis de agua no contabilizada en el sistema de abastecimiento urbano del municipio de Facatativá, Colombia 84

13 Analysis of non-revenue water in the urban supply system of the municipality of Facatativá, Colombia

DIEGO BUENO-HERRERA, EDISON MONROY-ÁVILA, CARLOS ZAFRA-MEJIA

ESTUDIO DE CASO

Flujo crítico en canales abiertos, solución numéricamediante el método de Newton-Raphson para aplicación Android 4.0 99

Critical flow in open channels: Numerical solutionusing the Newton-Raphson method for Android 4.0 application.

EDGAR ORLANDO LADINO MORENO, CESAR AUGUSTO GARCÍA-UBAQUE MARÍA CAMILA GARCÍA VACA

REVISIÓN DE TEMA

Una revisión de plataformas para el sector de la construcción 115

Robotics platforms for the construction sector: A review BECERRA MORA YEISON ALEJANDRO

Instrucciones para los autores 133

Instructions for the authors 141

Tecnura

p-ISSN: 0123-921X
Volumen 24 - Número 63
Enero - Marzo de 2020

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad Tecnológica

Revista Tecnura • Volumen 24 – Número 63 • Enero - Marzo de 2020
p-ISSN: 0123-921X • e-ISSN: 2248-7638 • Bogotá D.C. Colombia

Tecnura

Tecnología y cultura, afirmando el conocimiento

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad Tecnológica

Propuesta de acceso múltiple al espectro en redes inalámbricas cognitivas

Caracterización de etapas de perforado en probetas multicapas mediante la emisión acústica generada durante la perforación

Critical flow in open channels: Numerical solution using the Newton-Raphson method for Android 4.0 application

Una revisión de plataformas robóticas para el sector de la construcción



UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Tecnura

Tecnología y cultura, afirmando el conocimiento

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad Tecnológica

Volumen 24 - Número 63
Enero – Marzo de 2020

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



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD TECNOLÓGICA

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

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

EDITOR

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

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

COMITÉ EDITORIAL

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

Ph.D Martín Pedro Gómez
Comisión Nacional de Energía Atómica. Argentina

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

EVALUADORES

Eng. Luis Alexander Jiménez
Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central

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

PhD. Danilo Alfonso López Sarmiento Universidad
Distrital Francisco José De Caldas

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

PhD. Oscar Danilo Montoya Giraldo
Universidad Tecnológica de Bolívar

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

PhD. Juvenal Villanueva Maldonado
Universidad Autónoma de Zacatecas

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

MEng. Luis Ángel Moreno
Universidad Militar Nueva Granada

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

PhD. Noé Villegas
Universidad Federal de Integración Latinoamericana

Ph.D. Diego Luis González
Consiglio Nazionale delle Ricerche. Italia

PhD. Luisa Marina Gómez Torres
Instituto Técnico Central

Ph.D. Julyan Cartwright
Consejo Superior de Investigaciones Científicas. España

MEng. Luis Alberto Romero Cano
Universidad Autónoma de Guadalajara

Ph.D. Oreste Piro
Universidad de les Illes Balears. España

PhD. Mariano Augusto
Universidad de Buenos Aires

COMITÉ CIENTÍFICO

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

PhD. José Armando Molina Zamora
Universidad Autónoma de Guadalajara, México

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

ASISTENTES DE LA REVISTA TECNURA

Lizeth Viviana Urrea Fonseca

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

COORDINACIÓN EDITORIAL

Fernando Piraquive
Centro de investigaciones y desarrollo tecnológico-CIDC
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

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

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

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

Tecnura

Volumen 24 - Número 63

Enero – Marzo de 2020

REVISTA *TECNURA*

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

PERIODICIDAD

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

COBERTURA TEMÁTICA

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

MISIÓN

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

PÚBLICO OBJETIVO

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

INDEXACIÓN

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

FORMA DE ADQUISICIÓN

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

SUSCRIPCIÓN

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

REPRODUCCIÓN

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

DIRECCIÓN POSTAL

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

DISEÑO ORIGINAL

Julián Hernández–Taller de Diseño

CORRECCIÓN DE ESTILO PARA ESPAÑOL

Fernando Carretero Padilla

CORRECCIÓN DE ESTILO PARA INGLES

Laura Ximena García

DIAGRAMACIÓN Y DISEÑO DE CUBIERTA

Publiart de Colombia
publiartcol@gmail.com



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

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

EDITOR

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

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

EDITORIAL COMMITTEE

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

Ph.D. Martín Pedro Gómez
Comisión Nacional de Energía Atómica, Argentina

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

EVALUATORS

Eng. Luis Alexander Jiménez
Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central

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

PhD. Danilo Alfonso López Sarmiento
Universidad Distrital Francisco José De Caldas

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

PhD. Oscar Danilo Montoya Giraldo
Universidad Tecnológica de Bolívar

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

PhD. Juvenal Villanueva Maldonado
Universidad Autónoma de Zacatecas

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

MEng. Luis Ángel Moreno
Universidad Militar Nueva Granada

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

PhD. Noé Villegas
Universidad Federal de Integración Latinoamericana

Ph.D. Diego Luis González
Consiglio Nazionale delle Ricerche, Italia

PhD. Luisa Marina Gómez Torres
Instituto Técnico Central

Ph.D. Julyan Cartwright
Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España

MEng. Luis Alberto Romero Cano
Universidad Autónoma de Guadalajara

Ph.D. Oreste Piro
Universidad de les Illes Balears, España

PhD. Mariano Augusto
Universidad de Buenos Aires

SCIENTIFIC COMMITTEE

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

PhD. José Armando Molina Zamora
Universidad Autónoma de Guadalajara, México

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

TECNURA JOURNAL ASSISTANTS

Lizeth Viviana Urrea Fonseca

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

EDITORIAL COORDINATION

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

Fernando Piraquive
Centro de investigaciones y desarrollo tecnológico - CIDC
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

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

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

Tecnura

Volumen 24 - Número 63

Enero – Marzo de 2020

TECNURA JOURNAL

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

PERIODICITY

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

THEMATIC COVERAGE

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

MISSION

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

TARGET AUDIENCE

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

INDEXING

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

FORM OF ACQUISITION

Tecnura journal is available through purchase, exchange or subscription.

SIGN UP

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

REPRODUCTION

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

POSTAL ADDRESS

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

ORIGINAL DESIGN

Julián Hernández - Taller de Diseño
director@julianhernandez.co

STYLE CORRECTION IN SPANISH

Fernando Carretero Padilla

STYLE CORRECTION IN ENGLISH

Laura Ximena García

LAYOUT AND TITLE PAGE DESIGN

Julián Hernández - Taller de Diseño

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

Obligaciones y responsabilidades generales del equipo editorial

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

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

Relaciones con los lectores

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

Relaciones con los autores

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

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

Relaciones con los evaluadores

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

Proceso de evaluación por pares

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

Reclamaciones

Tecnura se compromete responder con rapidez a las quejas recibidas y a velar para que los demandantes insatisfechos puedan tramitar todas sus quejas. En cualquier

caso, si los interesados no consiguen satisfacer sus reclamaciones, se considera que están en su derecho de elevar sus protestas a otras instancias.

Fomento de la integridad académica

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

Protección de datos individuales

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

Seguimiento de malas prácticas

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

Integridad y rigor académico

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

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

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

Relaciones con los propietarios y editores de revistas

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

Conflicto de intereses

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

Quejas/denuncias

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

CODE OF ETHICS AND GOOD PRACTICE

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

General duties and responsibilities of the editorial board

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

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

Relations with authors

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

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

Relations with evaluators

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

Peer review process

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

Claims

Tecnura is committed to respond quickly to complaints and ensure that dissatisfied claimant can process all complaints. In any case, if applicants fail to satisfy their claims,

the journal considers that they have the right to raise their protests to other instances.

Promoting Academic Integrity

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

Protection of individual data

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

Tracking malpractice

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

Integrity and academic rigour

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

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

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

Relations with owners and journal editors

The relation between editors, publishers and owners will be subject to the principle of editorial independence.

Tecnura will ensure that articles are published based on their quality and suitability for readers, and not for an economic or political gain. In this sense, the fact that the journal is not governed by economic interests, and defends the ideal of universal and free access to knowledge, provides that independence.

Conflict of interest

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

Complaints / allegations

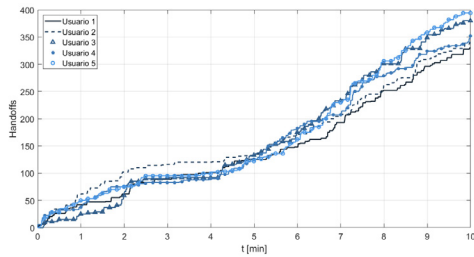
Any author, reader, reviewer or editor may refer their complaints to the competent authorities.

Contenido

EDITORIAL

11 INVESTIGACIÓN

INVESTIGACIÓN



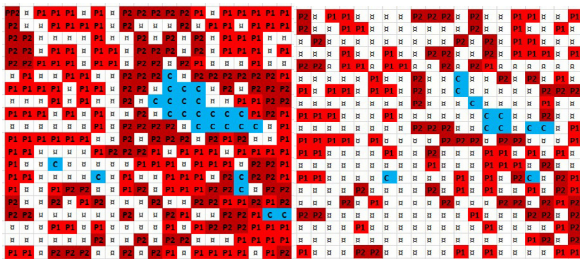
Propuesta de acceso múltiple al espectro en redes inalámbricas cognitivas

13

Proposal for multiple spectrum access in cognitive wireless networks

CÉSAR AUGUSTO HERNÁNDEZ SUÁREZ,
JORGE ALEXIS RODRÍGUEZ GARCÍA HAROLD,
PEÑA MEDINA

INVESTIGACIÓN

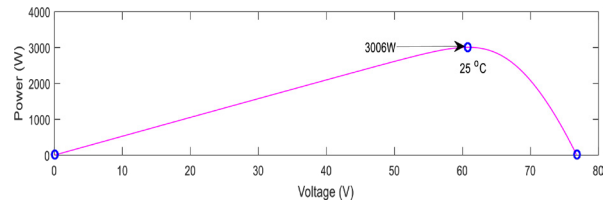


Caracterización de etapas de perforado en probetas multicapas mediante la emisión acústica generada durante la perforación

26

Characterization of drilling stages in multilayer specimens through the Acoustic Emission generated during the drilling process

GUIDO CLAUDIO FERRARI, MARTÍN PEDRO GÓMEZ



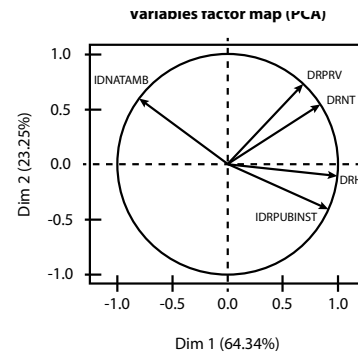
Análisis de expansión de una microrred en una zona no interconectada

40

Expansion analysis of a microgrid in a non-interconnected zone

DANIEL NICOLAS GONZÁLEZ CELY, ALEJANDRO MUÑOZ RINCÓN, MAXIMILIANO BUENO LÓPEZ

REFLEXIÓN



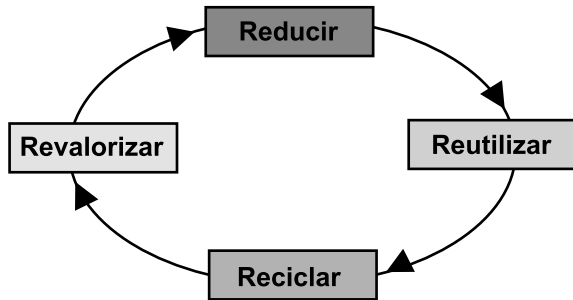
Intuición colectiva y estadísticas alternativas para acertar

57

Collective intuition and alternative statistics to hit

CARLOS HILDEBRANDO FONSECA ZÁRATE, JUAN CARLOS GARCÍA UBAQUE, PAULA FERNANDA GARCÍA BENÍTEZ

ESTUDIO DE CASO



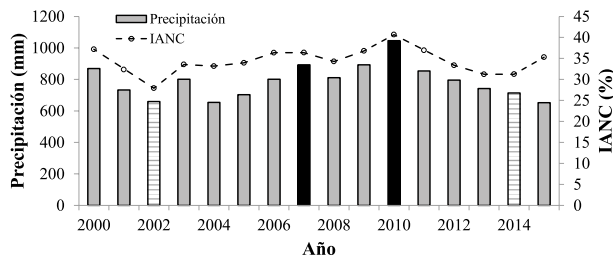
Una visión de ciudad sostenible desde el Modelo de gestión de los residuos de Construcción y demolición (rcd) caso de Estudio: Barranquilla

68

A vision of sustainable city from its Management model of construction and Demolition waste (cdw) – case study: Barranquilla

CARLOS ALBERTO PACHECO BUSTOS, EDGAR HUMBERTO SÁNCHEZ COTE, CAROLINA PÁEZ

ESTUDIO DE CASO



Análisis de agua no contabilizada en el sistema de abastecimiento urbano del municipio de Facatativá, Colombia

84

Analysis of non-revenue water in the urban supply system of the municipality of Facatativá, Colombia

DIEGO BUENO-HERRERA, EDISON MONROY-ÁVILA, CARLOS ZAFRA-MEJIA

ESTUDIO DE CASO



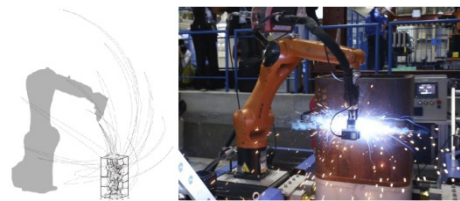
Critical flow in open channels: Numerical solution using the Newton-Raphson method for Android 4.0 application.

99

Flujo crítico en canales abiertos, solución numérica mediante el método de Newton-Raphson para aplicación Android 4.0

EDGAR ORLANDO LADINO MORENO, CESAR AUGUSTO GARCÍA-UBAQUE, MARÍA CAMILA GARCÍA VACA

REVISIÓN DE TEMA



Una revisión de plataformas para el sector de la construcción

115

Robotics platforms for the construction sector: A review

BEERRA MORA YEYSON ALEJANDRO.

EDITORIAL

Nuestro país ha sido epicentro de importantes fenómenos de remoción en masa o deslizamientos de tierra que han traído consigo grandes pérdidas materiales y víctimas mortales. Es por eso que su estudio y prevención constituyen un área de trabajo muy importante para las entidades encargadas de la prevención de desastres principalmente, además de los organismos de planificación y ordenamiento territorial. En las zonas de montaña alrededor del mundo como en Colombia, se ha evidenciado la conexión entre deslizamientos profundos de tipo rotacional y el sistema de agua subterránea circundante a la zona de afectación (Brönnimann, C.S., 2011; Gattinoni P. y Scesi L., 2013; Take W.A., Beddoe R.A., Davoodi-Bilesavar R. y Phillips R., 2015). El análisis clásico de la estabilidad de taludes se ha basado en el cálculo de los factores de seguridad a partir de métodos de equilibrio límite o en algunos casos, en análisis de tensión-deformación por métodos numéricos. Si bien estos responden a metodologías internacionalmente aceptadas, toda modelación geotécnica está basada en el entendimiento de las fuerzas desestabilizadoras, y estas por su parte, responden a un correcto entendimiento del modelo geológico que gobierna la ladera o talud en cuestión.

Para el estudio detallado de los movimientos en masa detonados por lluvia que corresponden a eventos superficiales que responden a lluvias intensas, se han desarrollado diferentes modelos hidrológicos y geotécnicos acoplados, tales como SHALSTAB, TRIGRS, SHIA_landslide, entre otros. Estas herramientas, han permitido la modelación del flujo vertical y lateral, y algunos análisis de condiciones estacionarias y transitorias (Aristizábal E., Velez I. J. I., Martínez H. E., Jaboyedoff M., 2016). Dichos modelos han permitido también, evaluar la influencia del flujo subsuperficial en los movimientos en masa y no el flujo profundo y sus respectivos cambios en el nivel freático, que responden a las condiciones de lluvia antecedente de largo plazo y que detonan deslizamientos profundos, los cuales requieren estudios detallados por su capacidad destructiva.

Los deslizamientos se asocian en su mayoría a condiciones de lluvias intensas y prolongadas que favorecen la saturación de las capas más su-

perficiales y, en algunos casos, a acumulaciones localizadas por contrastes entre capas o estratos con diferencias marcadas de su permeabilidad, generando acuíferos colgados u otros mecanismos de acumulación o circulación subterránea. Varios autores han planteado la influencia de los sistemas de flujo de agua subterránea mediante mecanismos hidrogeológicos (Hoyos, F., 1990; Bustamante, M., 1990; Rodríguez, C., 1977)

Los sistemas de flujos de agua subterránea operan mediante mecanismos condicionados por la permeabilidad de los materiales, físico química de las aguas, que favorecen la aparición de una serie de procesos hidrogeológicos y que representan factores desfavorables para los deslizamientos (infiltración, exfiltración, caminos preferenciales de circulación del agua subterránea). Asimismo, a escalas de planificación del territorio y gestión del riesgo local, ha habido importantes avances en la modelación de escenarios de zonificaciones de susceptibilidad y amenazas (Aristizábal E., Velez I. J. I., Martínez H. E., Jaboyedoff M., 2016), vinculando información detallada respecto a la naturaleza de los materiales del subsuelo, su disposición y al comportamiento del agua, los cuales han contribuido al entendimiento de fenómenos de tipo superficial.

Los movimientos en masa involucran una serie de factores que en conjunto generan el fenómeno de inestabilidad por pérdida de la resistencia del suelo o por fatiga en un macizo rocoso fracturado. Las líneas de flujo a lo largo de macizos rocosos presentan una naturaleza discreta y las aproximaciones en suelo no son aplicables en el entendimiento de la circulación en macizo rocoso fracturado (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2015). Las rocas se fracturan cuando el esfuerzo de tensión, compresión y/o de cizalla superan la resistencia de la roca. Las fracturas pueden modificarse como resultado del esfuerzo – de formación, como en eventos sísmicos; así modificarse como resultado del esfuerzo – deformación, como en eventos sísmicos; así como también por procesos físicos, químicos como la meteorización, erosión, disolución o precipitación de minerales.

CÉSAR AUGUSTO GARCÍA-UBAQUE

Director

EDITORIAL

Our country has been the epicenter of important phenomena of mass removal or landslides, which have brought great material losses and fatalities. For this reason, the study and prevention of these phenomena are a significant work area mainly for entities in charge of disaster prevention, and for the agencies of territorial planning and ordering.

The connection between deep rotational landslides and the groundwater system surrounding the affected area has been evidenced in mountain areas around the world (such as in Colombia) (Brönnimann, CS, 2011; Gattinoni P. and Scesi L., 2013; Take WA, Beddoe RA, Davoodi-Bilesavar R. and Phillips R., 2015).

The classical analysis for slope stability has been based on the calculation of safety factors from limit equilibrium methods or stress-strain analysis by numerical methods. Although these respond to internationally accepted methodologies, all geotechnical modeling is based on the understanding of destabilizing forces, and these in turn respond to a correct understanding of the geological model that governs the slope or slope in question.

Different coupled hydrological and geotechnical models have been developed for the detailed study of mass movements triggered by rain (corresponding to surface events that respond to heavy rainfall). These models include SHALSTAB, TRIGRS, and SHIA_landslide, among others. These tools have allowed the modeling of vertical and lateral flow, as well as some analysis of stationary and transient conditions (Aristizábal E., Velez I. J. I., Martínez H. E., Jaboyedoff M., 2016). These models have also made it possible to evaluate the influence of subsurface flow on mass movements and not only deep flow and its respective changes in the water table. These changes respond to long-term antecedent rain conditions and trigger deep landslides, which require detailed studies for their destructive capacity.

Landslides are mostly associated with intense and prolonged rain conditions that favor saturation of the most superficial layers and localized accumulations with permeability differences. This saturation and accumulation generate hanging aquifers or other mechanisms of accumulation or underground circulation. Several authors have pro-

posed the influence of groundwater flow systems through hydrogeological mechanisms (Hoyos, F., 1990; Bustamante, M., 1990; Rodríguez, C., 1977).

Groundwater flow systems operate through mechanisms conditioned by the permeability of the materials, which favor the appearance of a series of hydrogeological processes and represent unfavorable factors for landslides (i.e. infiltration, exfiltration, preferential paths of circulation of groundwater). Likewise, there have been important advances at territorial planning and local risk management scales in the modeling of susceptibility and threat zoning scenarios (Aristizábal E., Velez I. J. I., Martínez H. E., Jaboyedoff M., 2016). These have linked the information regarding the nature of subsoil materials, their disposition, and the behavior of water, which have contributed to the understanding of surface-type phenomena.

Mass movements involve a series of factors that together generate the phenomenon of instability due to loss of soil resistance or fatigue in a fractured rock mass. Flow lines along rock beds are discrete in nature, and ground approaches are not applicable in understanding circulation in fractured rock beds (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2015). Rocks fracture when tensile, compressive, and / or shear stress exceeds the strength of the rock. Fractures can be modified as a result of stress-strain, as in seismic events; as well as by physical or chemical processes, such as weathering, erosion, dissolution, or precipitation of minerals.

CÉSAR AUGUSTO GARCÍA-UBAQUE

Director



Propuesta de acceso múltiple al espectro en redes inalámbricas cognitivas

Proposal for multiple spectrum access in cognitive wireless networks

César Augusto Hernández Suárez¹ , Jorge Rodríguez García² , Harold Peña Medina³ 

Cómo citar: Hernández S., C.A., Rodríguez G., J.A. y Peña M., H. (2020). Propuesta de acceso múltiple al espectro en redes inalámbricas cognitivas. *Tecnura*, 24(63) 13-25. DOI: <https://doi.org/10.14483/22487638.15243>

Fecha de recepción: 3 de septiembre de 2018

Fecha de aceptación: 14 de febrero de 2019

RESUMEN

Contexto: El acceso a las redes inalámbricas es un proceso en el que intervienen múltiples agentes, por lo que resulta práctico e interesante realizar un análisis multiusuario.

Objetivo: Evaluar un algoritmo de asignación espectral en redes inalámbricas cognitivas que permita simular entornos con múltiples usuarios secundarios que acceden al espectro de forma simultánea.

Metodología: La asignación espectral se realiza mediante la evaluación, para cada usuario secundario, de las rutas espectrales encontradas con una adaptación del algoritmo colonia de abejas artificiales. La validación se da a partir de datos de ocupación espectral reales capturados en una campaña de medición.

Resultados: A partir de los resultados de simulaciones de la red cognitiva con múltiples usuarios secundarios, a través del algoritmo propuesto, se evalúan sus parámetros de interés del rendimiento, como la población de abejas para el tiempo de evaluación, número de handoffs totales y tiempo de ejecución. Conclusiones: El rendimiento del

algoritmo es aceptable con respecto al tiempo de ejecución y el número de handoffs totales; sin embargo, se encuentra unatendencia al incremento de handoffs espectrales, conforme aumenta el número de usuarios secundarios en la red de radio cognitiva, por lo que un número elevado de estos disminuye el rendimiento de la red.

Palabras clave: acceso multiusuario; asignación espectral; espectro radioeléctrico; inteligencia de enjambre; radio cognitiva; redes inalámbricas.

ABSTRACT

Context: Access to wireless networks is a process in which multiple agents intervene, so it is practical and interesting to perform a multi-user analysis.

Objective: To evaluate a spectral allocation algorithm in cognitive wireless networks that allows simulating environments with multiple secondary users that access the spectrum simultaneously.

Methodology: The spectral assignment is performed by evaluating for each secondary user the spectral routes found with an adaptation of the Colony algorithm of Artificial Bees. Validation is performed

- 1 Ingeniero electrónico, doctor en Ingeniería. Docente e investigador de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: cahernandezs@udistrital.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9409-8341>
- 2 Ingeniero eléctrico. Ingeniero de UL de Colombia. Bogotá, Colombia. Contacto: jarodriguezg@ul.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9482-0154>
- 3 Ingeniero eléctrico. Profesional de Laboratorios de la Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia. Contacto: h.pena@uniandes.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3766-4583>

based on actual spectral occupation data captured in a measurement campaign.

Results: Based on the results of simulations of the cognitive network with multiple secondary users using the proposed algorithm, parameters of interest of the algorithm's performance are evaluated, such as the bee population for the evaluation time, number of total handoffs and execution time.

Conclusions: The performance of the algorithm is acceptable with respect to the execution time and the number of total handoffs, however, there is a tendency to increase spectral handoffs as the

number of secondary users in the cognitive radio network increases, so a high number of secondary users decreases network performance.

Keywords: multi-user access; spectral allocation, radio spectrum; swarm intelligence; cognitive radio; wireless networks.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico de las comunicaciones inalámbricas en la época actual ha posibilitado un aumento drástico en el uso de dispositivos inalámbricos, razón por la cual algunas bandas de frecuencia del espectro radioeléctrico son ampliamente usadas (Nandini y Hariprasad, 2019; Mejía, 2017; Narváez, 2016). La radio cognitiva plantea usar de una manera eficiente el espectro, mediante la búsqueda y asignación de bandas de frecuencia disponibles a usuarios secundarios, siempre que el original (primario) no le esté dando uso. En el caso de que el usuario primario (UP) requiera de su respectiva banda de frecuencia, el secundario (US) se retira y da un salto a otra frecuencia (handoff espectral) en búsqueda de una nueva disponible; así se da continuidad a la transmisión tanto de usuarios primarios como secundarios (Ponce, 2019; Sánchez, 2016; Hernández, Páez y Giral, 2015; Bordón y Montejo, 2015; Pedraza, López y Salcedo, 2011).

Hay varios estudios y publicaciones en el área de radio cognitiva, como se muestra en Wang y Ray Liu (2011) y Ghosh, Das y Chatterjee (2014); sin embargo, la mayoría de ellos se ha enfocado en proponer y validar algoritmos para el acceso al espectro en ambientes de un solo

usuario, lo cual se aleja un poco de la realidad al no considerar un acceso multiusuario (Shetty, Agbedanu y Ramachandran, 2011; Carrillo, Mathilde, Yoshimura y Bazzo, 2013; Casadevall y Perejil, 2016; Hernández, Pedraza, Páez y Rodríguez, 2015; Ordoñez, 2016). Uno de los pocos trabajos que presenta un análisis multiusuario para redes de radio cognitiva es el de Liu, Nasser y Hassanein (2013), en el que se evalúa el rendimiento de dos algoritmos de asignación espectral en redes multiusuario: algoritmo genético y algoritmo heurístico. Los resultados, mediante el ajuste de los parámetros de la red cognitiva y el aumento el número de US, muestran que para niveles de tráfico bajo la asignación espectral es más eficiente el algoritmo genético, aunque pierda su funcionalidad en niveles de tráfico alto, donde dicho algoritmo conserva un buen rendimiento.

El presente artículo tiene por objetivo evaluar el desempeño de un algoritmo de asignación espectral para redes de radio cognitiva con un enfoque de acceso multiusuario simultáneo, basado en el algoritmo de colonia de abejas artificiales (ABC, por su sigla en inglés). El algoritmo propuesto se valida a través de datos de ocupación espectral reales, capturados en una campaña de medición espectral anterior, sobre la banda de frecuencia GSM (Pedraza, Forero y Páez, 2014). Las métricas de evaluación utilizadas son el número de handoffs es-

pectrales totales, durante una transmisión de diez minutos. Posteriormente, se contrastan los resultados obtenidos con los de [Liu, Nasser y Hassanein \(2013\)](#), con el propósito de iniciar una evaluación y análisis comparativo.

METODOLOGÍA

El punto de partida para desarrollar el algoritmo propuesto y su evaluación es obtener los datos de ocupación espectral obtenidos a partir de la monitorización del espectro. Luego, se les debe aplicar un tratamiento que se explicará a continuación, con el fin de que sea posible adaptar el algoritmo ABC y simular una red de radio cognitiva con cinco usuarios secundarios (US) que intentan transmitir simultáneamente.

Se adelantan múltiples simulaciones con variación de tamaño de la población de abejas, para así estudiar su influencia y encontrar un valor con el que tenga mejor rendimiento la red en general. Cuando se identifique dicho nivel de población, se estudian los cambios de otros parámetros importantes a tener en cuenta del algoritmo, con el fin de establecer nociones claras del comportamiento real de la red.

Datos de ocupación espectral

En campañas de mediciones previas, se obtuvieron los datos de ocupación espectral mediante la técnica de detección de energía, a partir de la cual se construyó una matriz de potencias. Posteriormente, se definió, por medio de la probabilidad de falsa alarma, el umbral de decisión para determinar la ocupación o disponibilidad de cada canal de frecuencia monitorizado, definiendo la matriz de disponibilidad.

Después de un análisis estadístico se categorizan dos niveles de ocupación espectral,

los cuales se denominan tráfico alto y tráfico bajo, que se pueden ver como el comportamiento del espectro radioeléctrico en una condición de una gran cantidad de usuarios primarios intentando comunicarse (tráfico alto), y en condición de una baja cantidad de usuarios primarios intentando comunicarse (tráfico bajo).

Adicionalmente, el algoritmo propuesto requiere que se dividan los datos de ocupación espectral en dos trazas de igual tamaño: la primera se utiliza para entrenar el algoritmo, de lo cual se obtienen alternativas de bandas de frecuencia libre (denominadas rutas espectrales); a la segunda se recurre para simular una red de radio cognitiva en la que cinco US intentarán establecer comunicación a través de las rutas espectrales halladas anteriormente.

Algoritmo ABC propuesto

Para llevar a cabo la etapa de entrenamiento del algoritmo propuesto se investigó en la literatura un método que tuviera las características de búsqueda, selección y versatilidad, junto con un tiempo de solución no tan elevado. Los aspectos anteriores son necesarios ya que, dentro de una red de comunicaciones real, la disponibilidad de las bandas de frecuencia puede presentar cambios abruptos en pequeños intervalos de tiempo ([Peng, Jain y Dehuri, 2009](#)).

En ese sentido, se escoge el algoritmo artificial bee colony (ABC), el cual es de inteligencia de enjambre que simula el comportamiento de una colonia de abejas durante la búsqueda de alimento. Como se evidencia más adelante, ABC se adapta a las necesidades requeridas debido a que la búsqueda y selección de fuentes de alimento por las abejas es un proceso cíclico que, aunque tiene matices tanto aleatorios como probabilísticos, su solución final

mejora notablemente con cada ciclo. Esto se logra con el uso de pocas ecuaciones prácticas, por lo que también queda cubierto el requerimiento de un tiempo de ejecución bajo.

Ahora, se da una explicación del algoritmo ABC para luego indicar cómo se adapta en la búsqueda y determinación de las rutas espectrales que se usarán en la simulación de una red inalámbrica cognitiva con varios US simultáneos.

El algoritmo ABC concibe tres grupos de abejas en el proceso de búsqueda de fuentes de alimento: empleadas, observadoras y exploradoras, cada una de ellas tiene una función específica. Las empleadas explotan varias fuentes de alimento y comunican el potencial de cada fuente encontrada a las observadoras, quienes seleccionan las mejores fuentes de alimento basándose en su potencial; por último, las exploradoras encuentran nuevas fuentes de alimento para su explotación por parte de las empleadas (Karaboga y Basturk, 2007). Este proceso se repite cíclicamente cuando las observadoras seleccionan las mejores fuentes de alimento encontradas, las cuales corresponden a las posibles soluciones de un problema específico.

El algoritmo ABC termina cuando se cumple un determinado número de ciclos definido inicialmente o cuando se encuentra una solución aceptable.

Para mostrar las ecuaciones usadas en el algoritmo ABC se deben definir sus parámetros de entrada:

- Tamaño de la población de abejas: SN.
- Valores mínimo y máximo en el que se presume estará la solución:
- Número de ciclos máximo: MCN.
- Se puede definir un límite de ciclos en el que se conserva una fuente de alimento; si

no mejora después de estos ciclos, será reemplazada por una nueva: L.

En un primer momento, se genera un número SN de soluciones iniciales x_i con la ecuación (1):

$$x_i = x_{min} + rand(0,1)(x_{max} - x_{min}) \quad (1)$$

$$i \in [1, 2, 3, 4 \dots SN]$$

Posteriormente, se evalúa el potencial si de cada fuente de alimento x_i encontrada con la ecuación característica del problema a solucionar y se halla un número SN de nuevas fuentes de alimento cercanas y_i con la ecuación (2). De igual forma, se evalúa el potencial si de las nuevas fuentes de alimento encontradas y_i y se selecciona la mejor opción entre las posibles y_i y x_i , este valor es reemplazado en x_i .

$$y_i = x_j + \emptyset_j(x_j - x_k) \quad (2)$$

$$j \neq k$$

\emptyset_j número real aleatorio entre $[-1, 1]$

Ahora, la selección de fuentes de alimento por parte de las abejas observadoras se realiza teniendo en cuenta la probabilidad P_i para cada fuente de alimento x_i que se calcula con la ecuación (3). El proceso se repite a partir de la ecuación (2), generando nuevas fuentes de alimento cercanas y seleccionando las mejores. Se repite un número de ciclos MCN o hasta que se encuentre una solución aceptable para el problema en cuestión.

$$P_j = \frac{S_i}{\sum_{n=1}^{SN} S_n} \quad (3)$$

El procedimiento del algoritmo ABC descrito se adapta para encontrar varias rutas espectrales libres que los US tendrán como referencia para establecer co-municación. Para dicho fin, se usará la primera traza de ocupación espectral para encontrar tales rutas espectrales. En ella, las soluciones x_i serán los intervalos de tiempo en la que una banda de frecuencia se encuentre libre, y el potencial si de dicho intervalo será su tiempo de disponibilidad.

El procedimiento del algoritmo ABC descrito se adapta para encontrar varias rutas espectrales libres que los US tendrán como referencia para establecer comunicación. Para dicho fin, se usará la primera traza de ocupación espectral para encontrar tales rutas espectrales. En ella, las soluciones x_i serán los intervalos de tiempo en la que una banda de frecuencia se encuentre libre, y el potencial si de dicho intervalo será su tiempo de disponibilidad.

De esta manera se busca seleccionar los intervalos x_i que tengan mayor tiempo de disponibilidad y añadirlos uno a uno a la ruta espectral. La búsqueda de una ruta espectral se detiene cuando se tengan intervalos x_i definidos para toda la extensión de la traza. La etapa de entrenamiento termina cuando se encuentre el número de rutas espectrales requeridas definidas inicialmente por quien realice la simulación.

Al terminar la etapa de entrenamiento se comienza la etapa de evaluación, en la que se usa la segunda traza de ocupación espectral y se busca asignar a cada US una banda de frecuencia libre para toda la extensión de tiempo de la traza. Para esto, se evalúa la disponibilidad de las bandas de frecuencia indicadas por las rutas espectrales encontradas en la etapa de entrenamiento, a partir del siguiente procedimiento.

En el inicio de la traza se evalúa si la banda de frecuencia indicada por la ruta espectral se encuentra ocupada para ese instante de tiempo; si está ocupada, se procede a evaluar la banda de frecuencia que indica la siguiente ruta espectral encontrada hasta hallar una disponible. Cuando se localice una banda de frecuencia disponible, el US establece comunicación a través de ella, y se le asigna otra banda de frecuencia libre al siguiente US de manera análoga. Cuando todos los US tengan asignada una banda de frecuencia libre, se aumenta el instante de tiempo de evaluación y se repite la asignación de bandas de frecuencia que se describió en el párrafo anterior. De esta forma se evalúan las rutas espectrales obtenidas a lo largo de toda la traza guardando la evolución de los *handoffs* espectrales totales y fallidos que serán el resultado de la simulación. Para tal efecto, se asume un *handoff fallido* cuando en medio de la simulación se requiere cambiar de banda de frecuencia y al evaluar la banda de la siguiente ruta espectral se encuentra ocupada; mientras que un *handoff exitoso* se da cuando al evaluar la banda de la siguiente ruta espectral se encuentra disponible. Los *handoffs* totales se toman como la suma de los exitosos y los fallidos.

Experimentación: Para realizar la validación y evaluación del algoritmo propuesto, en la presente investigación se adelanta un conjunto de simulaciones sobre un *software* para redes de radio cognitiva desarrollado previamente (Hernández, Páez y Giral, 2016). Dicho *software* fundamenta su funcionamiento en datos de ocupación espectral reales capturados en la banda de frecuencia GSM en una campaña de medición anterior, llevada a cabo en la ciudad de Bogotá. Lo anterior permite que la validación y evaluación se acerquen un poco más a la realidad en cuanto que su desempeño está medido sobre un patrón de comportamiento

real de usuarios primarios. Adicionalmente, para tener un estadístico significativo se decidió adelantar diez simulaciones de cada experimento y tomar el valor promedio de los resultados obtenidos.

Métricas de evaluación

Para evaluar el algoritmo propuesto se tendrán en cuenta tres criterios: tamaño de población de colonia de abejas, número de *handoffs* totales por usuario y tiempo de ejecución. En la sección de resultados y conclusiones se discute sobre la forma de aplicar tales criterios.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos se organizan en tres secciones. La primera muestra el análisis realizado para determinar el tamaño de población con mejores resultados. La segunda utiliza el resultado anterior para determinar las tasas de *handoff* espectral correspondientes a cada uno de los cinco usuarios secundarios (US) que acceden al espectro de manera simultánea, tanto en tráfico alto como en tráfico

bajo. La tercera sección analiza los tiempos de ejecución del algoritmo propuesto en ambos niveles de tráfico, durante los diez minutos de transmisión simultánea de los cinco US. La cuarta sección presenta un análisis comparativo con otro trabajo relacionado.

Población de abejas

Según lo planteado en las secciones anteriores, en la [tabla 1](#). se muestran los resultados promedio de cinco simulaciones, para *handoffs* totales (tráfico alto y bajo), en una red de radio cognitiva con cinco US y para cada nivel de población.

Al obtener los resultados anteriores se procede a calcular una calificación del rendimiento por usuario para cada nivel de población, teniendo como referencia el número de *handoffs* totales: se compara el número de *handoffs* por US, con el valor mínimo obtenido entre todas las poblaciones; así se alcanza una calificación que puede tener un valor menor o igual a 1; donde 1 indica la población con

Tabla 1. Promedio de handoffs totales para cinco niveles de población y dos niveles de tráfico

Promedio por población handoffs totales tráfico alto					
SU/Población	100	200	300	400	500
SU1	519	450	465	437	449
SU2	499	474	448	449	473
SU3	524	532	494	483	505
SU4	576	582	511	526	550
SU5	573	609	589	529	543
Promedio por población handoffs totales tráfico bajo					
SU/Población	100	200	300	400	500
SU1	328	313	317	326	324
SU2	283	358	335	370	315
SU3	395	378	351	366	372
SU4	420	397	362	361	353
SU5	422	423	404	392	395

Fuente: elaboración propia.

la que se logra el menor número de *handoffs* totales para su correspondiente usuario, y una calificación menor a esta cifra desciende conforme el número de *handoffs* aumenta.

El procedimiento anterior se realiza para cada US y para los dos niveles de tráfico. Por último se obtiene un valor promedio de las calificaciones para los dos niveles de tráfico, el cual será con el que se defina el nivel de población que cuenta con un mayor rendimiento para un tiempo de evaluación de diez minutos.

El procedimiento descrito se detalla en la [tabla 2](#), donde la población con mejor rendimiento es 400 al obtener la calificación total más alta (0,963).

El estudio previo para determinar la población más eficiente mostrado en las [tablas 1 y 2](#) es un paso adicional característico del algoritmo propuesto, y se debe realizar siempre que se quiera encontrar el mayor rendimiento de la red inalámbrica cognitiva. Se debe tener en cuenta que la mejor población encontrada es válida para el tiempo de

Tabla 2. Calificación de cada nivel de población con base en el número de *handoffs* totales

Calificación por población <i>handoffs</i> totales tráfico alto					
SU/población	100	200	300	400	500
SU1	0,842	0,971	0,940	1,000	0,973
SU2	0,898	0,945	1,000	0,998	0,947
SU3	0,922	0,908	0,978	1,000	0,956
SU4	0,887	0,878	1,000	0,971	0,929
SU5	0,923	0,869	0,898	1,000	0,974
Calificación por población <i>handoffs</i> totales tráfico bajo					
SU/población	100	200	300	400	500
SU1	0,954	1,000	0,987	0,960	0,966
SU2	1,000	0,791	0,845	0,765	0,898
SU3	0,889	0,929	1,000	0,959	0,944
SU4	0,840	0,889	0,975	0,978	1,000
SU5	0,929	0,927	0,970	1,000	0,992
Calificación promedio por población					
TOTAL	0,908	0,911	0,959	0,963	0,958

Fuente: elaboración propia.

evaluación de estudio y puede sufrir variaciones si se cambia el tiempo de evaluación; es decir, en el estudio se encontró que la mejor población con la que se tiene un mayor rendimiento es de 400 abejas artificiales para un tiempo de evaluación de 10 minutos, si se cambia el tiempo de evaluación,

se puede encontrar con que una población diferente a 400 es con la que se presenta el mayor rendimiento.

Tasa de *handoff*

Con la población de mejor rendimiento definida, se realizaron diez simulaciones para

evaluar el desempeño del algoritmo propuesto de acuerdo con la tasa de *handoff*, cuyos resultados se muestran en las tablas 3 y 4.

Con el valor promedio se puede identificar una tendencia del comportamiento de los *handoffs* totales. Principalmente, se encuentra que hay un mayor número de *handoffs* totales para un nivel de tráfico alto, para el que se tienen valores desde 449 hasta 582 *handoffs*, mientras que para el nivel de tráfico bajo se tienen valores desde 310 hasta 408, lo cual era de esperarse debido a que al tener un mayor nivel de ocupación se requiere cambiar, con mayor continuidad, de banda de frecuencia. Además, conforme aumenta el orden del US, se tiende a aumentar el número de *handoffs*, es decir, para el primer US se da el menor número de *handoffs* y para el quinto US se da el mayor número de *handoffs*. Lo anterior se debe a que para los primeros SU se usan las primeras rutas espectrales obtenidas en la etapa de entrenamien-

to, las cuales generalmente tienen un tiempo de disponibilidad mayor, mientras que para los últimos US se debe recurrir a las últimas rutas espectrales, con tiempo de disponibilidad menor, y además deben ajustarse a los nuevos cambios en la traza de disponibilidad generada por los primeros US.

Con respecto a los *handoffs* totales obtenidos en las tablas 3 y 4, se identifica una tendencia al incremento en el número de *handoffs*, conforme aumenta la posición del US al hacer una revisión de los *handoffs* promedio. Aunque en algunas simulaciones individuales no se presenta claramente dicha tendencia; esto se puede atribuir a cómo se construyen las rutas espectrales, en donde al usar una adaptación de las ecuaciones (1) y (2) en las que existe un factor aleatorio, se traduce en que no necesariamente las primeras rutas espectrales halladas son las que tienen los mejores tiempos de disponibilidad, ya que dependen de los tramos disponibles hallados en la búsqueda aleatoria.

Tabla 3. Recuento de *handoffs* totales para tráfico alto, por cada simulación para una población de 400

Usuario	Handoffs totales para tráfico alto por simulación										Promedio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
SU 1	471	536	463	409	455	391	414	444	514	394	449
SU 2	444	449	528	443	504	436	473	498	378	447	460
SU 3	559	580	456	525	446	525	436	436	493	515	497
SU 4	607	510	525	588	523	466	494	580	528	498	532
SU 5	653	604	694	502	554	608	541	614	543	507	582

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Recuento de *handoffs* totales para tráfico bajo, por cada simulación para una población de 400

Usuario	Handoffs totales para tráfico alto por simulación										Promedio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
SU 1	280	348	262	336	361	325	330	253	240	362	310
SU 2	354	367	333	433	298	332	340	396	388	390	363
SU 3	304	357	446	383	351	362	380	419	374	342	372
SU 4	324	377	343	408	309	377	352	421	333	403	365
SU 5	335	337	471	363	369	526	394	445	457	379	408

Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, la tendencia encontrada en el promedio de los handoffs está condicionada por el hecho de que los primeros US van a ocupar primero las bandas de frecuencia libres, por lo que los últimos deben realizar una mayor búsqueda.

Tiempos de ejecución

Ahora, con la misma población de 400, se realizaron 10 simulaciones para estimar el tiempo de ejecución del algoritmo propuesto

tanto en tráfico alto como bajo, cuyos resultados se muestran en las [tablas 5](#) y [6](#).

En cuanto al tiempo de ejecución, este es mayor cuando se evalúa con una traza de disponibilidad de tráfico alto, para el que se tiene en promedio de ejecución de 132,2 segundos; mientras que para tráfico se tiene un promedio de 60,1 s. Esta tendencia se puede esperar debido a que un mayor nivel de ocupación se traduce en un mayor tiempo de búsqueda de las rutas espectrales requeridas.

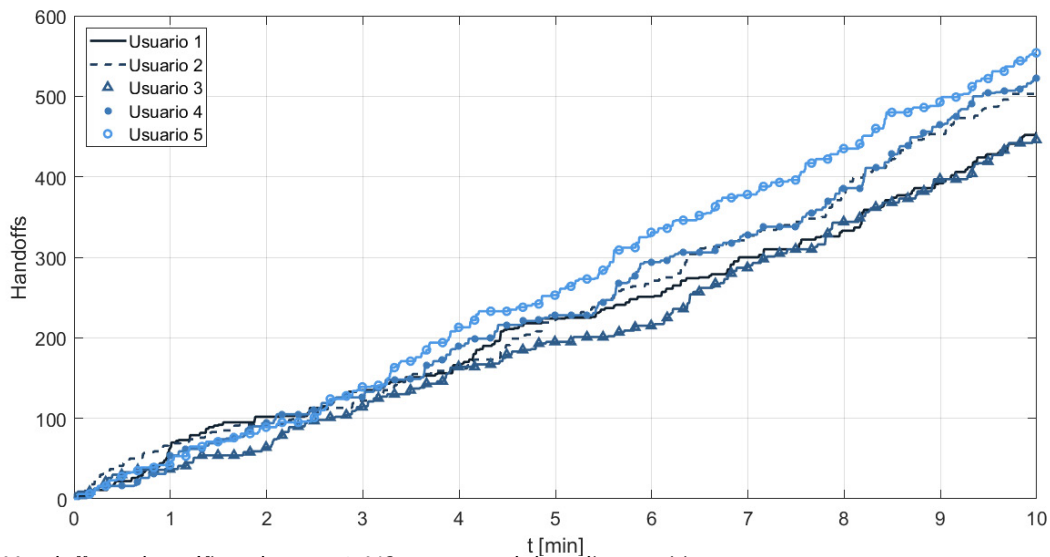


Figura 1. Handoffs totales tráfico alto para 5 US, en una red de radio cognitiva propuesta

Fuente: elaboración propia.

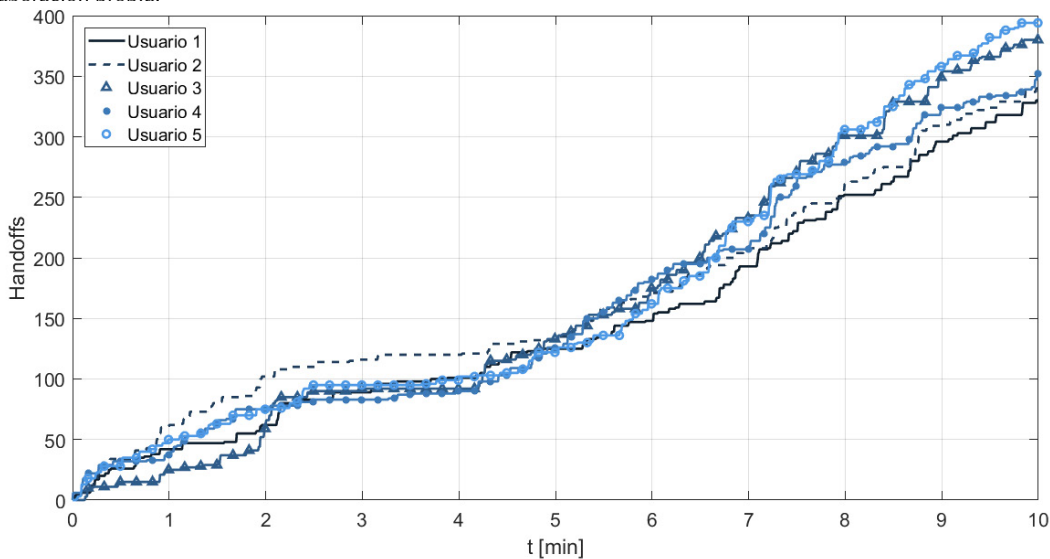


Figura 2. Handoffs totales tráfico bajo para 5 US, en una red de radio cognitiva propuesta

Fuente: elaboración propia.

Los tiempos de ejecución encontrados en las tablas 5 y 6. no son excesivos si se comparan con el tiempo de evaluación; para la traza de nivel de tráfico alto se obtuvo en promedio

de ejecución 132,2 s, lo que corresponde a 22,03 % del tiempo de evaluación (600 s), y para la traza de nivel de tráfico bajo se obtuvo en promedio un tiempo de ejecución de 60,1s,

Tabla 5. Recuento de tiempo de ejecución para tráfico alto, por cada simulación, para una población de 400

Usuario	Tiempo de ejecución para tráfico alto por simulación [s]										Promedio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
SU 1											
SU 2											
SU 3	108,8	143,9	127,4	131,9	138,7	138,6	150,9	122,2	128,4	131,0	132,2
SU 4											
SU 5											

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Recuento de tiempo de ejecución para tráfico bajo, por cada simulación, para una población de 400

Usuario	Tiempo de ejecución para tráfico bajo por simulación [s]										Promedio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
SU 1											
SU 2											
SU 3	47,7	69,3	58,3	62,3	62,3	64,2	54,6	59,8	57,9	64,5	60,1
SU 4											
SU 5											

Fuente: elaboración propia.

lo que corresponde a 10,01 % del tiempo de evaluación (600 s). Son cifras aceptables, si se piensa en una posible aplicación real en el futuro en la que se necesitan tiempos de ejecución menores que el tiempo de evaluación.

Evaluación comparativa Con el ánimo de plantear una discusión y demostrar el aporte del presente artículo, a continuación se aborda el trabajo realizado por Liu, Nasser y Hassanein (2013), quienes desarrollan un algoritmo genético para optimizar la asignación espectral en redes cognitivas con múltiples usuarios secundarios. También, utilizan una función objetivo en la que se relacionan parámetros de la red cognitiva como rendimiento de la red e ingresos del operador de

red para cada usuario secundario, además de los parámetros propios de un algoritmo genético, como tasa de mutación, tasa de cruce, tamaño de la población de individuos y número de generaciones. Los autores se centran en las características cualitativas de los resultados obtenidos con el fin de evidenciar la posibilidad de tener enfoques diferentes que se le pueden dar a la misma tarea del desarrollo de algoritmos de asignación espectral; en vez de realizar un análisis cuantitativo completo debido a que no se especifican tiempos de evaluación y no se tiene en cuenta la evolución de los handoffs espectrales en los algoritmos propuestos.

El algoritmo genético presenta un buen rendimiento con respecto a velocidad y cumple

su objetivo de optimizar el rendimiento de la red; sin embargo, este último disminuye drásticamente conforme aumenta el nivel de tráfico de la red hasta no poder ejecutar la asignación espectral dentro de una red cognitiva muy congestionada. En la misma publicación, se presenta el funcionamiento de un algoritmo heurístico y se compara su rendimiento con el algoritmo genético; aquí se encuentra que este último posee un buen rendimiento sin importar que el nivel de congestión de la red aumente, con lo cual queda claro que, para niveles de congestión bajo, el algoritmo genético ofrece mejores resultados. Aunque, en ninguno de los dos algoritmos se presentan datos que permitan comparar cuantitativamente los resultados obtenidos.

En cuanto a las diferencias en el método de simulación, en este se asigna un número de bandas del espectro disponible M y, para simular diferentes niveles de tráfico, se cambia el número de US, así: para simular una red congestionada asignan $SU > M$, y para simular una red no congestionada asignan $SU < M$; mientras que, en el presente artículo, los niveles de tráfico se diferencian por trazas generadas a partir de campañas de medición del espectro.

CONCLUSIONES

Las simulaciones del algoritmo propuesto con múltiples usuarios secundarios (US) simultáneos sirven como un primer acercamiento al estudio de la implementación de las redes inalámbricas cognitivas reales; brindan criterios de selección del tiempo de evaluación y del número de US máximos permitidos con el que se buscará un buen rendimiento sin *handoffs* totales excesivos y sin tiempos de ejecución del algoritmo excesivamente elevados.

FINANCIAMIENTO

El presente trabajo es el resultado de un proyecto de investigación financiado por el Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

REFERENCIAS

- Bordón L., R. y Montejó S., S. (2015). La radio cognitiva y su impacto en el uso eficiente del espectro de radio. *Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 36(1), 42-55.
- Carrillo, D., Mathilde, F., Yoshimura, R. y Bazzo, J. (2013). Red Experimental Cognitiva: Algoritmos y Resultados. En *IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM)* (pp. 1-5). Medellín. <https://doi.org/10.1109/ColComCon.2013.6564839>
- Casadevall Palacio, F. y Perejil Sabaté, I. (2016). Implementación de terminales de radio cognitiva en la banda de TV. Barcelona: Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Telecomunicació de Barcelona.
- Ghosh, G., Das, P. y Chatterjee, S. (2014). Cognitive Radio and Dynamic Spectrum Access - A Study. *International Journal of Next-Generation Networks*, 6(1), 43-60. <https://doi.org/10.5121/ijngn.2014.6104>
- Hernández, C.A., Páez, I.P. y Giral, D.A. (2016). *Modelo adaptativo multivariable de handoff espectral para incrementar el desempeño en redes de*

- radio cognitiva*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Hernández, C., Pedraza, L., Páez, I. y Rodríguez, E. (2015). Análisis de la movilidad espectral en redes de radio cognitiva. *Información Tecnológica*, 26(6). <https://doi.org/10.4067/S0718-07642015000600018>
- Karaboga, D. y Basturk, B. (2007). Artificial Bee Colony (ABC) Optimization Algorithm for Solving Constrained Optimization Problems. En P. Melin, O. Castillo, L.T. Aguilar, J. Kacprzyk y W. Pedrycz (eds.), *Foundations of Fuzzy Logic and Soft Computing* (pp. 789-798). Berlín, Alemania: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-72950-1_77
- Liu, Z., Nasser, N. y Hassanein, H.S. (2013). Heuristic Based Dynamic Spectrum Assignment in Cognitive Radio Network. En *International Conference on Computing, Management and Telecommunications (ComManTel)* (pp. 105-110). Ho Chi Min, Vietnam. <https://doi.org/10.1109/ComManTel.2013.6482374>
- Mejía Ardila, A. F. (2017). Análisis de ocupación de canales para redes de Radio Cognitiva en el espectro de señales GSM durante un periodo de seis meses. [Tesis de maestría]. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
- Nandini, K.S. y Hariprasad, S.A. (2019). Optimal Spectrum Sensor Assignment in Multi-channel Multi-user Cognitive Radio Networks. *Journal of Telecommunications and Information Technology*, 8(4), 88-96. <https://doi.org/10.26636/jtit.2018.124017>
- Narváez Romero, F.R. (2016). Diseño de un detector de energía para señales de radio FM en radio cognitiva. Loja: Universidad Nacional de Loja.
- Ordoñez, J.C. (2016). Caracterización de usuarios primarios para la implementación de un modelo predictor para la toma de decisiones en redes inalámbricas de radio cognitiva. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Pedraza, L.F., Forero, F. y Páez, I.P. (2014). Evaluación de ocupación del espectro radioeléctrico en Bogotá-Colombia. *Ingeniería y Ciencia*, 10(19), 127-143. <https://doi.org/10.17230/ingenieria.10.19.6>
- Pedraza, L., López, D. y Salcedo, O. (2011). Enrutamiento basado en el algoritmo de Dijkstra para una red de radio cognitiva. *Tecnura*, 15(30), 94-100.
- Peng Lim, C., Jain, L. y Dehuri, S. (2009). *Innovations in Swarm Intelligence*. India: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-04225-6>
- Ponce Pinos, J.E. (2019). Evaluación de ocupación del espectro radioeléctrico y análisis de factibilidad de uso de radio cognitiva en la banda UHF (450-512 MHz) Para su optimización en la ciudad de Riobamba. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Sánchez López, C. (2016). Estudio sobre la viabilidad de redes radio cognitivas en el Campus Nord de la Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona: l'Escola Tècnica d'Enginyeria de Telecomunicació de Barcelona.

Shetty, S., Agbedanu, K. y Ramachandran, R. (2011). Opportunistic spectrum access in multi-user multi-channel cognitive radio networks. En 19th European Signal Processing Conference, EUSIP-CO 2011 (pp. 1229-1233). Barcelona, España. Wang, B. y Ray Liu, K.J. (2011). Advances in Cognitive Radio Networks: A Survey. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 5(1), 5-23. <https://doi.org/10.1109/JSTSP.2010.2093210>





Caracterización de etapas de perforado en probetas multicapas mediante la emisión acústica generada durante la perforación

Characterization of drilling stages in multilayer specimens through the Acoustic Emission generated during the drilling process

Guido Claudio Ferrari¹ , Martín Pedro Gómez² 

Cómo citar: Ferrari, G.C. y Gómez, M.P. (2020). Caracterización de etapas de perforado en probetas multicapas mediante la emisión acústica generada durante la perforación.. *Tecnura*, 24(63) 26-39. DOI: <https://doi.org/10.14483/22487638.16193>

Fecha de recepción: 31 de mayo de 2019

Fecha de aceptación: 18 de octubre de 2019

RESUMEN

Objetivo: El presente trabajo se basa en el monitoreo mediante emisión acústica de la herramienta de corte en un proceso de perforación de material geológico y la utilización de redes neuronales tipo Kohonen para la clasificación de la información.

Metodología: La metodología consistió en la realización de una serie de perforaciones sobre una probeta construida con rocas tipo arenisca, caliza y pizarra, dispuestas en capas y consolidadas con una mezcla de cemento. El herramental utilizado para la perforación consistió en un cortador de dos filos de carburo de tungsteno (CT), de 65 mm de diámetro. El proceso completo fue monitoreado mediante un sistema de emisión acústica acoplado a la broca giratoria y a la probeta de ensayo. Posteriormente se correlacionó la emisión acústica con la estratigrafía de la perforación, se procesó y adaptó la información para entrenar y simular una red neuronal tipo Kohonen, que clasificó la información del proceso según el tipo de roca que se estaba atravesado con el cortador.

Resultados: Los resultados muestran que la técnica de emisión acústica es sensible a los cambios de estratos durante la perforación de estos geomateriales y que la instrumentación de la broca rotante brinda un buen canal de monitoreo de este proceso. En este se observan los transitorios de cambio de interfaces y el perforado estable mediante el análisis de parámetros de la emisión acústica como RMS, energía MARSE, rise time y frecuencia promedio.

Conclusiones: La técnica de emisión acústica puede ser utilizada para el monitoreo del proceso de taladrado en la presente escala. El procesamiento de los parámetros de emisión acústica permitió entrenar y simular una red neuronal Kohonen que pueda clasificar diferentes etapas del perforado con un error de mezclado inferior al 5 %.

Palabras clave: emisión acústica; perforación, monitoreo de procesos; arenisca; caliza; redes neuronales.

- 1 Ingeniero Mecánico (UTN-FRD). Magíster en Ciencia y Tecnología, mención Materiales (IT-UNSAM-CNEA). Docente de la Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Delta de Campana, Buenos Aires, Argentina. Contacto: guicferrari@gmail.com
- 2 Licenciado en Física, magíster en Ciencia y Tecnología de los Materiales, doctor en Ciencia y Tecnología de los Materiales. Comisión Nacional de Energía Atómica. Docente de la Universidad Tecnológica Nacional Regional Delta y de la Universidad Nacional de San Martín. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. Contacto: mpgomez@cnea.gov.ar
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9578-2399>

ABSTRACT

Objective: This work is based on the Acoustic Emission (EA) monitoring of the cutting tool in a geological material drilling process and the use of Kohonen type Neural Networks for the classification of information.

Methodology: The methodology consisted in the realization of a series of perforations on a specimen built with sandstone, limestone and slate rocks, arranged in layers and consolidated with a cement mixture. The tool used for drilling consisted of a double-edged Tungsten Carbide (CT) cutter, 65 mm in diameter. The entire process was monitored by an AE system coupled to the rotating drill and test specimen. Subsequently, the EA was correlated with the stratigraphy of the perforation, the information was processed and adapted to train and simulate a Kohonen type neural network, which classified the process information according to the type of rock that was traversed with the cutter.

Results: The results show that the Acoustic Emission technique is sensitive to stratum changes during the drilling process of these geomaterials and that the instrumentation of the rotating drill provides a good monitoring channel for this process. In this, the change of interfaces of the interfaces and the stable drilling process can be observed through the analysis of acoustic emission parameters such as rms, MARSE energy, rise time and average frequency.

Conclusions: The Acoustic Emission technique can be used to monitor the drilling process on this scale. The processing of the Acoustic Emission parameters allowed to train and simulate a Kohonen neural network that can classify different stages of the drilling process with a mixing error of less than 5%.

Keywords: Acoustic Emission; Drilling; Process Monitoring; Sandstone; Neural Networks.

INTRODUCCIÓN

La técnica de emisión acústica (EA) es ampliamente utilizada como una valiosa herramienta en ensayos no destructivos para el control, detección y posicionamiento de diferentes defectos en recipientes a presión, tanques de almacenamiento de hidrocarburos, pérdidas en válvulas y cañerías, descargas tipo corona en transformadores de alta tensión, rotura de fibra y matriz de materiales compuesto tipo FVRP y FCRP, análisis de propagación de fracturas en hormigón, etc. Esta técnica consiste en la detección y análisis de las ondas elásticas resultantes de la liberación de energía durante un corto periodo de tiempo, donde la emisión proviene de una fuente (o suceso) que es excitada de alguna manera. Ejemplo de este fenómeno es la liberación de energía potencial elástica

durante el avance de una fractura frágil. Parte de esa energía liberada por la fisura se propaga a través del cuerpo fracturado en forma de onda de tensión elástica, donde eventualmente llega a un transductor piezoeléctrico que permite adquirir la señal de EA para su registro y posterior análisis. En particular, la propagación de una fractura se caracteriza por ser una emisión de tipo discreta, es decir temporalmente determinada.

Otra forma de utilizar la EA está relacionada con el monitoreo indirecto de procesos; con ellas se evalúa el desarrollo y evolución, por ejemplo, del corte de un material respecto de variables como el avance, velocidad de corte, material y condición del herramental, entre otras. Este tipo de EA, al igual que los procesos de fricción y erosión, genera señales que no están claramente determinadas en función del tiempo y tienden más bien a ser continuas con transitorios a lo largo del proceso. Dentro de la caracterización de las señales de EA se

pueden parametrizar diferentes aspectos de la onda recibida como la duración, la amplitud máxima, el número de cuentas, la energía MARSE, la frecuencia promedio, el centroide de frecuencia, el tiempo de excursión hasta la amplitud máxima (denominado rise time) y el valor RMS de la EA, entre otros parámetros. Algunos de estos valores se calculan a partir del momento que la señal sobrepasa un valor arbitrario denominado umbral, el cual es fijado por el operador del equipo en función de su conocimiento y experiencia.

Existen trabajos que analizan el monitoreo de procesos de corte ortogonal, por ejemplo en metales, donde se asocia el RMS de la señal de EA con ciertas condiciones durante el torneado. Dornfeld y Kannatey-Asibu (1980), y Saini y Park (1996), generaron modelos empíricos y analíticos asociando este valor (RMS de EA) en función de variables como deformación plástica del material cortado, flujo de viruta, avance y r. p. m. Otros análisis, como el de Grabec y Leskovar (1977), también incluyen distribución del espectro de frecuencia de la señal de EA respecto del avance, r. p. m. y profundidad de corte. Jemielniak y Otman (1997) estudian el análisis de la curtosis y oblicuidad (skewness) de la distribución del parámetro RMS de EA, donde se muestra una buena sensibilidad para detectar la rotura catastrófica de la herramienta.

Para el taladrado de materiales compuestos en fibra de carbono y resina epoxi, Mascaro, Gibiat, Bernadou y Esquerre (2005) relacionan el espectro de frecuencia durante este proceso y muestran que la banda de frecuencia concerniente a la rotura de la matriz y de las fibras no varía con el cambio de geometría del instrumental, la velocidad de taladrado y el avance. Además, indican que la energía de la señal de la EA es sensible al desgaste de la herramienta, lo que revela que eventualmente este parámetro podría ser utilizado para el control de su estado. Trabajos más recientes

utilizan parámetros secundarios como la potencia media de la EA, los cuales funcionan como indicadores del estado de las brocas en perforados de metales (Gómez, Hey, Ruzzante y D'Attellis, 2010; Gómez 2012).

La perforación, desde un punto de vista mecánico, es un proceso complejo de modelar debido a la cantidad de variables que se deben considerar, a saber: geometría del cortador (Rajabov et al., 2012), cantidad de filos, tipo de mecanismo de corte, desintegración del material, forma de remoción, lubricación, temperatura, r. p. m., fuerza de avance (FA), etc. Se deben considerar también las características del material a ser cortado, que modifica la interacción herramienta/material en perforación de materiales rocosos (Bourgoyne et al., 1991) y, por tanto, también produce una modificación de la dinámica del proceso de corte relacionada con el tipo de material, constantes elásticas, fragilidad, ductilidad, dureza, granulometría, densidad, nivel de saturación de líquido y condiciones de tensión del ambiente que lo rodea, ya que diferentes entornos de confinamiento (equiaxial, poliaxial, nivel de tensión desviatoria, etc.) modifican el comportamiento ante la fractura para un mismo material (Peng y Zhang, 2007).

La información obtenida durante el monitoreo de procesos es cuantiosa. Para poder representar la evolución de estos procedimientos estocásticos es necesario el registro de grandes volúmenes de información donde la utilización de parámetros es una forma económica de resumir el comportamiento de la señal, siempre a coste de perder información. Los parámetros de EA sujetos a análisis pueden ser varios, y deben ser seleccionados en función del peso que tienen a la hora de describir el proceso que se desea monitorear. Es una práctica recomendada adicionar a los parámetros de la EA alguna variable adicional perteneciente al control del proceso, como por ejemplo la variación de la fuerza

de avance en el perforado, la temperatura, la presión, u otro indicador dinámico para correlacionar la información de la EA. Esto determina que la cantidad de variables que se debe manejar sea alta y convierta al análisis de la condición de proceso en un problema de características multiparamétrico, en donde los puntos máximos o mínimos del sistema se encuentran posiblemente en combinaciones no lineales entre estas variables.

Allí la matemática, los métodos de cálculo actuales y la tecnología se conjugan para proveer formas de análisis que reúnen varias de las características necesarias para modelar estos sistemas (Everson y Cheraghi, 1999; Philippidis, Nikolaidis y Anastassopoulos, 1998).

Para el presente trabajo, se utiliza una red neuronal de tipo Kohonen o mapa autoorganizado (SOM, por su sigla en inglés) el cual tiene la capacidad de crear una grilla planar (mapa) con neuronas que se agrupan para clasificar diferentes tipos de información según reglas de aprendizaje específicas.

Este tipo de red fue utilizada con éxito en diferentes aplicaciones, como la detección de fisuras en fabricación de mosaicos (Barrera, Carreón y Ruiz, 2005); clasificación de origen de aceites de oliva y medición de la reactividad de enlaces químicos (Zupan y Gastiger, 1993); mejora de las características de las señales (relación señal ruido) de la EA en el control de desgaste de herramientas de micro maquinado (Chen y Liao, 2003); análisis de modos de falla en materiales compuestos (Godin, Huguet y Gaertner, 2005); tratamiento de imágenes y señales en general; entre otras variadas aplicaciones (Kohonen, 2001).

METODOLOGÍA

Sistema de perforación: El sistema de perforación posee un equipo hidráulico con regu-

lación de avance de 120 bar de potencia, con 1000 mm de recorrido y propulsado con un motor de 4 hp trabajando hasta 3000 r. p. m., el cual está conectado a una caja reductora y a un variador de velocidad para controlar la velocidad de rotación de la broca (figura 1a). El instrumental de perforación se compone de cuerpo tubular de 1600 mm de longitud, donde en su extremo se fija la broca de perforación (figura 1b). de 65 mm diámetro con dos filos de carburo de tungsteno y un ángulo de punta de 162°. Adicionalmente, se cuenta con sistema de inyección de agua para la lubricación y extracción de material cortado. Este prototipo está adaptado para instrumentar directamente la broca de perforación (herramienta rotante) y obtener la señal de EA procedente del proceso de corte que se desarrolla en el extremo del cortador.

Probetas de material multicapa: Las probetas ensayadas son paralelepípedos de 320x320 mm de base y 400 mm de altura, compuestas por capas de material geológico (rocas) de diferentes características colocadas en forma de estratos (figura 2a). Una vez definidos estos estratos (capas de rocas), se cementaron con material en una proporción 3:0,8:0,2 de arena, cemento y cal, respectivamente. Estas unidades consolidadas conforman una muestra de ensayo sobre la cual se pueden realizar 4 perforaciones simétricas, como se observa en la figura 2b. Además, cada una de las muestras fue instrumentada con una guía de ondas con el fin de obtener la EA del proceso de perforación por un camino alternativo al de la columna de perforación y comparar así su desempeño.

Las probetas construidas de esta manera presentan gran heterogeneidad geométrica respecto del espesor de cada estrato, así como en el tallado para la conformación de cada capa (figura 3a, b y c). Esto produce que cada una de las probetas y de las perforaciones realizadas sean únicas e irrepetibles

En la [tabla 1](#). se detallan las composiciones de los dos tipos de probetas ensayadas para el presente trabajo. La muestra M1 contiene

dos tipos de rocas sedimentarias de diferente tamaño de grano y material constituyente. El primer estrato pertenece a un tipo de roca



Figura 1. a. Sistema completo de perforación con control de velocidad, central hidráulica, y herramienta de perforación. **b.** Detalle de la broca con cuerpo realizado en SAE 4140, dos filos de carburo de tungsteno y salidas de fluido.

Fuente: elaboración propia.

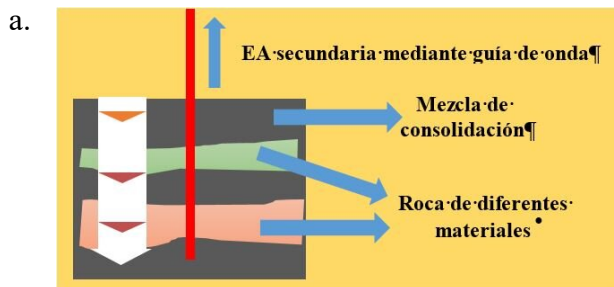


Figura 2. a. Croquis de la composición de las probetas donde se observan los diferentes estratos y la guía de onda que los atraviesa. **b.** Probeta con cuatro perforaciones y guía de onda cementada.

Fuente: elaboración propia.



Figura 3. a. Dos tipos diferentes de estratos con variación apreciable de espesor. b. Estratos con perforación para guía de ondas colocada. c. Diferentes estratos utilizados para ensamblar las probetas (arenisca, caliza y pizarra) y su tallado para montaje dentro de cada probeta

Fuente: elaboración propia.

determinado como arenisca, debido a su tamaño de grano, comparable con la sílice y observable a ojo desnudo. Este produce una fractura rugosa que, en general, se propaga por el material de unión de sus granos.

La segunda muestra utilizada está dentro de las llamadas lutitas, siendo específicamente esta una caliza. Son rocas sedimentarias de grano más fino que las areniscas, y esta en particular, se compone mayoritariamente por material producto de la sedimentación de moluscos marinos. Este tipo fractura en forma de escama paralela al sentido de deposición de sus elementos constitutivos. Debido a que es más densa que la arenisca, si bien es menos dura que esta, es de más difícil taladrado debido al tamaño y densidad en la deposición de sus minerales.

La muestra M2 consiste en una composición de material cementicio con dos capas alternadas de roca metamórfica denominada pi-

zarra; es densa (tamaño de grano muy fino), con placas de mica alineadas en sentido paralelo a la laminación. A su vez, se fractura en planos de debilidad paralelos a la laminación, con fracturas suaves o sedosas.

Sistema de emisión acústica: Para la adquisición y procesamiento de los datos se utilizó un sistema de EA de la marca Physical Acoustics Corporation (PAC), modelo DISP-4 de 4 canales, con capacidad de adquisición

Tabla 1. Probetas ensayadas con rocas sedimentarias y metamórficas

Nombre Composición	Arenisca	Caliza	Pizarra	No. de capas
Muestra 1 (M1)	X	X	-	2
Muestra 2 (M2)	-	-	X	2

Fuente: elaboración propia.

de parámetros característicos de la EA y formas de onda. Las señales fueron tomadas con dos sensores (uno en la probeta y otro en la broca) marca PAC modelo WD de banda ancha, con preamplificadores externos modelo 2/4/6 con ganancia ajustada en 20 dB para el sensor montado sobre la broca, y en 40 dB para el sensor montado en la probeta. El equipo se manejó en una PC con el software AE Win. Entre los parámetros medidos se registraron: amplitud, RMS, energía MARSE, cuentas, rise time, frecuencia media, centroide de frecuencia, duración, etc.

Arquitectura de red neuronal utilizada para análisis de probeta M2: La arquitectura de la red neuronal Kohonen creada consta de 400 neuronas dispuestas en forma de grilla toroidal de 20×20 neuronas, con una cantidad de cuatro vecinos por neurona y una función topológica de ajuste de vecindad tipo gaussiana. El criterio de la neurona ganadora se definió así: “la entrada más parecida al peso de una neurona resulta como ganadora”, con ajuste de pesos por datos y por época, y con una duración de entrenamiento de 400 épocas. El error de mezclado y de norma alcanzado en la etapa de entrenamiento fue del 5,9 % y 0,09, respectivamente. La red fue entrenada y simulada con un vector dato (VD) multiparamétrico de 5 componentes [Amplitud, energía MARSE, RMS, rise time, frecuencia promedio], extraído de la señal de EA de la broca y proveniente de la perforación. La cantidad de VD utilizados fue de 400 para el entrenamiento y 196 para la predicción. Estos VD fueron seleccionados gráficamente respecto de las señales de EA, pertenecientes a la perforación de las dos rocas de pizarra (513 VD) y al material cementicio (83 VD) para la probeta M2.

Desarrollo del ensayo: Las probetas M1 y M2 fueron taladradas en cuatro sectores, tomando señales representativas de cada proceso. El tiempo de taladrado en estos ensayos

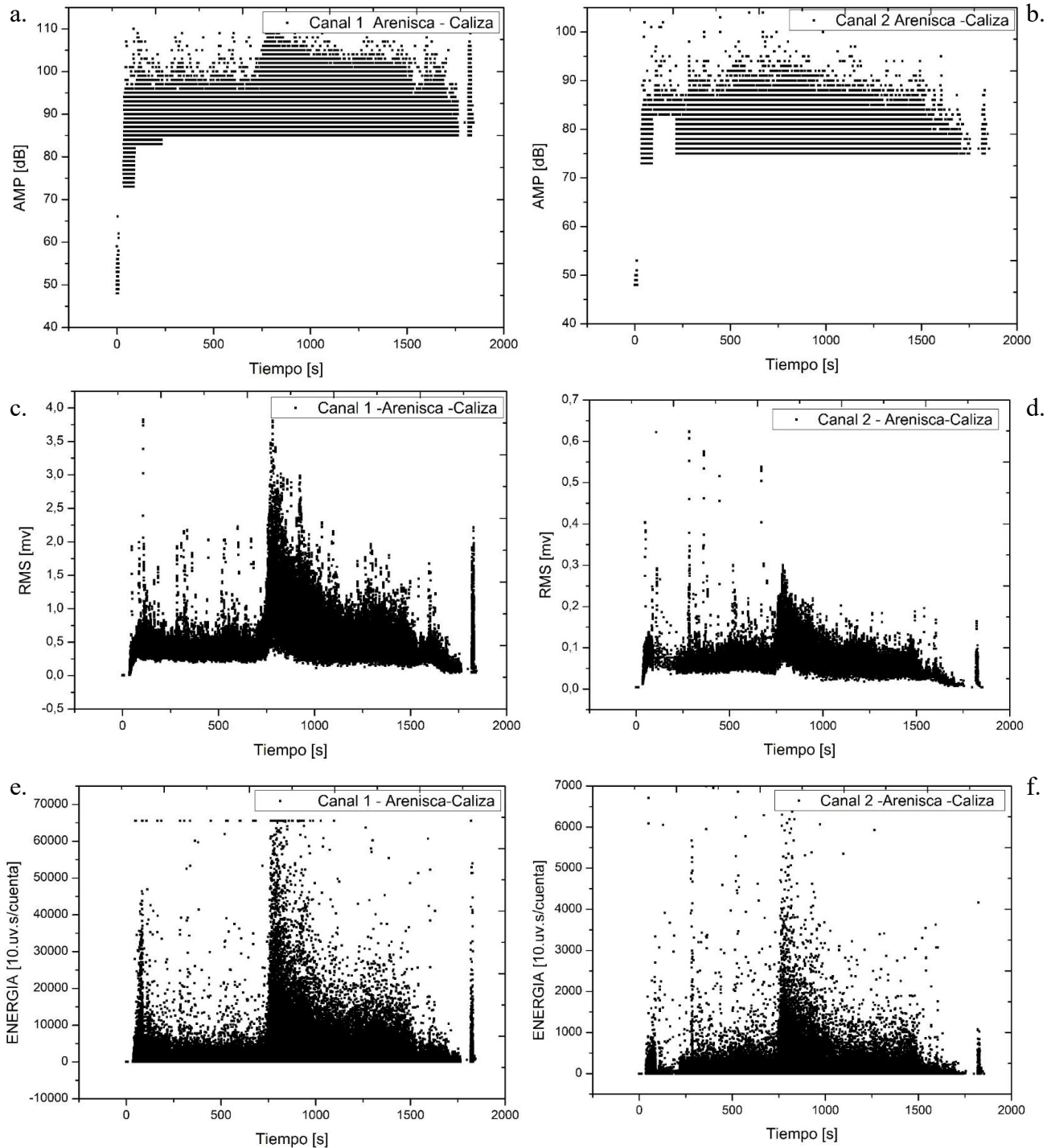
en particular promedió los 1800 s. La EA se adquirió de manera paralela sobre la herramienta (canal 1) y la probeta (canal 2), con el fin de comprar señales y comprobar el correcto funcionamiento de la instrumentación de la herramienta giratoria de perforación. Una vez taladradas las probetas M1 y M2, se analizó la información parametrizada. En la probeta M1 se caracterizaron las zonas de las interfaces respecto de las diferentes rocas taladradas, mientras que para la probeta M2 se utilizaron algunos de los parámetros de EA para entrenar y simular mediante una RNK, luego de un posprocesamiento de la señal que comprende selección de los datos, etiquetado y normalización, además del análisis de correlación entre variables.

RESULTADOS

Para la probeta M1, en la [figura 4a,b,c,d,e,f](#) se ilustran los parámetros amplitud [dB], energía MARSE [$\mu\text{v.s/cuentas}$] (área medida respecto de la envolvente de la señal rectificadora de EA) y RMS [v] de la EA para los canales 1 y 2. Se observa que el sistema montado directamente sobre la herramienta de trabajo recibe una potencia de señal de mayor amplitud (6 a 8 veces) que la señal obtenida a través de la probeta. Esto posiblemente sea debido a que las ondas ultrasónicas encuentran en el metal del cuerpo de la broca una conexión directa con el proceso y un camino con mucha menor atenuación que a través de las interfaces de la roca, cuyo material es más dispersivo y atenuante. El análisis de la amplitud muestra que es bastante difícil detectar las variaciones entre diferentes zonas de estas probetas compuestas por estos tres elementos. Por otro lado, los parámetros de energía MARSE y el valor RMS de la EA muestran zonas de variación más marcadas respecto de la amplitud para diferentes partes del ensayo de la muestra M1.

Estas variaciones pueden ser relacionadas (mediante análisis del material cortado y posición de la punta de la herramienta) con las correspondientes interfaces rocosas contra

las cuales se fue encontrando el cortador de carburo. Estas interfaces están marcadas en la [figura 5](#). y corresponden a:



Fuente: elaboración propia.

Figura 4a,b,c,d,e,f. Muestra una marcada variación de los parámetros de EA en función de los estratos perforados. a y b. Parámetro RMS de EA medido sobre el canal 1 (broca de perforación) y canal 2 (guía de onda colocada dentro de la probeta). c y d. Parámetro de energía MARSE para canales 1 y 2, respectivamente

Zona 1: inicio del proceso de taladrado sobre material de cementación de la probeta.

Zona 2: fin de zona 1 e inicio del taladrado de roca tipo arenisca.

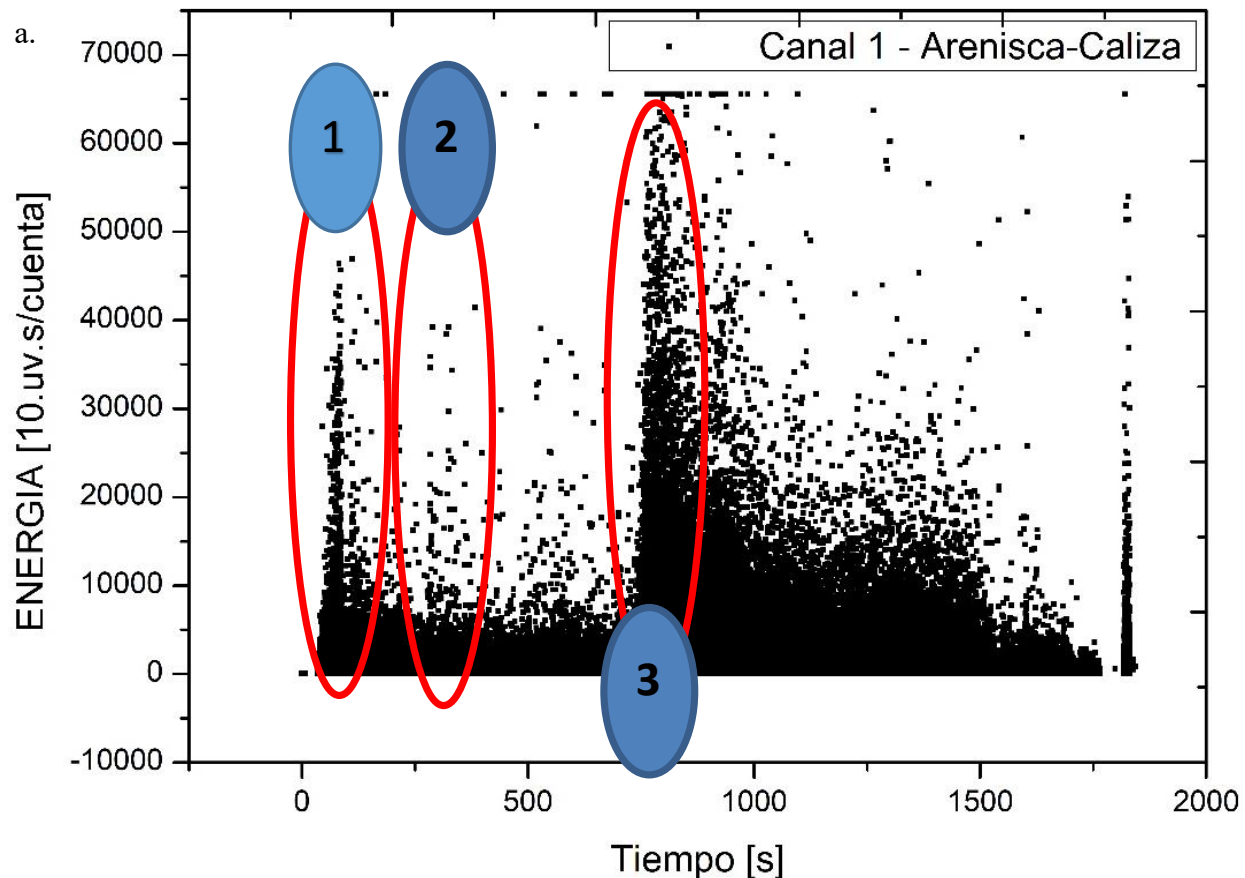
Zona 3: fin de elemento cementación e inicio de taladrado de roca tipo caliza.

Estas zonas características de inestabilidad se observan cuando la broca hace un cambio de interfaz entre diferentes materiales geológicos y se pueden relacionar al progresivo avance del cortador dentro del nuevo material que comienza a cortar.

Al inicio de cambio de interfaz, la velocidad de corte de la punta de la broca es cero (0) y crece radialmente hacia el diámetro

de esta, de manera que el primer contacto entre el cortador y la nueva interfaz se produce casi por indentación, más que por corte del material. Una vez que el cortador ingresó plenamente dentro del nuevo material, el corte se hace más estable y equilibrado, lo cual disminuye la tasa de emisión y la energía de la señal, y baja su amplitud máxima.

La comparación entre los canales 1 y 2 indicaría que la atenuación producida por el sustrato rocoso actúa como un filtro natural; así se disminuye la intensidad de la señal, en general, y las de alta frecuencia, en particular, ya que la atenuación es función creciente con la frecuencia. Esto permite tener una



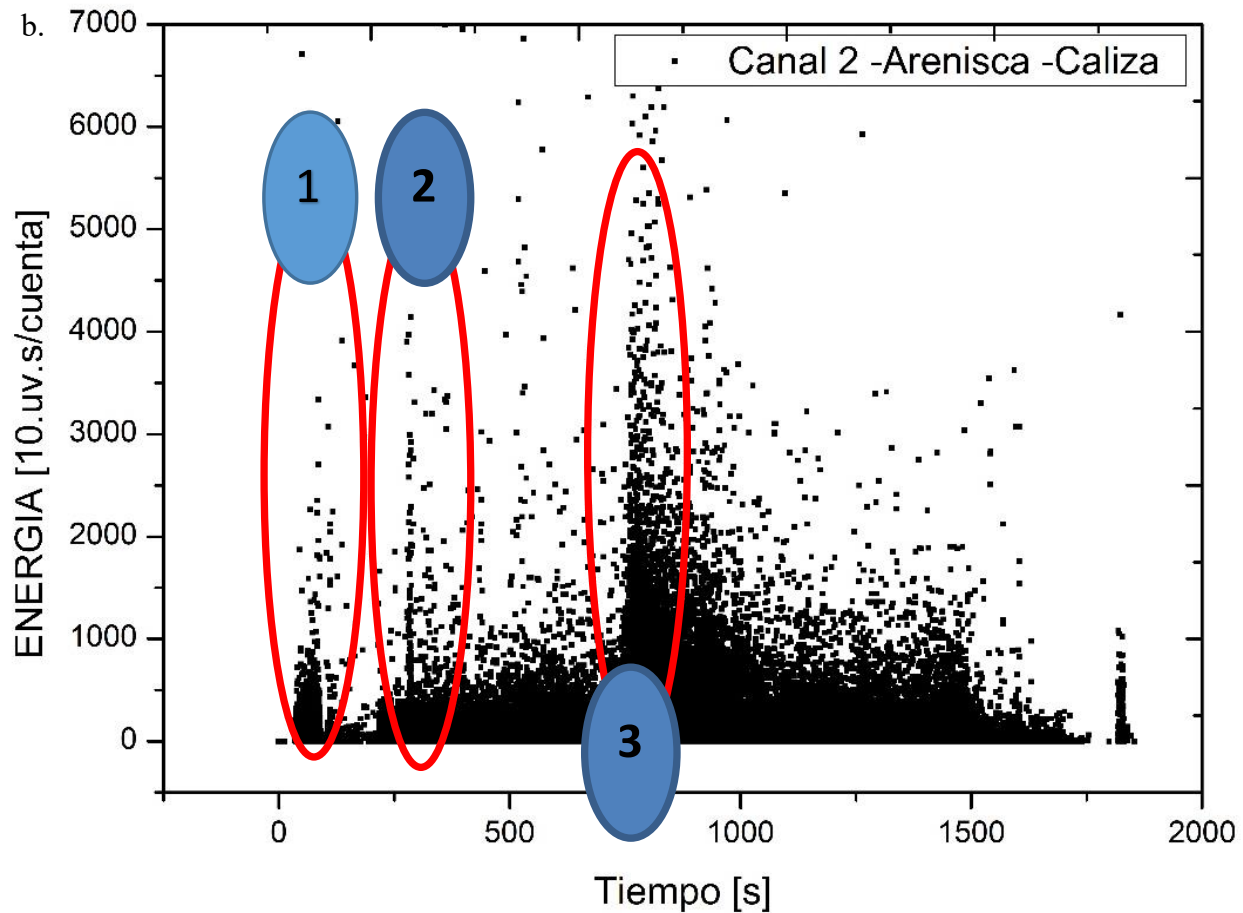


Figura 5. Marcación de zonas de interfaz identificadas mediante a. Energía MARSE para canal 1.
b. Energía MARSE para canal 2

Fuente: elaboración propia.

señal más limpia en la que se observan los cambios de interfaz de manera más clara. En contrapartida, parte de la información recibida por este canal puede ser perdida durante este efecto de filtrado natural.

Aquella proveniente de la herramienta de corte se muestra altamente correlacionada con la de la guía de onda de la probeta, mostrando que este canal de medición es representativo de las variaciones del proceso, con la ventaja de que no se necesita colocar una guía de onda por cada probeta a ensayar, ya que la cadena de medición es siempre la misma.

Para la probeta M2 –conformada por dos capas de roca pizarra cementadas–, también se pueden detectar estas interfaces, a medida que con la perforación se atraviesan los diferentes sustratos (figura 6).

La señal de EA proveniente de la instrumentación de la herramienta (canal 1) fue seleccionada en función de los gráficos para el proceso de entrenamiento y predicción de la RNK (figura 6). Estos tramos de información se etiquetaron como pizarra uno (P1), para el primer estrato de pizarra; pizarra dos (P2), para el segundo estrato, y finalmente, el elemento de consolidación, que se encuentra sobre, debajo y en medio de

las capas, se nombró cementicio (C). Estas etiquetas sirvieron para evaluar el desempeño de la red en la clasificación, durante el entrenamiento y posteriormente en la predicción.

Los resultados del mapa de entrenamiento de Kohonen de la [figura 7a](#). muestran una separación en clases de las señales pertenecientes al material C, respecto de los estratos de pizarra P1 y P2. Adicionalmente, la red tuvo la capacidad de diferenciar las señales provenientes de las dos rocas del mismo tipo de material metamórfico (P1 y P2), pero de diferente profundidad. Los resultados mostrados en la [figura 7b](#). corresponden a la simulación realizada en el mapa ya entrenado.

Estos datos nunca fueron procesados por la red hasta el momento de la simulación, y fueron clasificados con un error de mezclado y de norma inferior al 5 % y 0,04, respectivamente. Se respetan las zonas topológicas delimitadas por las neuronas que clasifican los datos de las señales C respecto de las de P1 y P2. También se observa la formación de subclúster entre P1 y P2, a pesar de ser el mismo material.

CONCLUSIONES

Los resultados indican que la EA tiene la capacidad de proveer información útil para distinguir diferentes materiales geológicos

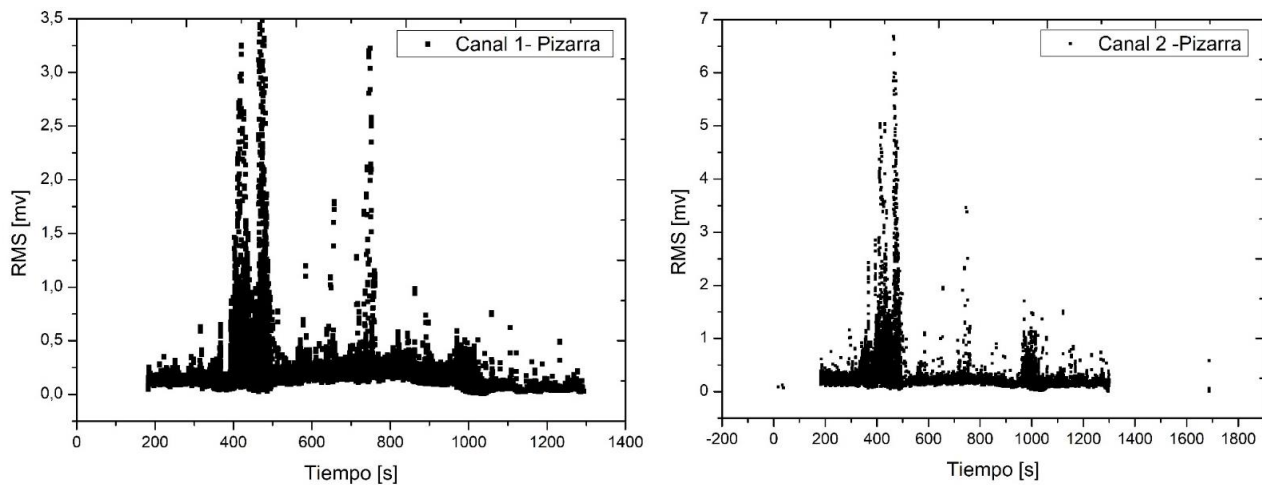


Figura 6. Medición del parámetro RMS de la EA para probeta M2 de roca pizarra, canal 1 y canal 2, respectivamente.

Fuente: elaboración propia.

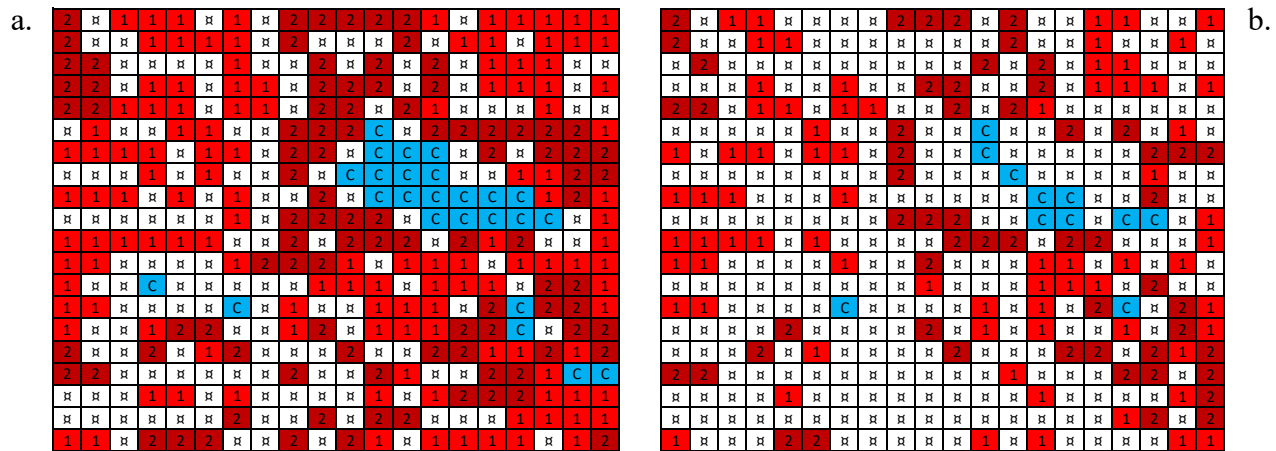


Figura 7a. Mapa de Entrenamiento de RNK para probeta M2 donde figuran P1, P2 y C.

Figura 7b: Mapa de simulación y clasificación para probeta M2 con datos desconocidos por la RNK

Fuente: elaboración propia.

durante el proceso de perforación a esta escala. El parámetro de amplitud máxima de la EA no muestra claramente los cambios de la dinámica de corte que se suceden en los estratos, mientras que la energía MARSE y el RMS de la señal muestran transitorios relacionados con el cambio de material que se está perforando, posiblemente debido a la progresiva penetración del cortador en este.

La composición intrínseca de la probeta de material geológico filtra naturalmente la señal de EA, produciendo que las señales registradas por la guía de ondas dentro de la probeta sean de menor amplitud que las registradas directamente sobre la broca. Ambas señales mostraron una alta correlación de eventos, lo cual valida la utilización de la instrumentación sobre la broca como método para el monitoreo del proceso.

Con la información paramétrica de EA proveniente de la broca se logró entrenar y simular una RNK que mostró capacidad de clasificar la información perteneciente a cada tipo de material por separado, con un error de mezcla inferior al 5 %.

FINANCIAMIENTO

Esta investigación se desarrolló en el marco de una tesis de doctorado avalada y financiada por la Universidad Tecnológica Nacional (UTN) de la República Argentina.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la empresa CARSOL S.R.L. por su valiosa colaboración y aporte en la construcción del prototipo de perforación.

REFERENCIAS

Barrera, G., Carreón, G. y Ruiz, A. (2005). Control de calidad de piezas cerámicas por medio de análisis de vibraciones y redes neuronales artificiales. *Computación y Sistemas*, 8, 187-195.

- Bourgoyne Jr., A. et al. (1991). Applied drilling engineering. Richardson, EE. UU.: Society of Petroleum Engineers.
- Chen, Y. y Liao, Y. (2003). Study on wear mechanisms in drilling of Inconel 718 superalloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 140, 269-273.
- Dornfeld, D. y Kannatey-Asibu, E. (1980). Acoustic emission during orthogonal metal cutting. *International Journal of Mechanical Sciences*, 22, 285-296.
- Everson, C.E. y Cheraghi, S.H. (1999). The application of acoustic emission for precision drilling process monitoring. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 39, 371-387.
- Godin, N., Huguet, S. y Gaertner, R. (2005). Integration of the Kohonen's self-organising map and k-means algorithm for the segmentation of the AE data collected during tensile tests on cross-ply composites. *NDT&E International*, 38(4), 299-309.
- Gómez, M.P. (2012). Estudio de las señales de EA generadas en el proceso de corte de metales. Aplicaciones a procesos de taladrado. [Tesis de doctorado]. Universidad Nacional de General San Martín (UNSAM). Buenos Aires, Argentina.
- Gómez, M.P., Hey, A.M., D'Attelis, C.E. y Ruzzante, J.E. (2012). Assessment of cutting tool condition by acoustic emission. *Procedia Materials Science*, 1, 321-328.
- Gómez, M.P., Hey, A.M., Ruzzante, J.E. y D'Attellis, C.E. (2010). Tool wear evaluation in drilling by acoustic emission. *Physics Procedia*, 3, 819-825.
- Grabec, I. y Leskovar, P. (1977). Acoustic emission of a cutting process. *Ultrasonics*, 15(1), 17-20.
- Jemielniak, K. y Otman, O. (1998). Tool failure detection based on analysis of acoustic emission signals. *Journal of Materials Processing Technology*, 76(1-3), 192-197.
- Kohonen, T. (2001). Self-Organising maps. Heidelberg: Springer Verlag.
- Mascaro, B., Gibiat, V., Bernadou, M. y Esquerre, Y. (2005). Acoustic emission of the drilling of carbon/epoxy composites. Paper presented at the Forum Acousticum. Budapest, Hungría.
- Peng, S. y Zhang, J. (2007). Engineering geology for underground rocks. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Philippidis, T., Nikolaidis, V. y Anastasopoulos, A. (1998). Damage characterization of carbon/carbon laminates using neural network techniques on AE Signals. *NDT&E International*, 31(5), 329-340.
- Rajabov, V. et al. (2012). The effects of back rake and side rake angles on mechanical specific energy of single PDC cutters with selected rocks at varying depth of cuts and confining pressures. En *IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition* (pp. 205-222). California, Estados Unidos.
- Saini, D. y Park, Y. (1996). A quantitative model of acoustic emission in orthogonal cutting operations. *Journal of Materials Processing Technology*, 58, 343-350.

Zupang, J. y Gasteiger, J. (1993). Neural networks for chemists. An introduction. Nueva York: VCH, Weinheim.





Análisis de expansión de una microrred en una zona no interconectada

Expansion analysis of a microgrid in a non-interconnected zone

Daniel Nicolás González Cely¹ , Alejandro Muñoz Rincón² , Maximiliano Bueno López³ 

Cómo citar: González C., D.N., Muñoz R., A. y Bueno L., M. (2020). Análisis de expansión de una microrred en una zona no interconectada. *Tecnura*, 24(63) 40-56. DOI: <https://doi.org/10.14483/22487638.15480>

Fecha de recepción: 10 de junio de 2019

Fecha de aceptación: 18 de octubre de 2019

RESUMEN

Contexto: En zonas no interconectadas, la utilización de microrredes se ha convertido en la única alternativa que tienen las personas para acceder al servicio de energía eléctrica. Debido a esto, es necesario optimizar estos sistemas y, de ser posible, expandir las ya existentes para aumentar la cobertura y de esta manera apoyar el cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible 7, planteado por Naciones Unidas: energía asequible y no contaminante.

Metodología: Se presentan dos casos de expansión para una microrred basada en un sistema de generación fotovoltaica que se encuentra en una zona no interconectada de Colombia. Se realiza el análisis de generación eléctrica del sistema mediante Matlab/Simulink, mientras que el análisis de pequeña señal para verificar la estabilidad es ejecutado a través de Neplan. Así se logra establecer una metodología que permite definir la capacidad de expansión de una microrred.

Resultados: A partir del análisis de estabilidad de pequeña señal realizado en Neplan se obtienen los valores propios del sistema, tanto de la micro-

red actual como de los dos casos de expansión, con el fin de garantizar la estabilidad en la microrred ante tres escenarios diferentes: cargas no lineales, aumento de potencia demandada y generada.

Conclusiones: En los sistemas de generación solar fotovoltaica ubicados en zonas no interconectadas y operando en modo isla, los inversores influyen en la estabilidad de frecuencia considerablemente, debido a que la reducida inercia en estos sistemas conduce a una variación más rápida de este parámetro. Por esto, el análisis de estabilidad de pequeña señal es el método indicado para estudiar el comportamiento de microrredes ante variaciones de potencia demandada y generada, particularmente en los sistemas que operan en las zonas no interconectadas, porque ante pequeñas perturbaciones es posible identificar los cambios en la dinámica del sistema.

Palabras clave: análisis de pequeña señal; generación distribuida; microrredes; sistema solar fotovoltaico.

ABSTRACT

Context: The use of microgrids in non-interconnected areas has become the only alternative that people living in these regions have to access the

1 Ingeniero electricista. Universidad de La Salle. Bogotá, Colombia. Contacto: danielngonzalez28@unisalle.edu.co
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2500-4641>

2 Ingeniero electricista. Universidad de La Salle. Bogotá, Colombia. Contacto: amunoz44@unisalle.edu.co
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1438-0721>

3 Ingeniero electricista, magíster en Ingeniería Eléctrica, doctor en Ingeniería. Docente en el Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control. Universidad del Cauca. Popayán, Colombia. Contacto: mbuenol@unicauca.edu.co
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7959-9962>

electricity service. Because of this it is necessary to optimize the use of these systems and if it is possible to expand existing ones to increase coverage and, in that way, support the implementation of the sustainable development goal 7 set by United Nations: Ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all.

Methodology: In this paper, we present two cases of expansion for a microgrid based on a photovoltaic generation system that is located in a non-interconnected area of Colombia. The analysis of the electrical generation of the system is carried out using Matlab/Simulink and the small signal analysis to evaluate the stability is executed in Neplan. Based on the above, it is possible to establish a methodology that allows to define the expandability of a microgrid.

Results: From the small signal stability analysis performed in Neplan, the system's own values are obtained, both from the current microgrid and

from the two cases of expansion, this in order to guarantee the property of stability in the micro grid in three different scenarios; non-linear loads, increased power demanded and generated.

Conclusions: In photovoltaic systems located in non-interconnected areas and operating in island mode the inverters influence frequency stability considerably, because the reduced inertia in these systems leads to a faster frequency variation. This is why the analysis of small signal stability is the method indicated to study the behavior of microgrids before variations in demand and generated power, particularly in systems that operate in areas not interconnected, because with small disturbances it is possible to identify the changes in the dynamics of the system.

Keywords: small signal stability analysis; microgrids; distributed generation; photovoltaic system.

INTRODUCCIÓN

Una microrred es un sistema de energía integrado que consta de cargas interconectadas y recursos de energía distribuida, que puede funcionar en paralelo a la red convencional o de forma aislada (Stevanoni, De Grève, Vallée y Deblecker, 2019). Las microrredes surgen como un sistema que beneficia la operación y cobertura de los sistemas de potencia para economías en desarrollo (Louie, 2018; Correa, Marulanda y Panesso, 2017). Es el caso del Resguardo Indígena Calle Santa Rosa, que aprovecha los beneficios de una microrred basada en un sistema de generación solar fotovoltaica para cubrir algunos servicios básicos. En Bueno-López y Garzon-Lemos (2017) se presenta en detalle la estructura de la microrred mencionada, la cual básicamente satisface algunas necesidades para refrigeración de alimentos y un centro educativo. También posee un sistema de monitoreo de las baterías que permite gestionar la demanda (Aabrek, Forseth, Bueno-López y Molinas,

2018). Sin embargo, la microrred no cuenta con la capacidad suficiente para abastecer la demanda de toda la comunidad; por esto se analiza la posibilidad de expandir el sistema. Uno de los desafíos a resolver es el de la estabilidad, ya que para los sistemas solares la naturaleza variable de la generación no tiene en muchos casos ningún impacto considerable en la estabilidad de frecuencia; pero, las características constructivas de los inversores fotovoltaicos influyen en la estabilidad de frecuencia considerablemente, es decir, la reducida inercia de estos sistemas conduce a un cambio de rango de frecuencia más rápido y a unas caídas de frecuencia más profundas (Song, Hill y Liu, 2019; Giral, Celedón, Galvis y Zona, 2017).

Para solucionar la problemática mencionada, se realiza una investigación de los campos de indagación relacionados con los sistemas fotovoltaicos y la estabilidad en microrredes. La revisión de Bastidas, Oviedo y Solano (2017) muestra los problemas de estabilidad que se encuentran habitualmente en una microrred,

organizados según la naturaleza de sus causas: pequeña señal, transitoria y de tensión. Este mismo estudio plantea estrategias de dimensionado y posicionamiento de unidades de generación distribuida por medio de las cuales se mejora la estabilidad del sistema.

Majumder (2013) investiga algunos aspectos de la estabilidad en microrredes, identifica varias razones de los problemas de estabilidad en varias de estas y describe el enfoque generalizado para mejorar la estabilidad del sistema. Los aspectos transitorios, pequeña señal y estabilidad del voltaje en cada tipo de microrred los relaciona junto con el alcance de las mejoras.

Por su parte, Ramírez y Aquino (2009) presentaron una metodología y algunos resultados en el análisis de estabilidad de pequeña señal del Sistema Eléctrico de Pereira, trabajo que fue realizado por medio del software Neplan. También, utilizaron el método de análisis modal para el estudio de estabilidad de pequeña señal del sistema. A partir de este estudio fue posible concluir que dicho software ofrece varias ventajas frente a otros similares para estos análisis.

En cambio, He, Wu, Xu y Guerrero (2019) observaron la estabilidad de una microrred considerando variaciones en las unidades de generación, desde el enfoque de control automático.

En este artículo se propone una expansión para una microrred aislada, de tal forma que el sistema sea estable ante diferentes perturbaciones que puedan presentarse ante su operación normal; es decir, aumentar la cobertura del sistema conservando las condiciones técnicas necesarias de operación. Así, fue posible obtener diferentes escenarios y se analizaron los resultados; luego se determinaron las condiciones que debe tener la microrred para operar satisfactoria-

mente sin perder la estabilidad y, adicionalmente, aumentar la confiabilidad.

METODOLOGÍA

Con el objetivo de brindar una guía para analizar la posible expansión de una microrred, a continuación se esboza la información que debe ser considerada en este proceso.

Recolectar información de la zona no interconectada (ZNI)

Se debe disponer información específica de la zona en la cual se encuentra ubicada la microrred, específicamente se busca información acerca de:

- Microrred instalada: identificar la ZNI y si se encuentra instalada alguna microrred de tipo solar fotovoltaico.
- Condiciones de la carga: número de usuarios, ubicación y distancia entre ellos; área promedio de vivienda; área disponible para instalación de generadores y almacenadores, y aplicación del servicio de energía.
- Condiciones de la zona: temperatura ambiente mínima, máxima y promedio; altura sobre el nivel del mar; densidad de descargas atmosféricas; resistividad aparente del terreno; identificación de ambientes salinos o húmedos, y usos del suelo.

Identificar topología de la microrred

Se debe determinar la topología de la microrred, es decir ubicación y distribución de los equipos de generación, configuración y trazado de la red de distribución, longitudes de ramales, niveles de voltaje, calibre de conductores y toda la información pertinente para elaborar un diagrama unifilar de la red, y asimismo modelarla y simularla.

Estimar nuevos perfiles de carga

A partir del diagrama unifilar de la red y su respectiva modelación y simulación, se estiman nuevos usuarios que puedan conectarse a la red, con el fin de lograr mayor cobertura. Cabe resaltar que se deben mantener las condiciones técnicas de la red y no llevarlas a niveles de funcionamiento que no pueda cumplir.

Determinar alternativas de expansión

Con la modelación y simulación de la microrred original y posibles nuevos perfiles de carga, se determina qué alternativas de expansión se pueden llevar a cabo, ya sea aumentando el nivel de generación o, en caso de que existan, acoplando dos sistemas independientes en la zona, para aumentar la generación y lograr así mayor cobertura.

Evaluación de los equipos de la microrred existente

A partir de las alternativas de expansión planteadas es necesario e importante determinar la capacidad de los equipos y verificar si cumplen con las condiciones para la expansión, es decir: capacidad del banco de baterías, potencia del inversor, potencia del regulador y demás.

Realizar análisis de la expansión

Una vez escogidas las alternativas de expansión se realiza su respectivo análisis, para así modelar y simular el nuevo sistema diseñado,

y determinar si su funcionamiento es correcto. Esto con ayuda del parámetro de estabilidad en microrredes y puntualizando en el análisis de pequeña señal que el software Neplan permite realizar.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE PRUEBAS

La microrred empleada para el estudio de caso se describe en la [tabla 1](#). A partir de esta información se modela y se realiza la simulación, de manera que se pueda analizar el sistema actual y, posteriormente, planear los posibles casos de expansión ([Bueno-López y Garzón-Lemos, 2017](#)).

Simulación microrred actual

Sistema de energización en centro educativo

La microrred del centro educativo tiene una estructura con un sistema fotovoltaico de 1500 W y una carga con un consumo de 750 W. El sistema fotovoltaico se implementó con un banco de baterías y un inversor, como se muestra en la [figura 1](#). La simulación del arreglo fotovoltaico de la escuela y del centro de refrigeración se realizó en MatlabR2016a/Simulink.

El resultado representa que la demanda de energía de la escuela es cubierta por los paneles fotovoltaicos en los periodos donde la irradiación es mayor o igual a 1000 W/m^2 . La

Tabla 1. Descripción del sistema actual

Sistema	Generación distribuida	Características de funcionamiento
Sistema de refrigeración	Energía solar PV	El sistema alimenta una carga DC de 830 W. La potencia máxima que puede generar es de 1000 W.
Escuela	Energía solar PV	El sistema alimenta una carga de 750 W a 120 V / 60 Hz. La potencia máxima que puede ser generada es de 1500 W.

Fuente: elaboración propia.

figura 2. muestra la potencia máxima obtenida a partir de los parámetros indicados en la tabla 2.

Simulación en centro de refrigeración

La microrred propuesta para el centro de refrigeración tiene un sistema fotovoltaico de 1000 W. La figura 3. muestra el diagrama unifilar para esta red la cual no contiene inversor, ya que todas las cargas son de tipo

DC. La carga se determina al observar la figura 4, donde es posible ver la potencia que necesita un refrigerador bajo un patrón de uso residencial típico dadas las temperaturas variables. Con una temperatura promedio de 29 °C el consumo de energía por día es aproximadamente de 200 W h/día, lo que corresponde a un consumo de energía de 8,33 W h (Aabrek et al., 2018).



Figura 1. a. Diagrama unifilar de la escuela. b. Unidad componente del sistema de refrigeración

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Descripción del sistema actual

Símbolo	Parámetro	Valor	Unidad
	Potencia máxima	213,15	W
V_{OC}	Voltaje circuito abierto	36,3	V
I_{CC}	Corriente de corto circuito	7,84	A
V_{mp}	Tensión en el máximo punto de potencia	29	V
I_{mp}	Corriente en el punto máximo de potencia	7,35	A
T	Temperatura de la celda	25	°C

Fuente: elaboración propia.

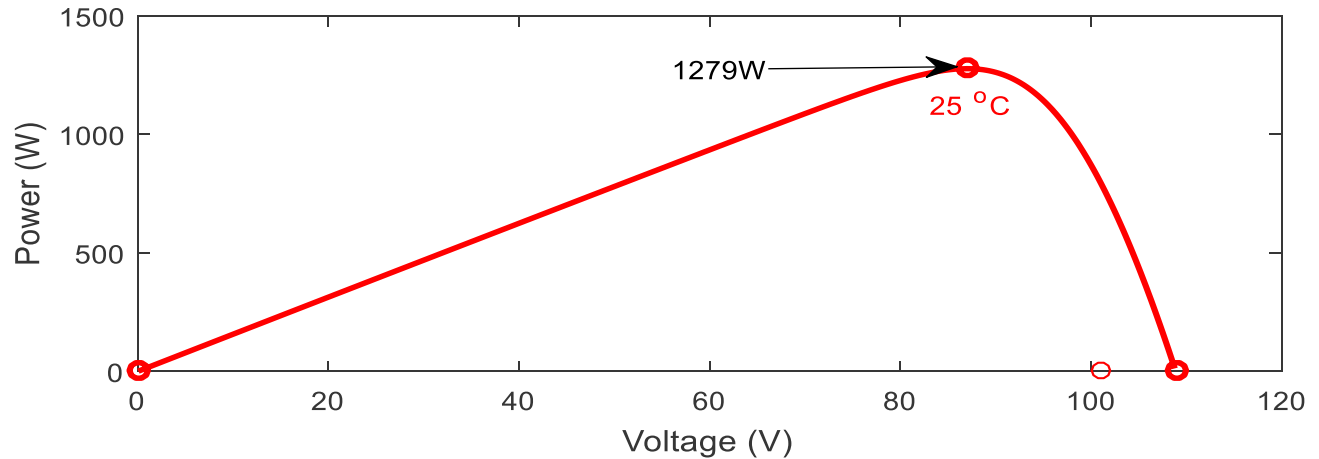


Figura 2. Simulación arreglo PV escuela. Configuración de paneles; 3 en serie y 2 paralelos
Fuente: elaboración propia.

La [figura 4](#). demuestra que la demanda del centro de refrigeración es cubierta por los paneles fotovoltaicos en los periodos donde la irradiación es mayor o igual a 1000 W/m^2 . Los parámetros del arreglo FV establecidos para obtener una potencia máxima de $837,9 \text{ W}$ son los de la [tabla 2](#), ya que se utiliza el mismo panel del sistema de la escuela.

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

El análisis de estabilidad fue desarrollado mediante el simulador NEPLAN. Una vez mode-

lado el sistema a partir de los valores nominales de los equipos y la carga, se realiza el flujo de carga para identificar los valores de operación y el correcto funcionamiento del sistema.

Las [figuras 5 y 6](#). demuestran que los sistemas operan correctamente en estado estacionario, porque es claro que el flujo converge, los valores de tensión se mantienen en el rango esperado y no se presenta sobrecarga en las líneas y equipos.

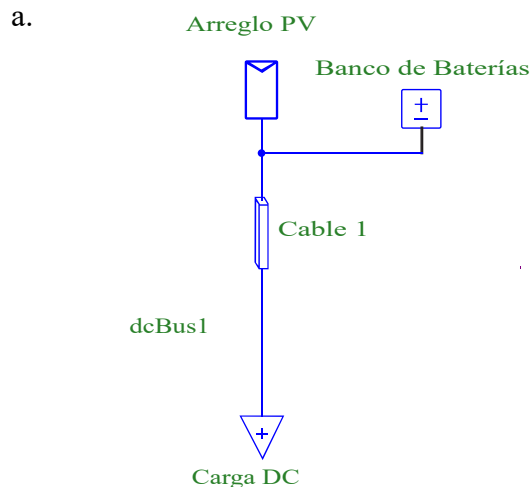


Figura 3. a. Diagrama unifilar del centro de refrigeración. **b.** Visión nocturna del centro educativo con servicio de energía eléctrica

Fuente: elaboración propia.

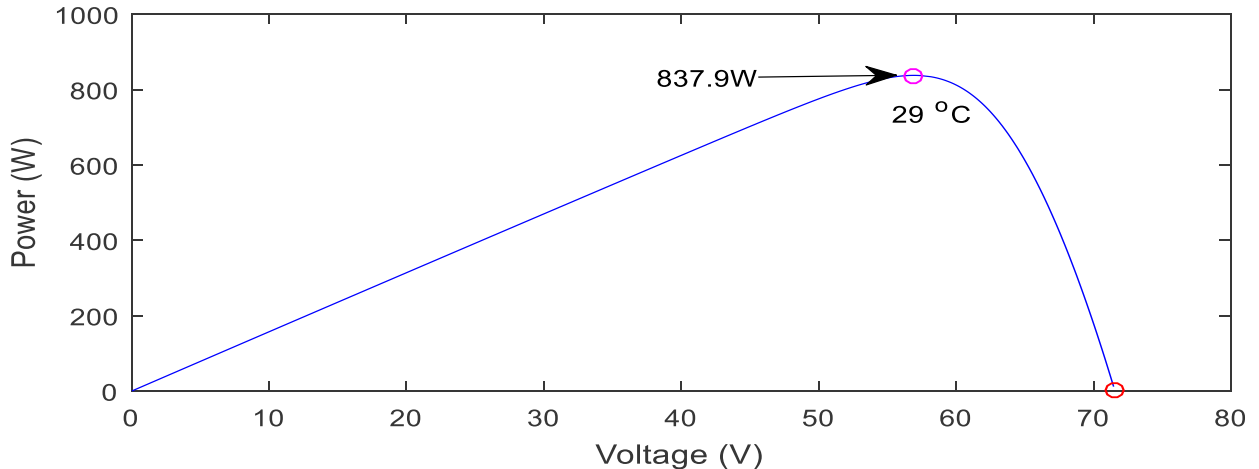


Figura 4. Simulación arreglo PV centro de refrigeración. Configuración de paneles; 2 en serie y 2 paralelos.
Fuente: elaboración propia.

Para verificar la estabilidad del sistema se analiza la estabilidad de pequeña señal en Neplan. El resultado se ilustra en la [figura 7](#), donde se demuestra que tanto el sistema de la escuela (7a) como el del centro de refrigeración (7b) son estables ante los parámetros de generación y carga establecidos para cada uno. Es decir, la carga se alimenta adecuada-

mente y el suministro de energía es constante ([Dias, Garcés y González, 2017](#)).

PROPUESTA DE EXPANSIÓN

A partir de la microrred instalada en el resguardo indígena se realiza una propuesta de expansión para aumentar la cobertura

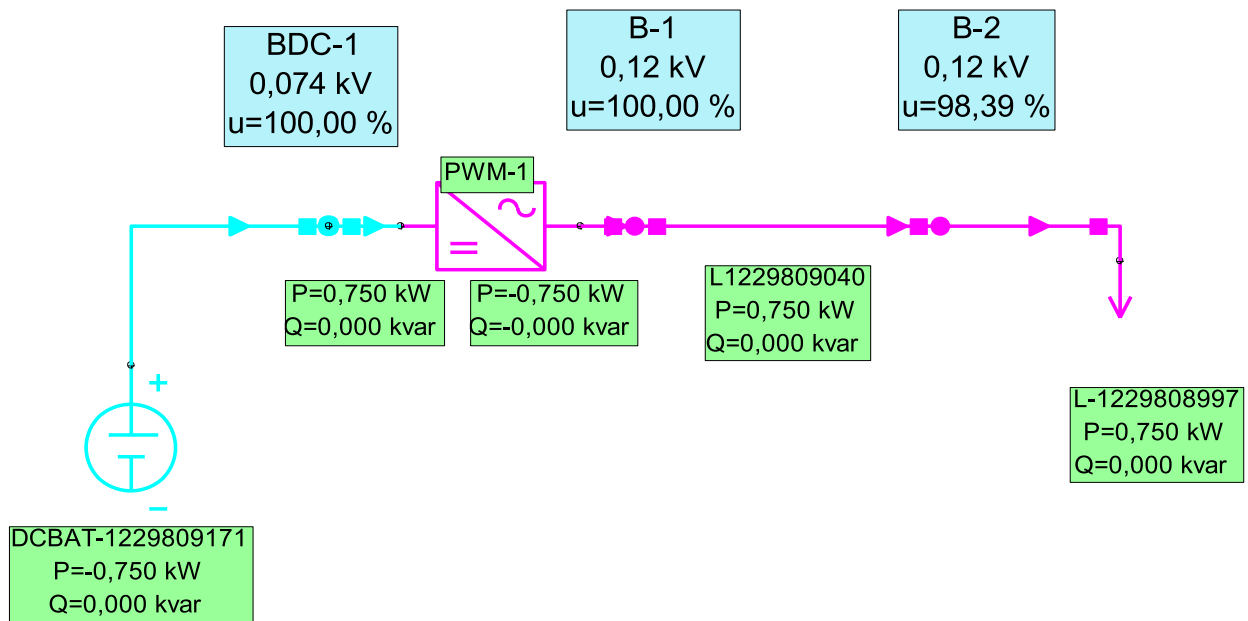


Figura 5. Flujo de carga del sistema instalado en la escuela.
Fuente: elaboración propia.

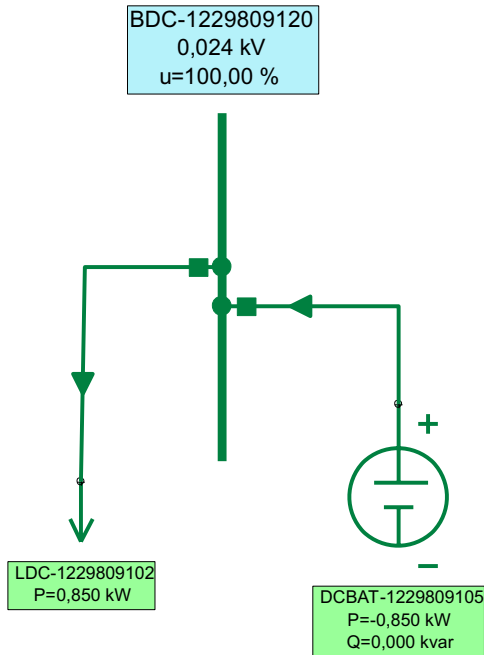


Figura 6. Flujo de carga del sistema en el centro de refrigeración

Fuente: elaboración propia.

del sistema. Se llevan a cabo dos casos de expansión para determinar cuál de los dos sería más viable. En consecuencia, se tiene en cuenta el acople de los dos sistemas de generación a un mismo nodo y el aumento de generación de los paneles fotovoltaicos para dejar un solo centro de generación. Es importante resaltar que la expansión de la microrred busca abastecer a más usuarios y aumentar la confiabilidad del sistema.

Caso I

En el primer caso se presenta una propuesta de acoplamiento entre los dos sistemas existentes, como se muestra en la [figura 8](#).

El sistema acoplado se modela teniendo en cuenta el nodo DC donde se conectarán cargas netamente de corriente continua y el inversor DC/AC el cual hará la conversión a corriente alterna para conectar las cargas AC que sean requeridas.

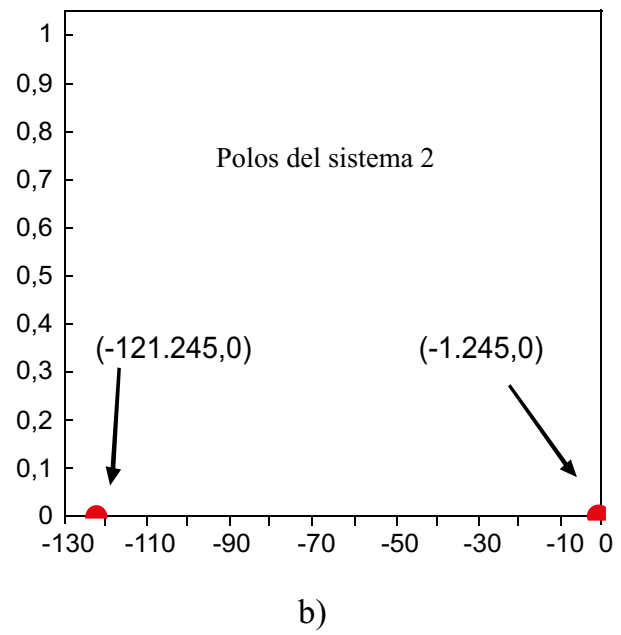
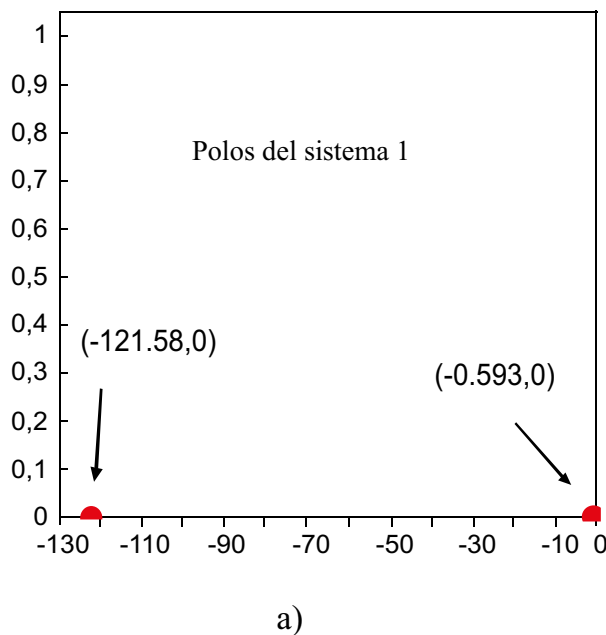


Figura 7. a. Estabilidad del sistema de la escuela. **b.** Estabilidad del centro de refrigeración

Fuente: elaboración propia.

Al realizar el flujo de carga se puede observar que este cumple adecuadamente y es coherente; es decir, converge, y las tensiones en las barras es correcta, puesto que sus valores están en 0,98 y 1 en p.u. Además, no se presentan elementos ni líneas sobrecargadas, lo cual indica que su implementación en el software es exitosa y logra suplir la de-

manda tanto de la carga DC como AC, a la vez que mantiene las condiciones técnicas de la microrred.

Es importante resaltar que al realizar el acople se busca aumentar la potencia de generación y con base en dicha potencia es que se lleva a cabo la implementación en el software y se

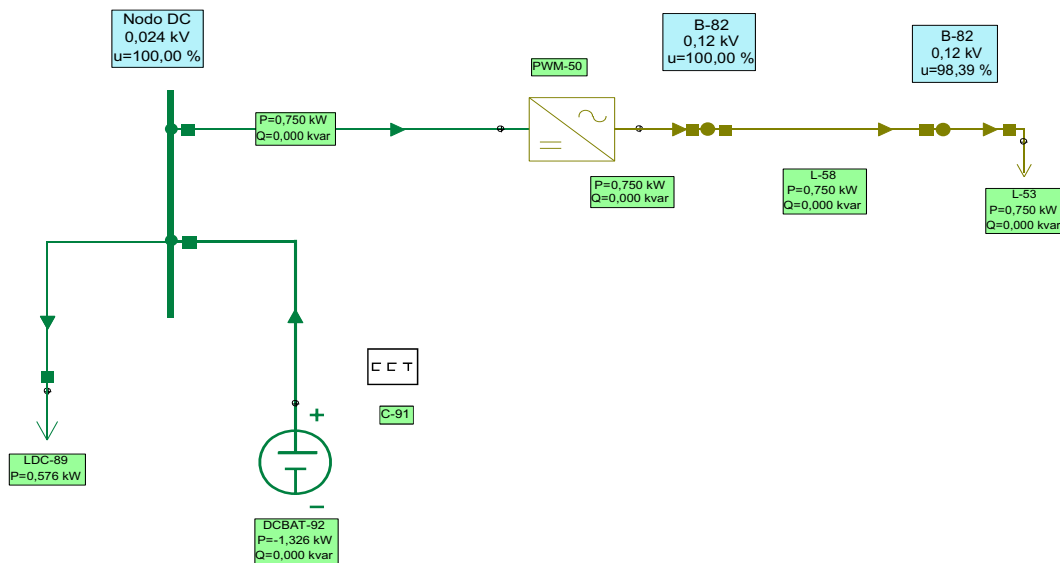


Figura 8. Acople de los dos sistemas.

Fuente: elaboración propia.

simula con una única fuente de generación la cual es dada por el acople de los arreglos fotovoltaicos. Por otro lado, cabe resaltar que los bancos de baterías quedan independientes precisamente para asegurar un respaldo en caso de que alguno de los dos falle.

Posteriormente se analiza la estabilidad de pequeña señal por medio de la herramienta que se encuentra en Neplan, como se hizo para los sistemas 1 (sistema escuela) y 2 (sistema centro de refrigeración). De esto se obtuvo una ubicación de polos como se muestra en la [figura 9](#).

De la [figura 9](#), se puede determinar que la propuesta de expansión cuenta con dos polos en el semiplano complejo izquierdo en

las coordenadas (-121,9; 0) y (-0,978; 0). Esto indica que el sistema es estable, es decir, que las cargas se están alimentando adecuadamente y el suministro de energía es constante. Además, el sistema, a pesar de que cuenta con cargas DC y AC, funciona correctamente.

Al considerar un aumento de carga, se busca demostrar que el sistema es robusto ante pequeñas perturbaciones, es decir, mantiene su estabilidad sin importar dichos cambios. Esto se refleja en el análisis de pequeña señal que se realiza al aumentar cargas DC y AC en el sistema, como se muestra en la [figura 10](#).

Al aumentar la carga se observa en la [figura 11](#), que el sistema se mantiene estable,

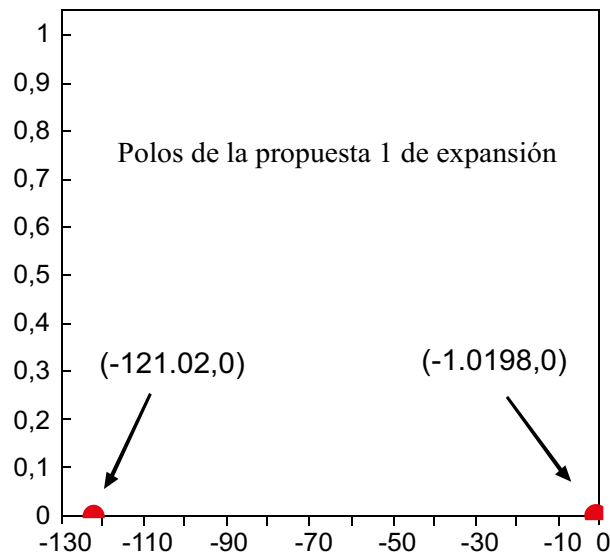


Figura 9. Valores propios al unir los dos sistemas
Fuente: elaboración propia.

esto se determina a partir de la ubicación de los polos. En este caso existe un polo más pero no aparece en la figura debido a que su valor es muy pequeño (-0,018; 0). Por otro lado, los otros polos están en las coordenadas (-0,508; 0) y (-121,244; 0) respectivamente. Los valores son similares a los obtenidos en la [figura 9](#). Pero estos varían con el aumento de carga y su

diferencia radica en que la perturbación del sistema es muy pequeña. Esto cumple con el concepto del análisis de estabilidad de pequeña señal. Luego de comprobar que el sistema al aumentar las cargas lineales mantiene su estabilidad, se realiza la prueba conectando una carga no lineal al nodo AC, esta carga tiene las características mostradas en la [tabla 3](#).

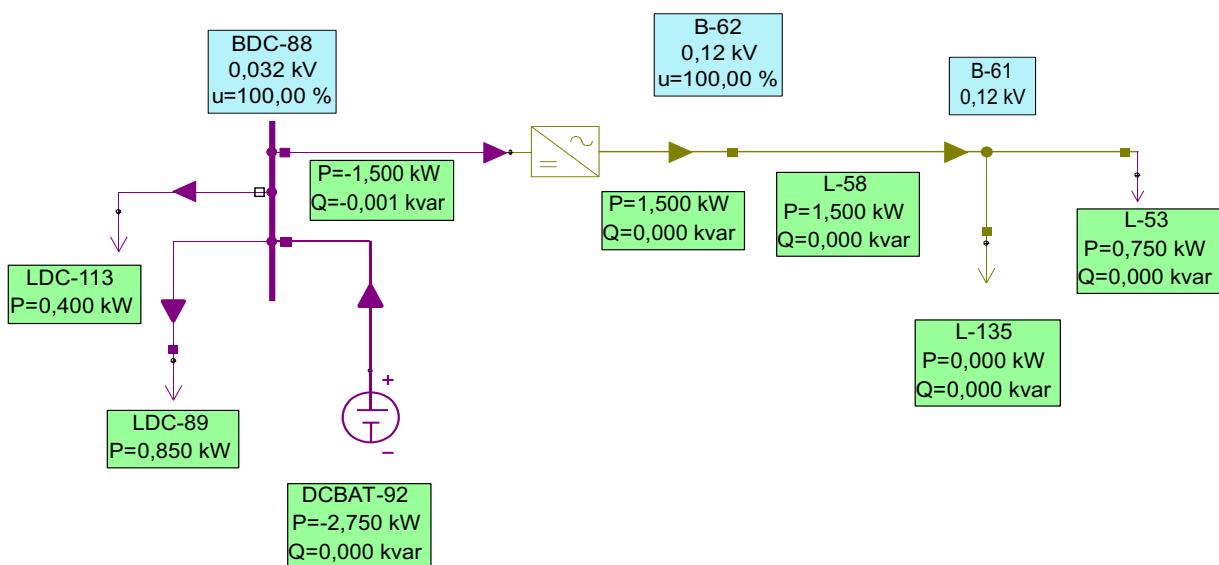


Figura 10. Efecto del aumento de carga
Fuente: elaboración propia.

La potencia reactiva positiva indica que la carga es de tipo inductivo. Al realizar el flujo de potencia con la nueva carga se aumen-

ta la potencia de la fuente, debido a que la conexión de esta nueva carga demanda más energía; es importante resaltar que no se ve

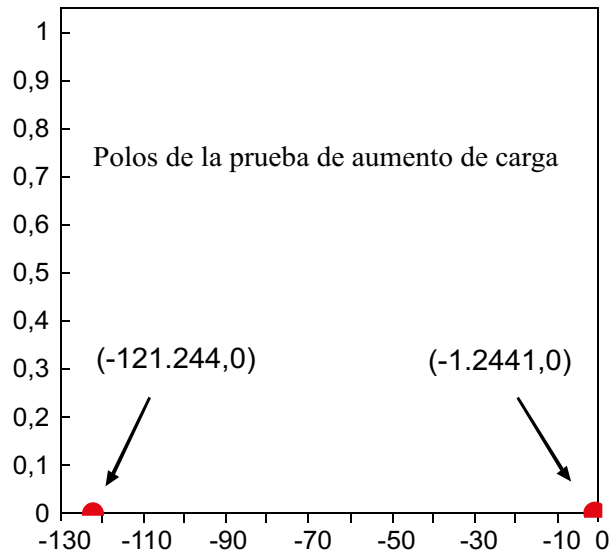


Figura 11. Valores propios del aumento de carga

Fuente: elaboración propia.

afectada la convergencia del flujo, y este cumple correctamente como en los casos anteriormente mencionados. Luego se lleva a cabo el análisis de pequeña señal, del cual se obtienen los valores propios del sistema, como se muestra en la [figura 12](#). la posición de los polos in-

dica que el sistema no pierde la propiedad de estabilidad ante dicha perturbación.

Caso II

Para el segundo caso se propone un solo centro de generación. Este sistema dispone de 12 paneles fotovoltaicos YL250P-29b de 250 Wp, con una configuración de seis conjuntos de paneles en paralelo, donde cada uno consta de dos paneles en serie. La [figura 13](#). demuestra que la demanda del resguardo indígena es cubierta por los paneles solares en los periodos donde la irradiación es mayor o igual a 1000 W/m^2 , debido a que se puede llegar a generar una potencia de 3006 W frente a una potencia demanda de 2800 W.

El análisis de este sistema fotovoltaico se lleva a cabo mediante el simulador Neplan. Se modela con una fuente DC, un inversor DC/AC, una carga AC (1950 W) y una carga DC (850 W). En el desarrollo de este caso se

Tabla 3. Características de carga no lineal AC

Tipo de nodo	PQ
S (kVA)	0,071
P (kW)	0,05
Q (kvar)	0,05
I (A)	0,34
Cos (phi)	0,707

Fuente: elaboración propia.

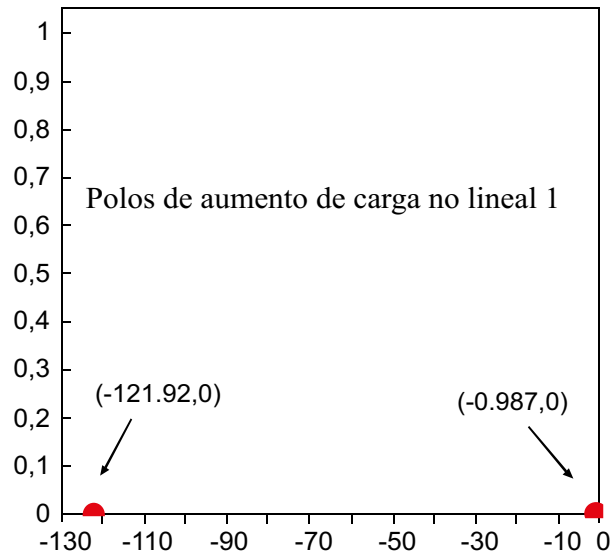


Figura 12. Valores propios del aumento carga no lineal caso 1

Fuente: elaboración propia.

plantea un banco de baterías como la fuente de generación, por tanto, la potencia activa suministrada no es la generada por los paneles FV sino la demanda por la carga, es decir 2800 W.

Las baterías que se proponen para este caso son las MT122550 MTEK. Estas operan a 12 V y tienen una capacidad de 255 Ah C10. Es decir, pueden suministrar 25,5 A constantes durante 10 horas de funcionamiento. Por esto, se propone instalar 10 baterías conectadas en cinco conjuntos en paralelo y en cada

uno dos baterías conectadas en serie; así pues, se proporciona 24 V al sistema y una capacidad de 127,5 A. El centro de refrigeración funciona directamente desde el nodo de 24 V, esta carga opera en DC, por tanto, no es necesario instalar un inversor en esta parte del sistema.

Dado que muchas de las cargas en el resguardo indígena requieren alimentación AC, para alumbrado y electrodomésticos de primera necesidad, se debe utilizar un inversor en el sistema. El voltaje requerido

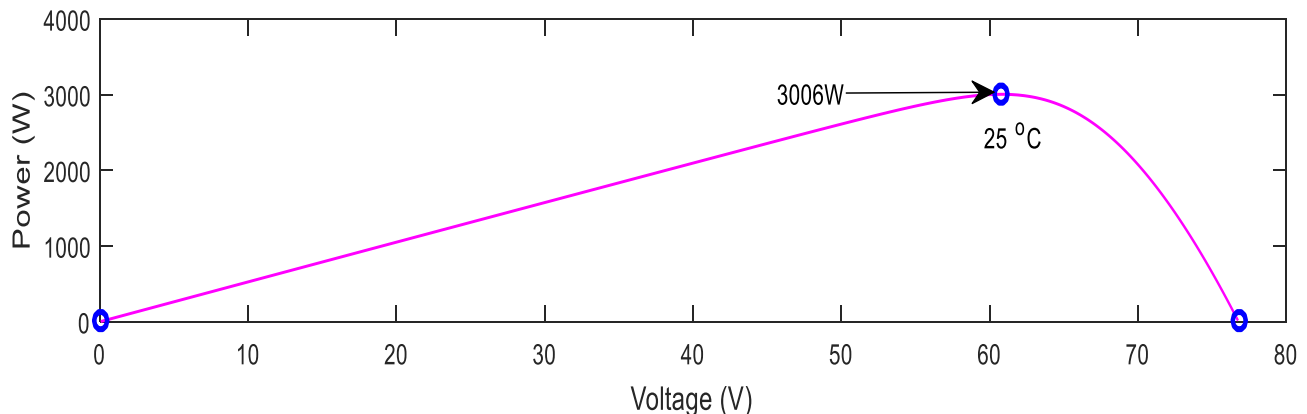


Figura 13. Simulación arreglo PV centro de generación. Configuración de paneles; 3 en serie y 5 paralelos

Fuente: elaboración propia.

es de 120 Vac, por consiguiente, se debe aumentar el voltaje además del cambio de corriente continua a corriente alterna. Se propone un inversor con tensión de entrada de 24 Vdc y potencia de salida 2000 W. Una vez implementado el sistema en Neplan, se ejecuta el flujo de carga para analizar el sistema eléctrico en estado estacionario. La [figura 14](#). demuestra que el planteamiento de expansión del sistema opera correctamente, y se obtiene la magnitud del voltaje en cada nodo, y la potencia activa y reactiva que fluye en cada línea.

Para el análisis de estabilidad de pequeña señal se tuvo en cuenta la cargabilidad máxima del sistema. Es decir, la mayor demanda de potencia que se puede presentar en la microrred. En la [figura 15](#), se muestra el resultado obtenido en Neplan del análisis de estabilidad de pequeña señal, donde se observa los valores propios con su componente real negativa, correspondientes al sistema propuesto para este caso. Se considera un sistema estable, debido a que los polos están ubicados en el semiplano imaginario negativo.

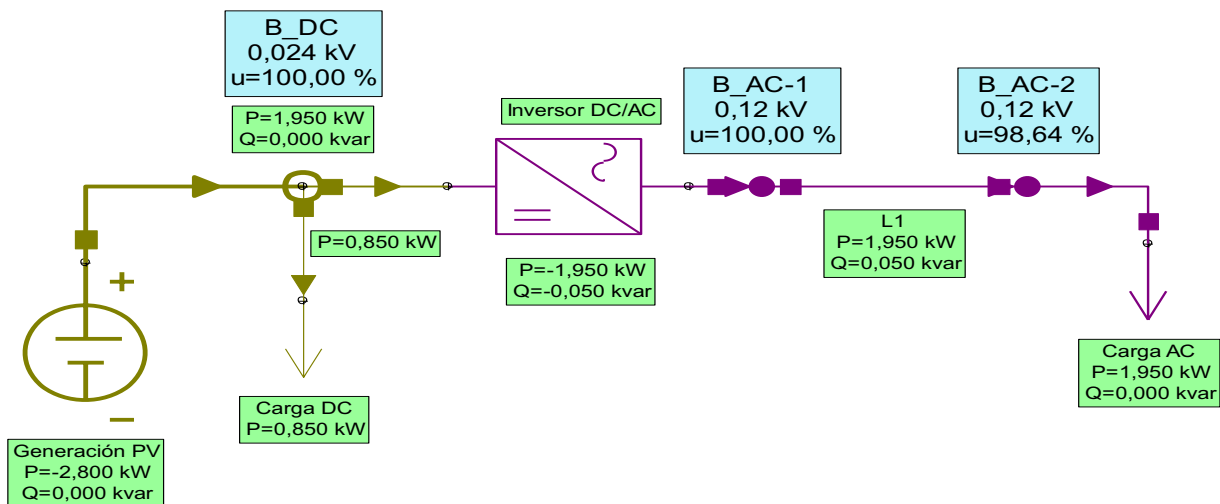


Figura 14. Arquitectura y simulación de flujo de carga del caso 2 en Neplan
Fuente: elaboración propia.

Luego de comprobar que el sistema con cargas lineales es estable, se adelanta una prueba con una carga no lineal, la cual presenta las características mostradas en la [tabla 4](#). Se reconoce que la nueva carga conectada es inductiva porque presenta un factor de potencia de 0,81 y la potencia reactiva absorbida es de magnitud positiva. La [figura 16](#). demuestra que al conectar una carga in-

ductiva el sistema opera correctamente, es decir, la tensión en cada uno de los nodos se mantiene en los valores ideales de operación y la generación es suficiente para abastecer la nueva demanda. Al analizar la estabilidad de pequeña señal se determina que el sistema es estable al conectar este tipo de carga, ya que sus polos están ubicados en el semiplano imaginario ne-

gativo, como se evidencia en la [figura 17](#). También se puede observar que el polo dominante $(-0,004; 0)$ se ubica una posición más a la derecha después de haber conectado la nueva carga; el cambio no es tan significativo. Por esta razón, la propiedad de estabilidad en el sistema se mantiene frente a pequeñas perturbaciones.

CONCLUSIONES

El análisis de estabilidad de pequeña señal es ideal para estudiar el comportamiento de una microrred aislada ante pequeñas perturbaciones en la generación o carga. Es decir, las propuestas de modificación

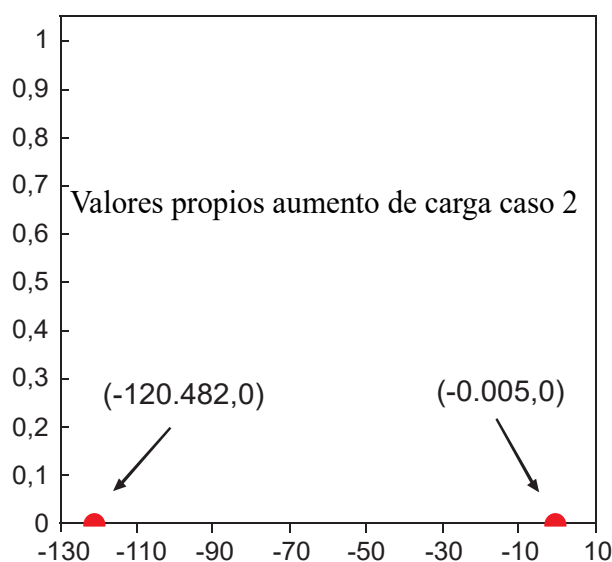


Figura 15. Valores propios caso 2

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Características de carga no lineal AC

Tipo de nodo	PQ
S (kVA)	0,086
P (kW)	0,07
Q (kvar)	0,05
I (A)	0,41
Cos (phi)	0,814

Fuente: elaboración propia.

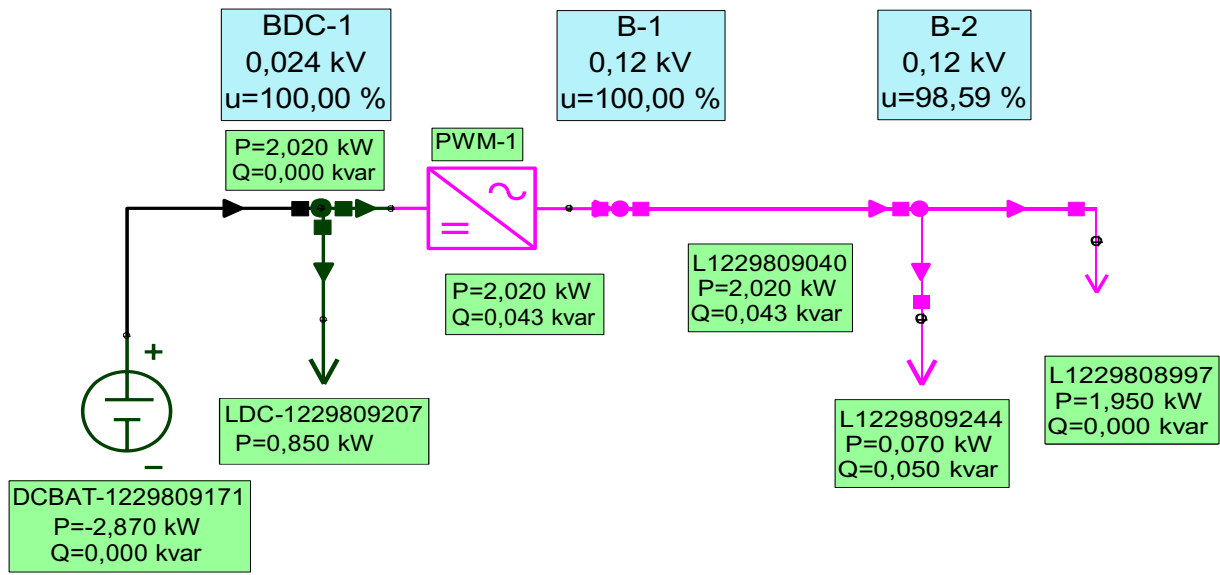


Figura 16. Flujo de carga del caso 2 con carga inductiva
Fuente: elaboración propia.

o expansión de microrredes deben ser estudiadas por medio del análisis de estabilidad de pequeña señal, debido a que estas se clasifican como pequeñas perturbaciones, y a que los valores nominales de operación son poco significativos pequeños

en comparación a un sistema de potencia convencional. De las dos alternativas de expansión propuestas, se determina que el caso 1 es el más viable, ya que al tener una microrred con dos fuentes de generación ofrece mayor confiabilidad; así, cada una

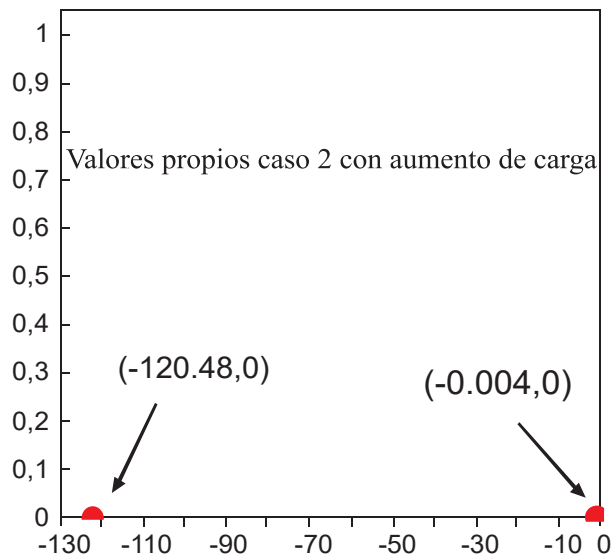


Figura 17. Valores propios del caso 2 con carga inductiva
Fuente: elaboración propia.

de las unidades de generación se pueden conectar al sistema de forma individual o conjunta, según la cargabilidad, o incluso funciona de respaldo en caso de que uno de las dos falle.

Los casos 1 y 2 demuestran que pueden operar de manera equilibrada, es decir, conservan el balance entre carga y generación frente a condiciones de cargabilidad máxima; incluso, después de haber sido sometidas a alguna perturbación (variaciones en la carga o en la generación) estas no pierden la propiedad de estabilidad.

REFERENCIAS

- Aabrek, V., Forseth, I. Bueno-López, M. y Molinas, M. (2018). Design and Implementation of a Monitoring System for Decision Support in a Micro-Business Based on Solar Energy Microgrid in Rural Colombia. En IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC) (pp. 1-8). San José, CA. DOI: [10.1109/GHTC.2018.8601571](https://doi.org/10.1109/GHTC.2018.8601571)
- Bastidas, J., Oviedo, J. y Solano, J. (2017). Técnicas de análisis y control para la mejora de la estabilidad de microrredes eléctricas: revisión en la literatura. En IX Simposio Internacional Sobre Calidad de La Energía Eléctrica (SICEL) (pp. 1-10). Bucaramanga, Colombia.
- Bueno-López, M. y Garzón-Lemos, S. (2017). Electrification in Non-Interconnected Areas: Towards a New Vision of Rurality in Colombia. IEEE Technology and Society Magazine, 36(4), 73-79. DOI: [10.1109/MTS.2017.2763479](https://doi.org/10.1109/MTS.2017.2763479)
- Correa F., C.A., Marulanda G., G.A. y Panesso H., A.F. (2017). Impacto de la penetración de la energía solar fotovoltaica en sistemas de distribución: estudio bajo supuestos del contexto colombiano. Tecnura, 20(50), 85-95. DOI: <https://doi.org/10.14483/22487638.11563>
- Dias T., D.A., Garcés R., A. y González O., D. (2017). Despacho económico en sistemas de potencia considerando estabilidad transitoria. Tecnura, 21(51), 27-41. DOI: <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.1.a02>
- Giral R., W.M., Celedón F., H.J., Galvis R., E. y Zona O., A.T. (2017). Redes inteligentes en el sistema eléctrico colombiano: Revisión de tema. Tecnura, 21(53), 119-137. DOI: <https://doi.org/10.14483/22487638.12396>
- He, J., Wu, X., Xu, Y. y Guerrero, J.M. (2019). Small-Signal Stability Analysis and Optimal Parameters Design of Microgrid Clusters. IEEE Access, (7), 36896-36909. DOI: [10.1109/ACCESS.2019.2900728](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2900728)
- Louie, H. (2018). Off-Grid Electrical Systems in Developing Countries. Seattle, WA: Springer International Publishing.
- Majumder, R. (2013). Some aspects of stability in microgrids. IEEE Transactions on Power Systems, 28(3), 3243-3252. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2234146>
- Ramírez, M. y Aquino, R.A. (2009). Análisis de estabilidad de pequeña señal en el sistema eléctrico de Pereira. [Tesis de pregrado]. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira. Recuperado de <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/1986/6213743D946.pdf>

Song, Y., Hill, D.J. y Liu, T. (2019). Impact of DG Connection Topology on the Stability of Inverter-Based Microgrids. IEEE Transactions on Power Systems, 34(5), 3970-3972. DOI: [10.1109/TPWRS.2019.2917624](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2917624)

Stevanoni, C., De Grève, Z., Vallée F. y Deblecker, O. (2019). Long-Term Planning of Connected Industrial Microgrids: A Game Theoretical Approach Including Daily Peer-to-Microgrid Exchanges. IEEE Transactions on Smart Grid, 10(2), 2245-2256. DOI: [10.1109/TSG.2018.279331](https://doi.org/10.1109/TSG.2018.279331)





Intuición colectiva y estadísticas alternativas para acertar

Collective intuition and alternative statistics to hit

Carlos Hildebrando Fonseca Zárate¹ , Juan Carlos García Ubaque² ,
Paula Fernanda García Benítez³ 

Cómo citar: Fonseca Zárate, C.H., García Ubaque, J.C. y García Benítez, P.F. (2020). Intuición colectiva y estadísticas alternativas para acertar *Tecnura*, 24(63) 104-114. DOI: <https://doi.org/10.14483/22487638.16197>

Fecha de recepción: 18 de junio de 2019

Fecha de aceptación: 18 de octubre de 2019

RESUMEN

Contexto: El mundo varía rápidamente en el Antropoceno por sistemas socioecológicos sensibles y retroalimentadores. América Latina evidencia distancias grandes entre estadísticas y realidades. Se hacen necesarias mejores herramientas para evaluación y predicción que ofrezcan alternativas esperanzadoras, eficientes y seguras para la sociedad y la naturaleza.

Métodos: Se combinan dos instrumentos de planificación mediante el análisis de componentes principales (ACP): el índice de desarrollo territorial sustentable (IDTS), datos 2000-2010 en Colombia y de sus municipios, departamentos y capital, y el de planificación estratégica participativa con escenarios tridimensionales territoriales (PET2) con respecto a la riqueza intelectual territorial.

Resultados: Se establecieron convergencias y divergencias temáticas entre la realidad estadística (IDTS) y las percepciones, intuiciones e intereses de los agentes, donde las relacionadas con la

construcción del conocimiento fueron significativas, en especial frente a los tipos de conocimiento académico/científico, empresarial/ingenieril y ciudadano/ancestral/colectivo.

Discusión: En términos epistemológicos y ontológicos, es necesario conocer la convergencia o divergencia entre la realidad y las estadísticas, y en consecuencia, entre la percepción de los gobernantes y los gobernados. A nivel pragmático, se evidencia que las herramientas planteadas son útiles y de fácil manejo, por lo que su uso (conjunto o separado) puede proveer información valiosa y relevante.

Conclusión: Entender el Antropoceno, en su dinámica de sistema socioecológico, y como sistema social de toma de decisiones, garantiza una mejor comprensión de las necesidades y expectativas de la población, para esto es fundamental revisar los criterios y herramientas de evaluación, seguimiento y toma de decisiones.

1 Ingeniero civil, PhD Geografía. Director, Corporación Simbiosis, Bogotá, Colombia. Contacto: carlosfonsecaz@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3653-3899>

2 Médico Cirujano, PhD Salud Pública. Profesor titular Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Salud Pública. Contacto: jcgarciau@unal.edu.co
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5329-4549>

3 Administradora de Empresas Universidad Nacional de Colombia, economista Universidad de los Andes, MSc Salud Pública Universidad de los Andes (C). Contacto: pf.garcia10@uniandes.edu.co
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7606-851X>

Palabras clave: desarrollo de la comunidad; indicadores; percepción social; planificación ambiental; planificación participativa.

ABSTRACT

Context: The world varies quickly in the Anthropocene due to sensitive socio-ecological systems. Latin America evidences great distances between statistics and realities. It is then necessary to have new tools for evaluation and prediction that offer hopeful, efficient and secure alternatives both for society and nature.

Methods: two planification instruments are combined through the Principal Component Analysis (PCA): the “Índice de Desarrollo Territorial Sustentable (IDTS)” with data from 2000-2010 of Colombia and her municipality, department and capital city, and that of “Planificación Estratégica Participativa con Escenarios Tridimensionales Territoriales (PET2)” regarding territorial intellectual wealth

Results: Thematic convergences and divergences were established between the statistical reality

(IDTS) and the perception, intuition and interests of agents, particularly important those related with knowledge construction: academic/scientific, business/engineering and ancestral/collective.

Discussion: in a epistemological and ontological level it is necessary to know the convergence or divergence between reality and statistics, and therefor between the rulers and the ruling perceptions. In a pragmatic level it is evident that the established tools are useful and easy to handle so that using them (either together or not) can provide relevant and valuable information.

Conclusion: understanding the Anthropocene, in its dynamic as a socio-ecological and social decision-making system, grants a better comprehension of the needs and expectations of the people. That's why it is necessary to check the criteria and tools for evaluating, follow up and decision-making.

Keywords: Community Development; Environment Design; Indicators; Participative Planning; Social Perception.

INTRODUCCIÓN

El complejo, incierto y vertiginoso Antropoceno

En la edad de los humanos, Antropoceno, las personas son la fuerza dominante del cambio planetario (Steffen et al., 2015), específicamente en esta época, debido a los desarrollos tecnológicos, la globalización de la producción y del consumo, y el cambio climático, que nos han conducido a ser “un gran mundo en un pequeño planeta” (Elmqvist, Cornell, Öhman y Daw, 2014), con transformaciones en la atmosfera, los océanos, los polos, los ríos, las selvas, el clima y la biodiversidad, que eventualmente pueden exceder los límites naturales que determinan la habilidad del planeta físico y biótico de soportar la actividad humana.

En consecuencia, la discusión actual trasciende la dimensión ambiental, propia de décadas anteriores, y se reorienta a replantear el modelo de consumo y apropiación/acumulación ilimitados, a través de sistemas socioecológicos que, alrededor del uso de los recursos naturales, buscan establecer un límite inferior de condiciones sociales para una vida digna y un límite superior ecosistémico de consumo y desperdicio para la sociedad (Raworth, 2017). De esta manera, cualquier situación por fuera de estos límites es contraria al desarrollo sustentable y, dado que las riquezas del planeta son finitas, si entre los ricos hay mayor velocidad en el incremento en sus ganancias que la del crecimiento, necesariamente los menos ricos están disminuyendo sus ingresos (Piketty, 2014).

Gestión del conocimiento

La gestión del conocimiento es el proceso de generación, apropiación, uso, difusión, evaluación y transmisión de saberes; y ha llevado a la consolidación de la economía basada en información (EBI) y de la sociedad del conocimiento. Estas se caracterizan por: globalización de mercados, conocimiento e innovación como ejes de cambios vertiginosos, digitalización y virtualización, convergencia entre información, informática y comunicaciones, conectividad, asimilación del trabajo individual y colectivo a sistemas neuronales, inmediatez y tiempo real para relaciones entre redes, y desintermediación entre productores y consumidores (Tapscott, 1995, citado por Fonseca, Castellanos y Castillo, 2016.).

Sin embargo, el cambio tecnológico ha incrementado la preocupación por el cambio climático, por lo que se requiere una nueva

comprensión de sus alcances y mejores instrumentos de lectura de las dinámicas en la cuales se actúa, Entonces, se requiere evolucionar a igual o mayor ritmo que dichos cambios, a partir de herramientas de gestión del conocimiento e innovación social e institucional (Fonseca, Castellanos y Castillo, 2016), centrados en una planificación estratégica y participativa, que reconozca la diversidad dentro de la unidad de propósito y construya gobernanza con eficacia, eficiencia y una correcta relación entre lo público y lo privado.

Con este propósito, se han identificado tres modos de construcción de conocimiento, cuyas características se incluyen en la [tabla 1](#).

Se considera que la sociedad, especialmente en el entorno de las instituciones públicas, se beneficia al permitir la coexistencia balanceada de los tres modos de conocimiento ante el futuro complejo e incierto. En Colom-

Tabla 1. Modos de construcción de conocimiento

	Modo 1	Modo 2	Modo 3
Agentes	Universidad/centro científico	Parques de ciencia y tecnología (empresa/universidad/Estado)	Estado/investigadores/empresas/sociedad civil/comunidades/naturaleza
Método	Cuantitativo-positivismo/racionalismo	Cuantitativo/contextual	Cuali-cuantitativo/Diálogo intercultural
Instrumentos	Publicaciones científicas	Patentes/secreto industrial/franquicias	Tradición oral-experiencia/talleres
Aproximación	Disciplinar especializada	Multi- e interdisciplinar	Intercultural y transdisciplinar
Racionalidad	Conocer para saber más/Enseñanza/aprendizaje	Conocer para vender más/competitividad	Conocer para la convivencia y coexistencia
Actitud	Experto docente	Experto facilitador	Construcción colectiva

Fuente: Fonseca, Castellanos y Castillo (2016).

bia, son esenciales para el verdadero desarrollo territorial sustentable, puesto que existen condiciones especiales como el posconflicto y la degradación ambiental, en las que tanto el Estado como la empresa privada y la sociedad civil son fundamentales. Además, se requieren políticas públicas que den respuesta a las necesidades con perspectiva regional (Fonseca Zárate, 2018).

En este sentido, la prospectiva explora el principio según el cual el futuro es múltiple (De Jouvenel, 2000) y depende esencialmente de las decisiones del hombre (Godet y Roubelat, 1996), es decir que, tomando las decisiones correctas en el momento apropiado, se puede construir algo mejor, tanto a nivel personal como social, y es posible incrementar las capacidades individuales y colectivas de prever y modelar el desarrollo preparándose para afrontar y ser resilientes ante diversos escenarios, al diseñar y construir alternativas que permitan un acercamiento progresivo al futuro deseado. En el mundo existen importantes centros de análisis prospectivo que han realizado varios ejercicios en esta dirección, los cuales respaldan su utilidad para la construcción de escenarios posibles y deseables.

MATERIALES Y MÉTODOS

Mediante la herramienta estadística de análisis de componentes principales (ACP), se realizó un ejercicio de combinación de dos instrumentos de planificación; el primero, de carácter intuitivo colectivo, denominado prospectiva estratégica participativa con escenarios tridimensionales territoriales (PET2), y el segundo, basado en el tratamiento estadístico de información, denominado índice de desarrollo territorial sustentable (IDTS).

El PET2 corresponde a la fusión, modificada, de la construcción de escenarios futuros posibles,

el método Delphi y la construcción interpretativa de gráficos de síntesis. Para los escenarios futuros posibles se incorporó un eje diagonal, orientado a incrementar las perspectivas y la potencia del análisis; para el Delphi, además de las rondas de consultas a pequeños grupos, se incluyó una consulta masiva y para la construcción gráfica se recogieron los dos escenarios más contrapuestos.

El trabajo se llevó a cabo a partir de datos secundarios, y a través de un reprocesamiento de los obtenidos en 2013 por Colciencias. Se adelantó una encuesta masiva sobre necesidades de ciencia, tecnología e innovación en cada departamento y en las quince áreas de conocimiento correspondientes a los programas existentes en Colciencias. El universo estuvo constituido por 23 850 personas, de las cuales aproximadamente 11 000 eran empresarios y otro tanto investigadores, e incluyó 150 preguntas, las cuales fueron respondidas por casi 6000 personas. Como paso inicial para dicha encuesta, se estableció, mediante talleres con los miembros de los consejos nacionales de programas de ciencia, tecnología e innovación, los diez temas estratégicos que cada uno de ellos consideraba debían acogerse en el ámbito nacional. La consulta masiva se realizó por medios electrónicos con los expertos en cada departamento y en las quince grandes áreas del conocimiento, solicitándoles que escogieran, de la lista nacional de diez temas, los tres que debían trabajarse en su departamento y área de conocimiento, a partir del análisis de dos escenarios: el crítico o turbulento y el más benigno.

Para el IDTS se tomaron los datos recolectados por Fonseca (2018), en los que se establecieron cinco riquezas: humana, intelectual, privada, pública-institucional y natural/ambiental, compuestas por 60 variables, de las cuales 25 son innovadoras, para estimar de manera más integral la riqueza y desarrollo territorial sustentable en los 1122 municipios y 32 departamentos de Colombia.

La fusión de los dos conjuntos de datos, del IDTS y del PET2, se hizo en el orden departamental, puesto que el ejercicio de consulta nacional permite agregación a ese nivel, teniendo en cuenta que la coincidencia significa que la opinión intuitiva/sujetiva de los encuestados se ajusta a los resultados del subíndice asociado.

Se tomaron en cuenta los datos de los cinco subíndices de riqueza: humano, intelectual, público-institucional, privado y natural am-

biental, y se seleccionaron los resultados de los programas de Colciencias más afines a ellos, para explorar la coincidencia o disidencia entre ellos, mediante su agrupación en una sola tabla de datos y la ejecución de un ejercicio de ACP, análisis de componentes principales.

Tabla 2. Prioridades ejercicio PET2

Programa/Tema prioridad	Prioridad 1	Prioridad 2	Prioridad 3	Prioridad 4
Sociales y humanas	Desarrollo humano, ética y calidad de vida	Conflicto, criminalidad, derechos, justicia, paz y equidad	Política, estado y relaciones de poder	Economía, innovación, competitividad y sostenibilidad
Salud	Desarrollo de sistemas y servicios	Promoción, prevención, calidad de vida y salud infantil	Reducción impacto enfermedades crónicas	Políticas seguridad alimentaria y nutricional, y estilos de vida saludables
Educación	Educación para la convivencia y reconciliación	Educación, cultura y desarrollo	Educación superior y productividad	Educación inicial
Desarrollo tecnológico e innovación	Competitividad sectores estratégicos	Producción limpia	Diseño y optimización de procesos transformación	Innovación en organizaciones industria
Agropecuarias	Competitividad, agricultura familiar y empresarial mediante CT+i	Articulación oportunidades mercado con CT+i	Calidad, cantidad, variedad e inocuidad de los alimentos disponibles para la población colombiana	Conocimiento apropiado para condiciones sociales, ambientales y económicas de zona intertropical
Ambiente, biodiversidad y hábitat	Gestión integral y uso sostenible de la biodiversidad	Gestión integral y uso sostenible del agua	Ordenamiento y planificación territorial para la sostenibilidad	Producción más limpia, consumo responsable y tecnologías ambientales

Programa/Tema prioridad	Prioridad 1	Prioridad 2	Prioridad 3	Prioridad 4
Electrónica, telecomunicaciones e informática	Aplicaciones TIC en salud y educación	Aplicaciones TIC en agroindustria	Competitividad de empresas con base tecnológica	Industria inteligente (IA, control y automatización)
Energía y minería	Fuentes renovables de energía eléctrica	Ahorro y uso eficiente de energía	Desarrollo redes inteligentes (smart grids)	Desarrollo de materiales con valor agregado a partir de recursos mineros
Biotecnología	Biotecnología agrícola	Escalado e ingeniería de bioprocesos	Biorremediación	Genómica, proteómica y metabolómica
Mar/recursos hidrológicos	Biodiversidad ecosistemas marinos y costeros	Aprovechamiento sostenible, recursos hidrológicos, marinos, costeros	Calidad ambiental marina y costera	Amenazas y riesgos áreas marinas y costeras
Infraestructura, logística y transporte	Planificación y diseño óptimo sistemas infraestructura, logística y transporte	Planificación regional integral	Nuevos materiales y formas constructivas de infraestructura	Diseño, prueba y adopción de vehículos y esquemas operativos sostenibles
Vivienda y ciudades	Diseño y ordenamiento urbano y local	Transporte y movilidad urbana	Gobernabilidad, seguridad y convivencia urbana	Economía, competitividad, productividad y empleo urbano-regional
Seguridad y defensa	Seguridad, defensa, ética y sociedad	Tecnologías seguridad ciudadana, protección civil. Bioseguridad, terrorismo	Materiales compuestos en industria de aviación, civil y militar	Desarrollo de sistemas seguridad telemática y equipos asociados
Deporte, recreación y actividad física	Ed. física curricular y extracurricular, desarrollo psicomotor primera infancia, adolescencia y juventud	Pol. pública, deporte, recreación, actividad física, con enfoque de derechos y diversidad	Ciencias básicas aplicadas a la actividad física en relación con adaptaciones y efectos sobre la biología del cuerpo	Evaluación del impacto de la promoción del deporte, recreación, actividad física y aprovechamiento del tiempo libre en la salud y estilos vida

Fuente: Fonseca, Castellanos y Castillo (2016).

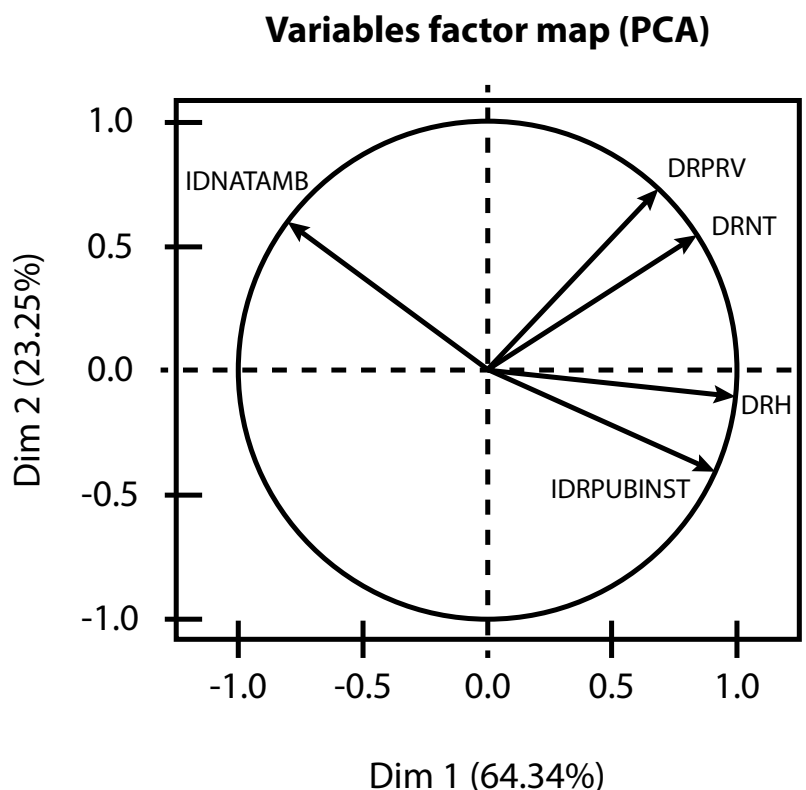


Figura 1. Suma de las cinco riquezas territoriales en el ámbito departamental
Fuente: Fonseca Zárate (2018).

La [figura 1](#), representa la suma de las riquezas departamentales establecidas en el ejercicio del ITDS. Como se aprecia, la flecha que corresponde al índice de riqueza natural y ambiental (IDRNATAMB) no se encuentra alineada con las otras cuatro riquezas, lo que indicaría que el progreso o crecimiento en Colombia puede estar sacrificando los recursos naturales y el ambiente.

Esto es importante, en especial en relación con el índice departamental de riqueza intelectual (IDRINT), que agrupa tres modos de construcción del conocimiento: científico/académico, empresarial y ciudadano/ancestral; el cual al parecer se opone parcialmente (más de 90 grados) al de riqueza natural y ambiental, lo cual significaría que el conocimiento no se está aplicando adecuadamente a los recursos naturales y

calidad ambiental, sino que los podría estar afectando negativamente.

También, llama la atención el hecho de que el índice departamental de riqueza pública e institucional (IDRUBINST), se encuentra en dirección casi que totalmente contraria al IDRNATAMB, lo cual significaría que el Estado y las instituciones departamentales estarían afectando negativamente la riqueza natural y ambiental.

Esto puede ser muy controversial, por cuanto existen diversas autoridades y organizaciones ambientales en cada departamento, cuyo propósito es proteger los recursos naturales y la calidad ambiental.

En relación con la combinación de los dos resultados, la [tabla 3](#). presenta la síntesis correspondiente.

Tabla 3. Resultados del ejercicio de combinación IDTS-PET2, departamentos de Colombia

Ejercicio combinación IDTS-Resultados encuesta PET					
Programa/ Riqueza	Humana	Intelectual	Pública/ institucional	Privada	Natural/ ambiental
Ciencias básicas	Coincidencia	Disidencia (modo 3)			Disidencia (riesgos)
Sociales/ humanas	Coincidencia	Disidencia (modo 3)			
Educación	Coincidencia	Disidencia (modos 1 y 3)			Coincidencia
Salud	Coincidencia		Coincidencia		
Deportes	Coincidencia				
Agropecuaria		Disidencia (modo 3)		Disidencia (producción)	
Ambiente		Disidencia (modo 3)	Coincidencia		Coincidencia
Infraestructura			Coincidencia		
Biotecnología					Coincidencia
Mar/ hidrobiología					Disidencia (riesgos)
Vivienda/urbano				Disidencia (producción)	
Electrónica				Disidencia (producción)	
Energía/minería				Disidencia (producción)	
Des. tecno/ industria				Disidencia (producción)	

Fuente: Elaboración propia.

DISCUSIÓN

Como se aprecia, el ejercicio arrojó resultados interesantes:

- La riqueza humana del IDTS presenta coincidencia con la opinión de los encuestados en ciencias básicas, sociales, salud, educación y deportes y recreación. Es decir que los temas identificados en los ejercicios Delphi en estos campos apuntan a fortalecer las variables de riqueza humana en estos territorios.
- La riqueza intelectual presenta, en cambio, disidencia con ciencias básicas, sociales, agropecuarias y ambiente, especialmente respecto al modo 3 de conocimiento, que es el relacionado con el diálogo de saberes o conocimiento abierto, en el que la sabiduría ancestral, la complejidad del ordenamiento territorial y la diversidad cultural pueden estar desempeñando un rol significativo. En consecuencia, tal vez sea necesario trabajar más en los mecanismos de interacción de las diversas formas de construcción del conocimiento y, sobre todo, concertar con los diferentes grupos de interés involucrados, en particular con las etnias y grupos culturales.
- La riqueza intelectual también presenta conflicto, disidencia, con ciencias de la educación en cuanto al modo 1 de conocimiento, que es el académico/científico, por cuanto la investigación en pedagogía y enseñanza no se correspondería con los resultados esperados. Algo similar ocurre con el modo 3, donde es válido incrementar los esfuerzos por garantizar más aproximación intercultural en el proceso educativo a nivel departamental; a la vez que valdría la pena preguntarse si, tal vez de manera errónea, la educación actual se está dirigiendo hacia el éxito personal y empresarial como objetivo central, pasando por alto elementos que han sido calificados como centrales, entre ellos: la ciudadanía o la realización personal.
- Es significativo que en ambiente y agropecuario haya disidencia del modo 3 de conocimiento (ancestral/ ciudadano) en el sentido que es parte de la percepción global el que los indígenas han convivido en la selva tropical húmeda y son quienes la han conservado gracias a las prácticas culturales de explotación de carácter agroecológico.
- La riqueza pública e institucional presenta coincidencia con ciencias sociales, salud, infraestructura y ambiente, lo cual podría mostrar que a medida que se consolidan los departamentos en sus aspectos tangibles e intangibles, aumenta el interés y la investigación en esos campos. Sin embargo, una revisión más detallada, que tome en cuenta variables individuales de dicha riqueza, como el índice de desconcentración de la propiedad privada como un factor tangible de la riqueza pública e institucional, podría llegar a revelar otras realidades, por lo que sería razonable incluir estos aspectos en ejercicios posteriores de investigación.
- La paradoja que se evidencia del eventual enfrentamiento de la riqueza pública e institucional con la riqueza natural y ambiental en el IDTS es preocupante, pues revela que el Estado podría estar alineado con un enfoque netamente extractivo, sacrificando necesidades futuras de supervivencia.
- La riqueza natural y ambiental presenta coincidencia con educación, biotecnología, pero disidencia con ciencias del mar y con ciencias básicas, especialmente en

cuanto a los factores de riesgo. Tanto en el entorno marino como en el terrestre, es necesario profundizar más el conocimiento sobre los peligros y las estrategias para afrontarlos, en especial desde el conocimiento, la tecnología y la innovación social e institucional. En el caso de las ciencias básicas, un bajo conocimiento de la biodiversidad puede dificultar la protección y promoción de la vida en todas sus formas.

- La riqueza privada presenta disidencia con los programas de vivienda, electrónica, energía y minería, desarrollo tecnológico e innovación, y agropecuario en el componente de capacidad productiva orientada a los mercados nacionales. Dado que se crearon nuevos indicadores de la riqueza privada, como el flujo intradepartamental (que interpreta el flujo entre los municipios y la capital departamental), la rentabilidad catastral (que es la división entre el PIB municipal y el valor catastral de todos los predios registrados en el municipio), así como la diversidad productiva y la densidad empresarial, es posible que este resultado refleje la falta de inversión y conocimiento en la transformación empresarial para aumentar la productividad y competitividad, cuestión que merece ser más estudiada.

CONCLUSIONES

En síntesis, este ejercicio permite revelar posibles conflictos y desencuentros, lo mismo que ausencias temáticas en los programas de CT+i sobre aspectos que registra el IDTS y que son relevantes para el desarrollo del país y sus departamentos, y se relacionan con la pertinencia social del conocimiento ([García-Ubaque, 2015](#)).

Aunque el futuro es complejo e incierto, puede también ser emocionante; las innovaciones tecnológicas pueden conducir a innovaciones sociales e institucionales favorables. Así, es posible construir sociedades más humanas, incluyentes, equitativas, sustentables y ecoproductivas.

Los métodos de escenarios futuros posibles y de consultas de expertos tipo Delphi son instrumentos pertinentes, de carácter participativo y estratégico, para la toma de decisiones. El método de consultas amplias de expertos, enriquecido con el triaxial de escenarios futuros posibles, permite una visión más amplia del futuro, sin castigos de eficiencia y rapidez. Por esta razón, estos métodos, aplicados de forma periódica, pueden establecer una retroalimentación adecuada para garantizar la gestión del conocimiento, diferenciada regional y sectorialmente, pues es clara la necesidad de usar sus resultados para la toma de decisiones organizacionales, especialmente en el sector público cuya falta de legitimidad social, particularmente en áreas como la salud y el ambiente, resultan preocupantes y dan una sensación de crisis permanente ([Agudelo et al., 2016](#); [Morales-Sánchez y García-Ubaque, 2017](#)).

REFERENCIAS

Agudelo-Calderón, C.A., García-Ubaque, J.C., Robledo-Martínez, R., García-Ubaque, C.A. y Vaca-Bohórquez, M.L. (2016). Identification of capacities in environmental health from environmental authorities in Colombia. *Revista de Salud Pública*, 18(4), 605-616.

De Jouvenel, H. (2000). A brief methodological guide to scenario building. *Techno-*

- logical Forecasting and Social Change, 65(1), 37-48.
- Elmqvist, T., Cornell, S., Öhman, M.C. y Daw, T. (2014). Global Sustainability & Human Prosperity. Copenhagen: Norden.
- Fonseca, C. (2018). Lineamientos y sugerencias para el diseño y evaluación de políticas y estrategias de ciencia, tecnología e innovación regionalmente diferenciadas para el desarrollo territorial sustentable de Colombia. Bogotá, D.C.: UPTC-IGAC.
- Fonseca Zárate, C.H. (2018). Lineamientos y métodos de construcción y evaluación de políticas y estrategias de ciencia, tecnología e innovación diferenciadas regionalmente para el desarrollo territorial sustentable de Colombia. [Tesis doctoral]. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja.
- Fonseca, C., Castellanos, F. y Castillo, L. (2016). Nuevos métodos de gestión del conocimiento: consulta nacional de administradores públicos con prospectiva participativa. Administración y Desarrollo, 46(2), 175-199
- García Ubaque, C.A. (2015). Editorial. Tecnura, 19(46), 11-12.
- Godet, M. y Roubelat, F. (1996). Creating the future: the use and misuse of scenarios. Long Range Planning, 29(2), 164-171.
- Morales-Sánchez, L.G. y García-Ubaque, J.C. (2017). Gestión de la crisis del sistema de salud en Bogotá. Revista de Salud Pública, 19, 129-133.
- Piketty, T. (2014). El capital en el siglo XXI. Bogotá: Fondo de Cultura Económica
- Raworth, K. (2017). Doughnut economics: Seven ways to think like a 21st century economist. Vermont: White River Junction.
- Steffen, W., Richardson, K., Rockstrom, J., Cornell, S., Fetzer, I., Bennett, E., ..., Sorlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. Science, 347(6223), 125





Una visión de ciudad sostenible desde el modelo de gestión de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) caso de estudio: Barranquilla

A vision of a sustainable city from the Construction and Demolition Waste (CDW) management model case study: Barranquilla

Carlos Albeiro Pacheco Bustos¹ , Edgar Humberto Sánchez Cotte² , Carolina Páez³ 

Cómo citar: Pacheco Bustos, C.A., Sánchez Cotte, E.H. y Páez, C. (2020). Una visión de ciudad sostenible desde el modelo de gestión de los residuos de construcción y demolición (RCD) caso de estudio: barranquilla. *Tecnura*, 24(63) 57-72. DOI: <https://doi.org/10.14483/22487638.15359>

Fecha de recepción: 19 de junio de 2019

Fecha de aceptación: 18 de octubre de 2019

RESUMEN

Contexto: La gran cantidad de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) que se genera, se ha convertido en un problema a nivel Mundial. Por esta razón, la legislación en Colombia busca orientar su adecuada gestión y promover el aprovechamiento de estos.

Metodología: En esta investigación se plantea una alternativa para la elaboración del plan de gestión integral basada en un análisis de la legislación nacional y local de las ciudades que están a la vanguardia en el manejo de los RCD en Colombia. Basado en este análisis se estudiaron y analizaron las condiciones y características de una ciudad intermedia como lo es Barranquilla para plantear una alternativa integral para el manejo de estos residuos (gestión y tratamiento).

Resultados: Se identificaron acorde con sus condiciones los aspectos de prevención, almacena-

miento, recolección, transporte, aprovechamiento y disposición final a tener en cuenta dentro del plan de gestión integral de RCD más adecuado para la ciudad de Barranquilla y se planteó un esquema planta de tratamiento que se considera más adecuado en su manejo.

Conclusiones: Barranquilla requiere un ajuste rápido a su modelo de gestión de RCD, dada su alta tasa de desarrollo durante los últimos años. Se reconoció para esta ciudad que la separación en la fuente y el uso son fundamentales en el modelo requerido para lograr un proceso de gestión sostenible. Además, se identificaron debilidades en el sistema de gestión actual, asociadas con el uso de un modelo de economía lineal, por lo tanto, se propone un modelo de gestión basado en los principios de la economía circular.

Palabras clave: Ciudad sostenible; Plan de gestión; RCD; Desarrollo sostenible.

1 Ingeniero Civil, Magister en procesos de ingeniería, doctor en ingeniería. Profesor asistente. Universidad del Norte, Barranquilla (Colombia). Barranquilla, Colombia. Contacto: cbustosa@uninorte.edu.co

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5198-8122>

2 Ingeniero Civil, Magister en Ingeniería Civil, Doctor (c) en Ingeniería. Docente de la Universidad Distrital Francisco José de caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: esanchez@udistrital.edu.co

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7370-8745>

3 Ingeniera Civil, Universidad del Norte y Universidad del Sur de la Florida. Barranquilla, Colombia. Contacto: carolinapaez@uninorte.edu.co

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6328-2741>

ABSTRACT

Context: The large amount of Construction and Demolition Waste (C&DW) that is generated has become a worldwide problem. For this reason, the legislation in Colombia seeks to guide its proper management and promote its transformation and reuse.

Methodology: This research proposes an alternative for the elaboration of the comprehensive management plan based on an analysis of the national and local legislation of the cities that are at the forefront in the management of the C&DWs in Colombia. Based on this analysis, the conditions and characteristics of an intermediate city such as Barranquilla were studied and analyzed, in order to propose an integral alternative for the management of this kind of waste (management and treatment).

Results: The aspects of prevention, storage, collection, transport, use and final disposition to be

taken into account within the comprehensive management plan of C&DW, most suitable for the city of Barranquilla, were identified. According to these special characteristics and conditions, a treatment plant scheme was proposed.

Conclusions: Barranquilla requires a quick adjustment to its C&DW management model, given the high development of the city in the last years. It was recognized for this city that separation at source and use are fundamental in the model required to achieve a sustainable management process. In addition, weaknesses in the current management system were identified, associated with the use of a linear economy model, therefore, a management model based on the principles of circular economy is raised.

Keywords: Sustainable city; Management plan; CDW; Sustainable development.

INTRODUCCIÓN

En ciudades medianas en las que hace algunos años, la idea de la reutilización o reciclaje de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) producidos en las obras civiles no se había contemplado, dado que no se vislumbraba una necesidad urgente debido a la oferta de las materias primas no renovables existentes. No obstante, múltiples investigaciones en el mundo han demostrado que algunos residuos que hacen parte de los RCD pueden llegar a sustituir de forma satisfactoria los agregados pétreos naturales, y así aportar a la transformación de la industria de la construcción en una actividad sostenible, mediante el uso de la economía circular en los residuos (Castaño, Misle Rodríguez, Lasso, Gómez Cabrera, & Ocampo, 2013; Del Río, Izquierdo, Salto, & Santa Cruz, 2010; Morán del Pozo, Juan Valdés, Aguado, Guerra, & Medina, 2011; Robayo, Matthey, Silva, Burgos, & Delvasto, 2015; Xargay, Ripani, Caggiano, Folino, & Enzo Martinelli, 2019),

cuyo objetivo es que el valor de los productos, los materiales y los recursos se mantenga en la economía durante el mayor tiempo posible, y que se reduzca al mínimo el costo de generación de nuevos materiales” (economiacircular.org., 2018). En Colombia, es importante mencionar que pocas ciudades poseen legislación específica que dé soporte legal a la gestión integral de los RCD, entre las cuales se encuentran: Barranquilla, Medellín y Bogotá. Cada una de ellas ha realizado en los últimos años avances significativos en la aplicación de normativas y estrategias para mejorar la gestión integral de los RCD y así apuntar a ser ciudades ambientalmente sostenibles y, por ende, han generado sus propias normas para el adecuado manejo de los RCD. De igual manera, el gobierno nacional, en cabeza del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, ha generado la resolución 0472 de 2017, en la cual se reglamenta la gestión integral de los RCD en el país y da lineamientos a todos los actores involucrados dentro de la adecuada gestión de los mismos:

entre las que se tienen procesos de generación, transporte, disposición y tratamiento de estos residuos para que se reúsen o aprovechen en proyectos de infraestructura. Esto hace parte de la teoría de economía circular que se ha aplicado a nivel mundial a los residuos sólidos, y ahora se pretende involucrar sus prácticas en la gestión de los RCD.

Por otra parte, debido a una inadecuada disposición de los RCD en sitios no apropiados (tales como cuencas de ríos, lotes baldíos, zonas de parques y drenajes urbanos) (Ramírez, 2007), los ecosistemas (tanto urbanos como rurales), y las personas se han visto afectadas significativamente por afectaciones en la salud, la generación de vectores (moscas, ratas, entre otros) e inundaciones. Este último es uno de los principales problemas que tiene la ciudad de Barranquilla, donde los RCD son dispuestos en los canales de recolección de aguas lluvias o dispuestos en la calle, siendo arrastrados por los arroyos y generando taponamiento en las rejillas de recolección de aguas lluvias de los canales recién construidos (Pacheco, Sánchez, Fuentes, & Rondón, 2017). Es por esto que el modelo actual de gestión integral de RCD de una ciudad de tamaño mediano debe ser planeado, organizado y diseñado basado en la normativa local y nacional vigente, y en las últimas técnicas de reúso y transformación.

Las soluciones planteadas en el presente escrito a la problemática relativa al manejo de los RCD, se basa en el concepto de economía circular he involucra medidas de gestión basadas en el uso de las prácticas adecuadas de la economía circular (separación en la fuente, reúso, reciclaje, y transformación) se pretende mejorar sustancialmente la problemática social, ambiental y económica de la ciudad. Esto va de la mano con el propósito de “aumentar la urbanización inclusiva y sostenible y la capacidad para la planificación de ciudades de tamaño intermedio y una ges-

tió participativa, integradora y sostenible en el manejo de los residuos” (Programa de las Naciones Unidas, 2018), y además “reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, incluso prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos municipales y de otro tipo” (Programa de las Naciones Unidas, 2018), enunciadas en el objetivo 11 para construir ciudades y comunidades sostenibles.

Este artículo presenta una revisión del marco legislativo nacional y local de los RCD y el proceso de gestión de los mismos basados en estudios anteriores, contrastando a la ciudad de Barranquilla con Bogotá y Medellín. Así, identificadas las fortalezas, debilidades y características propias de la ciudad, se presentará una propuesta del Plan de Gestión de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) como modelo sostenible del proceso de manejo para la ciudad de Barranquilla. Por tanto, el objetivo de este artículo es definir la mejor alternativa para la elaboración del plan de gestión integral para una ciudad intermedia con un enfoque sostenible y en proceso de expansión urbana: y como caso estudio, se toma la ciudad de Barranquilla para plantear un modelo de gestión integral de RCD basado en los principios de la economía circular. Es importante mencionar que para poder llevar a cabo la estrategia de gestión sostenible presentada en este artículo, se tendrán en cuenta las características propias de la ciudad de Barranquilla, que es una ciudad intermedia (con aproximadamente 1.280 millones de habitantes), y que por sus características y crecimiento en los últimos 10 años posee características especiales como: su clima, falta de apropiación por parte de las empresas constructoras y la ciudadanía en relación al manejo de los RCD, formas inadecuadas de transportar este tipo de residuos (carro de tracción animal), falta de presencia de las entidades ambientales, cultura ciuda-

dana muy arraigada y mínima gestión de los entes administrativos de la ciudad en el área de control y seguimiento de los RCD. Reunir estos aspectos en un mismo análisis, constituye una parte importante de la investigación, debido que con base en ellos será posible generar y organizar un modelo integral acorde a la problemática real que presenta la ciudad.

MARCO LEGISLATIVO PARA LOS RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD) EN COLOMBIA

Contexto nacional

En Colombia, la Constitución Política en el capítulo 3, relaciona los derechos colectivos y del medio ambiente. En el artículo 80, se presenta la necesidad de que el manejo se planifique desde un comienzo y una reducción en el aprovechamiento de los recursos naturales, con el propósito de garantizar un desarrollo ambientalmente sostenible. En el año de 1974, se establece que, en relación con la creación de nuevo conocimiento y aplicaciones de residuos: “La investigación científica y técnica se fomentará para: 1. Reintegrar al proceso natural y económico los desperdicios sólidos, líquidos y gaseosos, provenientes de industrias, actividades domésticas o de núcleos humanos en general. 2. Perfeccionar y desarrollar nuevos métodos para el tratamiento, recolección, depósito, y disposición final de los residuos sólidos, líquidos o gaseosos no susceptibles de nueva utilización” (Colombia, 1974).

En el año de 1994, la Resolución 541 (Ministerio del medio ambiente de Colombia, 1994) fue creada para regular el cargue, transporte, almacenamiento y disposición final de los residuos de construcción, definiendo algunos conceptos (como: materiales, agregados sueltos, espacio público y emisiones fugitivas), y generando lineamientos en materia de

transporte, almacenamiento, cargue, descargue y disposición final. Para el año de 1996, con la Ley 142 (Congreso de Colombia, 1994), el gobierno nacional reglamenta la prestación del servicio público domiciliario de aseo, dejando en manos de los generadores de RCD, la responsabilidad de su recolección, transporte y disposición final. También les da a las entidades prestadoras del servicio de aseo la responsabilidad de coordinar estas actividades, asegurándose que en la ejecución se separen los RCD del resto de residuos sólidos y que su disposición final se haga en las escombreras autorizadas por los entes ambientales locales. Por medio del Decreto 1505 (Colombia, 2003), se estipula un Plan de Gestión Integral de los Residuos (PGIR), orientado a todos los procesos mediante los cuales se desarrollan actividades para un manejo adecuado y eficaz de los residuos sólidos generados en una ciudad. En este punto de actualizaciones de la normativa, se pudo comenzar a vislumbrar que la separación de los residuos era la base fundamental del concepto de economía verde. El Decreto 1259 (Congreso de Colombia, 2008), estableció la creación e implementación del comparendo ambiental, que ha servido como herramienta de culturización en relación al adecuado manejo de residuos sólidos y RCD, denominados a la fecha como escombros. La aplicación de dicho comparendo ambiental se inició con el propósito de prevenir los impactos ambientales negativos por la mala disposición e hizo énfasis en el efecto sobre la salud humana, haciendo uso de sanciones pedagógicas y económicas sobre las personas naturales o jurídicas que infringieran la normativa. Posteriormente (Colombia, 2015), buscó recoger en un solo cuerpo normativo todos los decretos reglamentarios vigentes expedidos hasta aquella fecha. La Tabla 1, muestra el resumen de la legislación (decretos y resoluciones entre otros), que compete al manejo y disposición final de los residuos sólidos.

Tabla 1 Normatividad general a nivel nacional y específica para las ciudades de Bogotá, Medellín y Barranquilla, para el manejo de RCD.

AÑO	NACIONAL	BOGOTÁ D. C.	MEDELLÍN	BARRANQUILLA
1974	Decreto Ley 2811 de 1974			
1989	Decreto 2462, Colombia, octubre 26 de 1989			
1994	Resolución 541, Colombia, 14 de diciembre de 1994			
1996	Decreto 605, Colombia, 27 de marzo de 1996			
2001	Ley 685, Colombia, agosto 15 de 2001			
2002	Decreto 1713, Colombia, 6 de agosto de 2002		Acuerdo 018, Título VII, Decreto 151	
2003	Decreto 1505, Colombia, 6 de junio de 2003	Resolución 556, Bogotá, 7 de abril de 2003		
2004	Decreto 190, Bogotá SDA, 22 de junio de 2004			
2005	Decreto 838, Colombia, 3 de marzo de 2005			
	Decreto 4741, Colombia, 30 de diciembre de 2005			
2006	Decreto 312, SDA Bogotá, 15 de agosto de 2006			
2007	Resolución 1362, Colombia, 2 de agosto de 2007	Decreto 620, SDA Bogotá, 28 de diciembre de 2007		
2008	Decreto 1259, Colombia, 19 de diciembre de 2008			
2009	Ley 1333, Colombia, 21 de julio de 2009	Acuerdo 417, Bogotá, 17 de diciembre de 2009	Decreto 0440, Medellín, 30 de marzo de 2009	
2010	Decreto 2715, Colombia, julio 28 de 2010	Decreto 0874, Medellín, 24 de mayo de 2010		
2011				
2012	Resolución 1115, Bogotá SDA, 26 de septiembre de 2012			
2013	Decreto 2981, 20 de diciembre de 2013	Resolución 715, Bogotá SDA, 30 de mayo de 2013	Decreto 1609, Medellín, 30 de julio de 2013	Decreto 0860
2015	Decreto 1076, Colombia, 26 de mayo de 2015	Resolución 932, Bogotá SDA, 9 de julio 2015		
2016				
2017	Resolución 0472, Colombia, 28 de febrero de 2017	Circular 100-0017, Medellín Cornare, 5 de mayo de 2017		Resolución 1482 de diciembre de 2017 - Barranquilla Verde

Fuente: elaboración propia.

Caso Bogotá

Para el caso de Bogotá, mediante el Decreto 190 ([Alcaldía mayor de Bogotá, 2004](#)) se reconoció el manejo adecuado de los residuos sólidos regionales. El Decreto 312 de 2006 ([Alcaldía mayor de Bogotá, 2006](#)), adoptó el plan maestro para el manejo integral de residuos sólidos para la ciudad, que fue complementado por el Decreto 620 ([Alcaldía mayor de Bogotá, 2007](#)), buscando estructurar un sistema que contuviera los ítems adecuados para el tratamiento, transporte y disposición final de escombros, advirtiendo la necesidad de hacer control en la generación de los mismos. Otro aspecto sobre el cual se buscó dar lineamientos fue la parte tarifaria, donde se estableció el subsistema de reciclaje y aprovechamiento de residuos sólidos ordinarios, designando equipos especiales para su depósito, reciclaje y aprovechamiento de los residuos recolectados en espacio privado ([Alcaldía mayor de Bogotá, 2007](#)). Nació entonces el concepto de escombrera, plantas de trituración o de tratamiento y aprovechamiento de escombros. Posteriormente, la Secretaría Distrital de Ambiente – SDA, expidió la Resolución 2397 ([Secretaría distrital del medio ambiente de Bogotá, 2011](#)), que tuvo como objeto la regulación técnica del tratamiento y/o aprovechamiento de los escombros en la ciudad de Bogotá, proponiendo que las empresas generadoras de escombros, de carácter privado o público, que realizaran labores dentro de la ciudad, incluyeran, desde las etapas de estudio y diseño, el uso de materiales provenientes de centros de tratamiento para buscar un correcto aprovechamiento de los residuos. Para el año 2012, se expidió la Resolución 1115 ([Secretaría Distrital de Ambiente, 2012](#)), la cual presenta los lineamientos técnicos y ambientales para las actividades de aprovechamiento y tratamiento de los residuos de construcción y demolición en el Distrito Capital. Asimismo, definió el

concepto de escombros de una forma internacional, que los define como “residuos objeto de aprovechamiento y/o tratamiento”, y los denomina “Residuos de Construcción y Demolición – RCD”. La Resolución 715 ([Secretaría distrital del medio ambiente de Bogotá, 2013](#)), se elaboró para hacer algunos ajustes y aclaraciones de términos, y también definió como Residuos de Construcción y Demolición – RCD no susceptibles de aprovechamiento, a los materiales aprovechables contaminados con residuos peligrosos y a los materiales que por su estado no pueden ser aprovechados. Para el año 2015, la Alcaldía Mayor de Bogotá, en el marco de su programa Bogotá Humana, publicó el documento denominado Gestión Integral de RCD, orientado a servir como guía en la elaboración de planes de gestión de los mismos en la obra.

Caso Medellín

En el año 2002, en la ciudad de Medellín, se creó la Secretaría Distrital del Medio Ambiente, por el Decreto 151 ([Alcaldía municipal de Medellín, 2002](#)). Posteriormente, en el año 2008, se colocó en marcha el programa de sustitución de vehículos de tracción animal, el cual buscó evitar que este tipo de vehículos realizaran las labores de recolección ilegal de los RCD. En el año 2009, se definieron, de acuerdo a las condiciones de la zona, cómo deben manejarse los RCD, por medio del Manual de gestión socioambiental para obras en construcción ([Secretaría del Medio Ambiente, 2010](#)). En 2013, la alcaldía de la ciudad de Medellín, basada en la implementación de la legislación nacional, incluyó el manejo, tratamiento, transporte, disposición final y aprovechamiento de los escombros o RCD, publicando la Guía de manejo socioambiental para la construcción de obras de infraestructura pública ([Alcaldía municipal de Medellín, 2013](#)).

Caso Barranquilla

En Barranquilla, para marzo del 2013, la Alcaldía Distrital, por medio de la Secretaria de Gobierno y la Policía Ambiental, instauró la imposición de un régimen ambiental en la ciudad que sanciona a personas naturales y jurídicas que, dentro de la jurisdicción del Distrito Especial, Industrial y Portuario de Barranquilla, incurran en faltas contra el medio ambiente, los ecosistemas y la sana convivencia, mediante la mala disposición y/o manejo de los residuos sólidos o escombros (Alcaldía de Barranquilla, 2012). Este es conocido como el Comparendo Ambiental, creado e instaurado bajo los estatutos de la Ley 1259 (Congreso de Colombia, 2008). Además, se definieron las actividades relacionadas con el transporte y la disposición de RCD que serían consideradas infracciones y merecedoras de un comparendo ambiental: 1. Fomentar el transporte de basura y escombros en medios no aptos ni adecuados; 2. Arrojar basuras desde un vehículo automotor o de tracción humana o animal en movimiento o estática a las vías públicas, parques o áreas públicas; 3. Arrojar residuos sólidos o escombros en espacio público y en sitios no autorizados; 4. Realizar quema de residuos sólidos y/o

escombros sin los controles y autorizaciones establecidos por la normatividad vigente. El ente ambiental de la ciudad redactó la Resolución 1011 (Departamento técnico Administrativo del Medio Ambiente Barranquilla – DAMAB, 2016), en donde se presentaron los lineamientos técnicos, ambientales y los protocolos para el manejo, aprovechamiento, transporte y disposición final de Residuos de Construcción y Demolición - RCD en el distrito de Barranquilla. En 2017, se emitió la Resolución 1482 (Barranquilla verde, 2017), por medio de la cual se reglamentó el registro de generadores y gestores buscando la gestión integral de RCD en la ciudad.

PLAN DE GESTIÓN INTEGRAL DE RCD PARA UNA CIUDAD SOSTENIBLE: CASO BARRANQUILLA

Proyectando a Barranquilla como una ciudad sostenible

Orientar una ciudad hacia la sostenibilidad implica establecer el manejo de residuos como principio rector de los planteamientos metodológicos de desarrollo y expansión, y

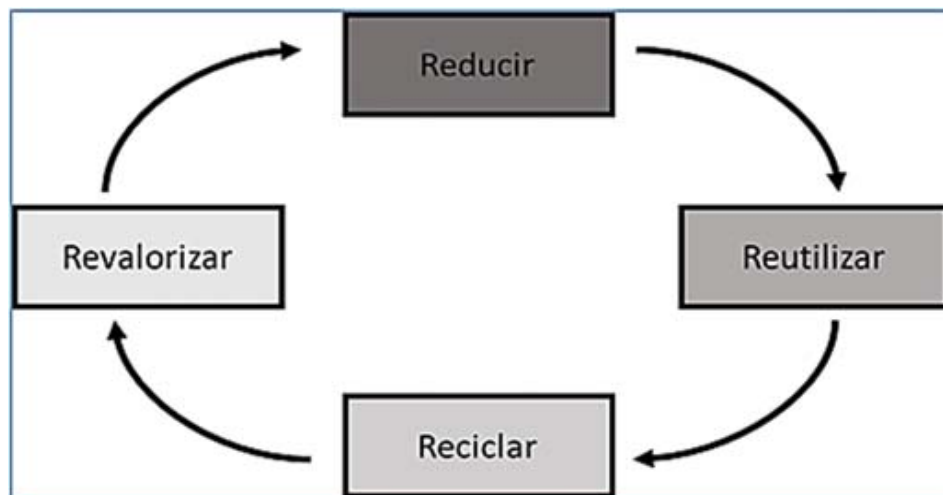


Figura 1. Principio de jerarquía en el manejo de los residuos (Empresa Triple A de Barranquilla S.A. E.S.P, 2018)
Fuente:(Pacheco-Bustos & Páez, 2019)

cuyo objetivo es el de encaminar la gestión integral de RCD hacia la prevención de la generación de los mismos y la maximización de su aprovechamiento. Así, se propone la aplicación del concepto de economía circular en el tratamiento de los RCD generados en la ciudad, de tal manera que se cierre el ciclo de vida del residuo y se alcance la eficiencia en el uso de los recursos. Como se muestra en la [Figura 1](#), el orden jerárquico para el correcto manejo de los RCD es: reducción, reutilización, reciclado y revalorización, minimizando los impactos medioambientales y priorizando la sostenibilidad (Pacheco-Bustos & Páez, 2019).

Para desarrollar esta parte de la investigación, fue necesario entender que Barranquilla tiene aspectos únicos y diferenciadores que hacen que su modelo de gestión se deba plantear bajo ciertas particularidades. Dentro de estos

aspectos, se tiene: el clima de la ciudad, la existencia de una sola empresa encargada de la recolección y disposición final de los residuos generados, pocas opciones de áreas legalmente constituidas para la disposición final, baja apropiación social del tema de separación de los RCD en la obra, así como un bajo conocimiento de la normativa vigente y falta de comunicación de la misma por los entes ambientales (particularidades muy similares a otras ciudades intermedias a nivel mundial). Basado en lo anterior, se realizó una investigación y se planteó un esquema general del plan de gestión integral con énfasis en separación en la fuente y el tratamiento de los residuos recolectados (principios de la economía circular), que fue mejorado a medida que se realizaban encuestas a los principales actores involucrados en la gestión y manejo de los RCD en la ciudad de

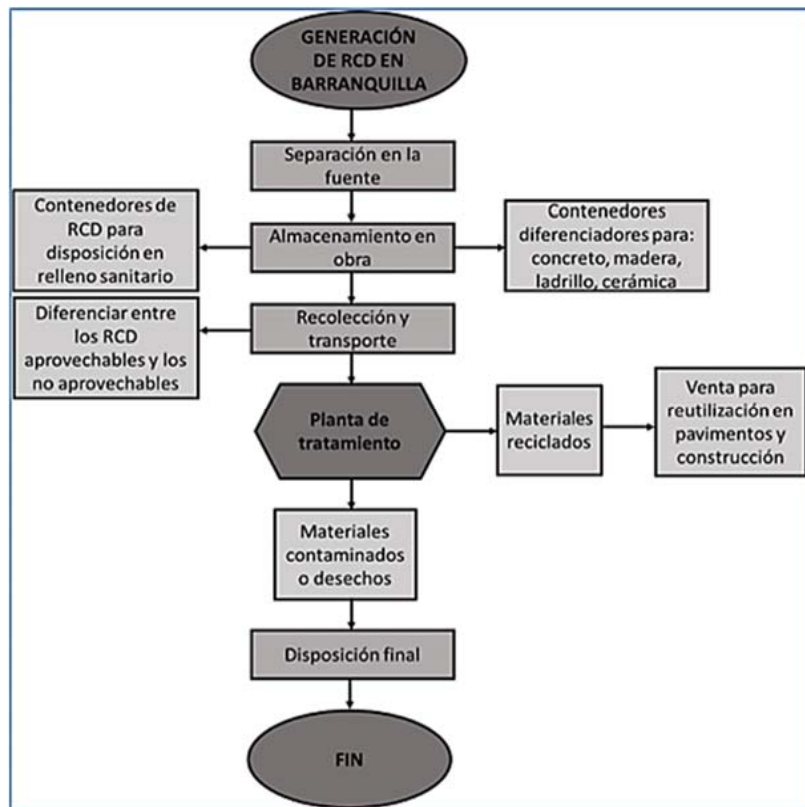


Figura 2. Esquema general del plan de gestión integral de RCD para la ciudad de Barranquilla
 Fuente: elaboración propia.

Barranquilla. Una vez identificadas las características principales de la ciudad, se puede plantear el esquema general del plan de gestión integral de RCD para Barranquilla, basándose en el principio de jerarquía anteriormente mencionado (Figura 1). De esta manera, una vez generados los RCD en la obra, se debe proceder a realizar un proceso de separación en la fuente, el cual se basa en un almacenamiento selectivo de los residuos generados para facilitar su posterior gestión: sea su aprovechamiento o disposición final. Así, se plantea el uso de contenedores diferenciadores para aquellos RCD que serán dispuestos, pues por sus características no podrán ser aprovechados, y otros contenedores individuales para residuos como: concreto, madera, ladrillo, cerámica, entre otros que pueden ser reutilizados o reciclados. Se procede a realizar la recolección y transporte de los RCD, para dirigir aquellos materiales aprovechables a las plantas de tratamiento y transformación y de esta forma producir nuevos materiales reciclados, como lo muestra la Figura 2, en donde se muestra el esquema sugerido para el plan de gestión integral de RCD para la ciudad de Barranquilla. En caso de presentarse algún material contaminado, se debe disponer en los lugares establecidos por la entidad ambiental.

Prevención y reducción

Para orientar la gestión hacia la sostenibilidad en el manejo de residuos de construcción y demolición en la ciudad, es necesario priorizar las medidas de prevención y reducción en las obras. Así, actividades como una adecuada programación de obra, abastecimiento de suministros y correcto cálculo de cantidades, pueden beneficiar o afectar en la generación de los residuos. Mantener los sitios de trabajo limpios y ordenados y contar con los equipos necesarios para realizar las actividades, pueden ser puntos clave para la minimización de la generación de desperdicios y así

lograr optimizar la producción de RCD en las obras de la ciudad.

Almacenamiento en obra: separación en la fuente

En la ciudad de Barranquilla, cerca de un 63% de las obras civiles actualmente activas en la ciudad no realizan separación en la fuente de los residuos generados (Pacheco et al., 2017), por lo que para aumentar el porcentaje de aprovechamiento de los residuos como concreto, madera, ladrillo y cerámica (seleccionados por su aplicabilidad y porcentaje de producción), se propone realizar una separación manual diferenciadora in situ por materiales aprovechables y no aprovechables. Esto es conocido como separación en la fuente, y se caracteriza por realizar el acopio selectivo de los residuos seleccionados, dividiéndolos en los dos grandes grupos anteriormente mencionados. A grandes rasgos, un RCD es no aprovechable si se encuentra contaminado, es peligroso o es un residuo ordinario; de lo contrario, dicho residuo se puede clasificar como RCD aprovechable e implica un manejo particular para su reciclaje. En este artículo, se propone el uso de contenedores diferenciadores de los materiales aprovechables como concreto, madera y orgánicos, de tal manera que puedan ser recogidos dependiendo de las cantidades generadas de cada uno y puedan ser transportados al centro de aprovechamiento pertinente. Los residuos no aprovechables deben encontrarse en un contenedor llamado "Varios", donde estén mezclados los residuos ordinarios con los no peligrosos, para proceder a la recolección, transporte y disposición final de dichos materiales en el relleno sanitario. En un contenedor aparte, se deben almacenar los residuos peligrosos, tomando especiales medidas para su manipulación. Se propone la alternativa de que los contenedores diferenciadores de residuos sean asignados a cada obra por parte de la administración distrital,

quien es también la encargada de socializar la forma correcta de separar los residuos y concientizar al gremio constructor de los beneficios ambientales y económicos que traería el aprovechamiento de estos en las obras.

Recolección y transporte

Respecto a la recolección y transporte, en Barranquilla se presenta una problemática marcada dada la poca conciencia ambiental de los constructores, lo cual debe ser superado por medio de un plan de gestión integral de residuos de construcción y demolición. En la ciudad, la mayor cantidad de obras permite que la recolección y el transporte se realice por quien menor costo represente, incluso cuando estos no se encuentran inscritos como gestores ante la entidad ambiental de la ciudad. De hecho, una práctica comúnmente empleada es utilizar vehículos de tracción animal para realizar las actividades

mencionadas (Morán del Pozo et al., 2011). En respuesta a esto, las entidades ambientales deben ejercer un mayor control, pero también se debe generar un sistema tarifario que equilibre los costos de las empresas gestoras legalmente constituidas presentes en el mercado. Un ejemplo del desequilibrio en el cobro de recolección está dado directamente por la comparativa entre el costo por m³ que cobra la empresa encargada de la recolección y aseo de la ciudad: Triple A de Barranquilla S.A. E.S.P – Sociedad de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Barranquilla S.A. E.S.P, versus el cobro que realiza la competencia en el mercado, como se muestra en la Figura 3. Sin embargo, se debe tener en cuenta que sólo se le debe comparar con aquellas empresas privadas que tengan autorización para realizar la recolección y el transporte, pues vehículos sin la logística ni los premisos reglamentarios no deberían ejecutar estas actividades en la

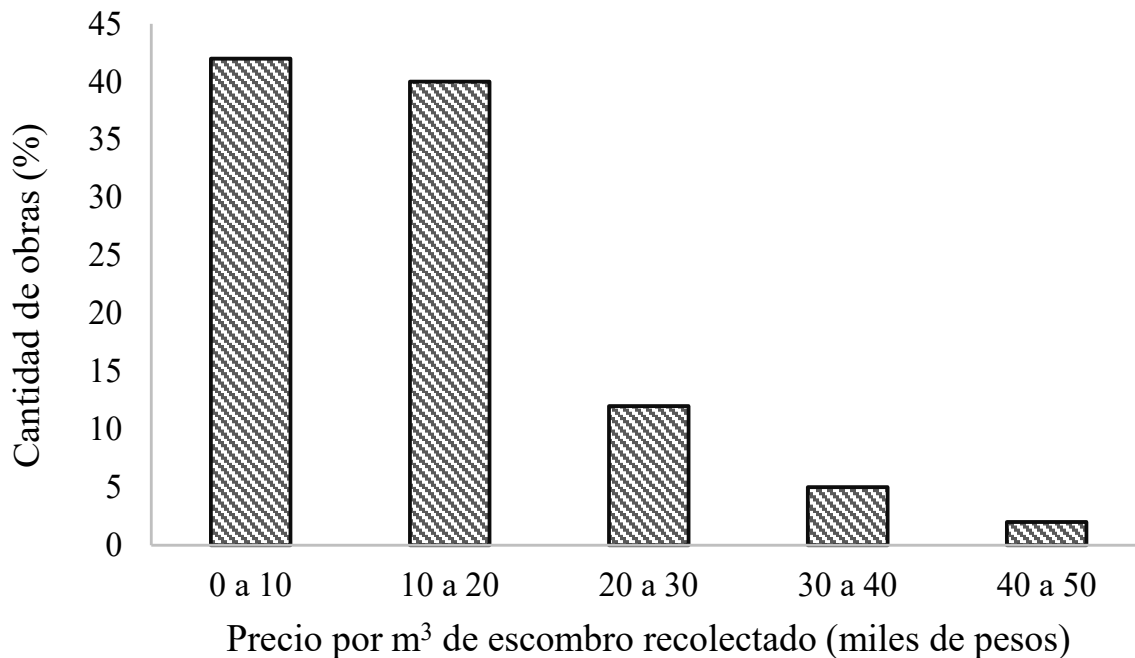


Figura 3. Rango de precios de recolección de RCD en Barranquilla
Fuente: (Pacheco et al., 2017)

ciudad. Por lo tanto, debe evaluarse el costo de la recolección y transporte por parte de la entidad ambiental, y proponer la creación de empresas o cooperativas de recolección especializadas en RCD, para no solo tener la empresa de aseo como opción única. Dentro del análisis del costo de transporte por m³ de RCD, es necesario conocer la cantidad de: material a ser reciclado, material a ser reusado en la misma u otra obra, material a ser depositado en un botadero legalmente constituido, y, por último, material a ser transportado al proceso de tratamiento.

Aprovechamiento

Dar valor a un residuo para volverlo a introducir en el mercado es uno de los principios básicos de la economía circular. El aprovechamiento de los RCD es la etapa en la que se sopesa la posibilidad de extender la vida útil del residuo, y se define como “toda actividad que busque la gestión adecuada de los RCD a través de la reutilización, reciclaje y revalorización, con el propósito de incurrir lo mínimo posible en la disposición final” (Colombia, 2013). Así, la resolución 0472 de 2017 clasifica los residuos de construcción y demolición en “susceptibles de aprovechamiento” y “no susceptibles de aprovechamiento”. Las obras civiles que apliquen la gestión integral de los RCD deberán remitirse a la normativa colombiana para identificar aquellos residuos susceptibles de aprovechamiento y plantear las alternativas de reutilización o revalorización que se le dará a cada uno.

Por otro lado, se propone a la administración distrital “alentar a las empresas a que adopten prácticas sostenibles e incorporen información sobre la sostenibilidad en su ciclo de presentación de informes” (Programa de las Naciones Unidas, 2018), como enuncia una meta del objetivo de desarrollo sostenible 12, relativo a la producción y consumo responsable.

Disposición final

Relativo a la disposición final de los residuos de construcción y demolición, se recomienda que, en lo posible, los únicos residuos que sean dispuestos sean aquellos no aprovechables; es decir, los residuos peligrosos o contaminados, ordinarios, o aquellos que por sus características no pueden ser aprovechados. La problemática actual en la ciudad de Barranquilla, como en muchas otras ciudades intermedias, radica en la carencia de una planta de tratamiento en donde se puedan revalorizar los residuos, por lo que se terminan disponiendo en rellenos sanitarios incluso aquellos RCD que pueden ser utilizados como reemplazos de agregados en el concreto o asfalto, cerámica de uso arquitectónico, entre otros. Las consecuencias de estas prácticas no solo repercuten en el desperdicio de materiales que pueden ser tratados o reutilizados, sino también en la subutilización de los rellenos sanitarios.

PROPUESTA DE PLANTA DE TRATAMIENTO

Selección de planta de tratamiento para ciudades intermedias en proceso de expansión urbana

Partiendo de las necesidades que se tengan para tratar los RCD, existen cuatro niveles tecnológicos de las plantas de tratamiento (Del Río et al., 2010).

Nivel 1: aquellas que utilizan mano de obra para la eliminación del material indeseable y la selección del material a tratar. Recomendable para instalación en sitios de acopio de RCD con el objetivo de recuperar materiales fáciles de valorizar, tratar o eliminar mediante disposición controlada.

Nivel 2: consta de trituración, fragmentación y clasificación granulométrica, lo que permite la venta inmediata, disminuyendo notablemente el volumen de residuo a depositar en el relleno sanitario. Se recomienda para pro-

ducir materiales reciclados para aplicación probada en obras públicas y privadas.

Nivel 3: propicias para el tratamiento de materiales limpios como son los concretos estructurales, concretos de vías, mampuestos y algunos cerámicos seleccionados. Son instalaciones de tipo fijo, y su único problema radica en que el punto de localización debe estar dentro del radio de influencia de cobertura de la planta, de tal manera que el constructor prefiera utilizar el material reciclado antes que el material nuevo.

Nivel 4: a base de demoliciones selectivas (Morán del Pozo et al., 2011), y de clasificaciones en húmedo. Para este nivel tecnológico no se vislumbra una aplicación real hasta que la reglamentación sobre las tasas de vertido, la obligación de reciclar y los precios de venta, resulten lo suficientemente atractivos por la rentabilidad para el inversor.

Respecto a los niveles de las plantas de tratamiento, la normativa vigente y la gestión actual de la ciudad en relación con los RCD, se identifica que la mejor planta a ser implementada es la del nivel tecnológico número 2. Este tipo de plantas disminuye sustancialmente los residuos a disponerse en rellenos sanitarios (concreto, madera, ladrillo, cerámica), y permite que sean usados en la generación de nuevos productos (Alcaldía municipal de Medellín, 2013).

Proceso de operación de planta de tratamiento

Con el nivel de la planta definido, se procede a definir si la planta será semifija o fija. La primera de estas tiene la ventaja de poder ubicarse temporalmente en los sitios de generación (como demoliciones de vías y edificaciones), y moverse mediante sistemas de orugas o ruedas de neumáticos a otros sitios de generación de RCD sin ningún inconveniente. Por su parte, las plantas fijas carecen de capacidad de desplazamiento a las zonas

de generación, pero poseen características muy especiales como el tamaño, la posibilidad de tratar materiales heterogéneos, y la disminución en el costo del tratamiento por tonelaje de material (Del Río et al., 2010). Por esta razón, una planta fija bien ubicada otorgaría excelentes resultados en la ciudad de Barranquilla. Debido a que se considera una separación previa en el origen, los RCD aprovechables deben ser identificados y almacenados en zonas en donde se pueda realizar la eliminación de aquellos productos que pudiesen entorpecer las siguientes etapas del tratamiento. En estas zonas también se debe realizar una limpieza de los RCD para evitar toda contaminación con materia orgánica u otros residuos adheridos que puedan generar problemas al ser reutilizados como materiales pétreos. Además de lo anterior, se debe realizar una separación magnética para poder obtener la mayor cantidad de elementos metálicos y de esta forma evitar que sigan al proceso de trituración (Del Río et al., 2010). La trituración debe ser pensada en dos fases: la primera fase está relacionada con el tamaño esperado de los RCD que se vayan a triturar, y la segunda en relación con el tamaño de la partícula que se quiera como producto final (agregados pétreos para el reúso). Luego de la trituración, se deben almacenar los materiales en pilas y deben ser cubiertos con protecciones superficiales para evitar algún tipo de contaminación atmosférica y de suelos.

Las características físicas, mecánicas, químicas y biológicas de los RCD a ser triturados debe ser otro aspecto a tener en cuenta, puesto que, dependiendo de su composición, este puede ser usado o no en la conformación de nuevos materiales, en mezclas asfálticas o en concretos especiales. Es importante estudiar y conocer muy bien la composición química de los agregados pétreos resultado del proceso de trituración, puesto que estos pueden

reaccionar con el cemento o el asfalto, incidiendo en la pérdida de la resistencia deseada y otros factores que se están estudiando actualmente.

Uno de los objetivos del plan de gestión es lograr el mayor porcentaje de aprovechamiento posible por metro cúbico de RCD reciclado. Sin embargo, es importante aclarar que existirá una porción de ellos que deberá ser en definitiva dispuesta de una forma adecuada,

ya sea en rellenos sanitarios o en sitios protegidos y adecuados para tal fin.

Esquema general de planta de tratamiento

La Figura 4, presenta el esquema general de los procesos asociados a la alternativa elegida, que sería ideal para la planta de tratamiento de RCD de la ciudad de Barranquilla.

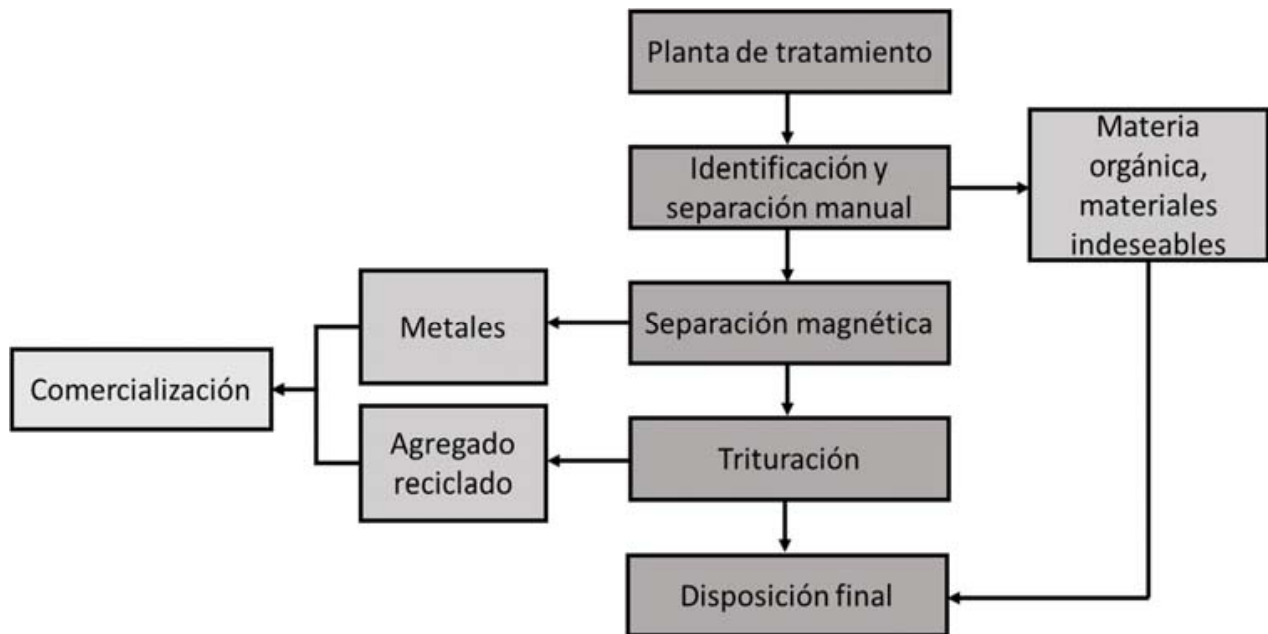


Figura 4. Esquema general de planta de tratamiento de RCD para la ciudad de Barranquilla
Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente documento se realizaron dos análisis sobre la aplicación de un plan de gestión de RCD en una ciudad intermedia, caso de estudio Barranquilla. Por un lado, se analizó la legislación vigente para la ciudad, haciendo una comparativa con las ciudades de Colombia con más experiencia en este

tipo de gestión. Por otra parte, se presentó una alternativa de gestión y tratamiento para los RCD generados en la ciudad de Barranquilla, basado en estudios previos (Pacheco et al., 2017). Así, del presente trabajo se pueden sacar las siguientes conclusiones.

- Se hace necesario que Barranquilla empiece a implementar medidas de gestión

integral para el manejo de RCD, siguiendo el ejemplo de ciudades pioneras como Medellín y Bogotá, en aras de cumplir con la normatividad local y nacional vigente.

- Cada generador y/o gestor de RCD deberá crear e implementar su propio Plan de Gestión Integral, de tal manera que se planteen en él las medidas particulares a tomar para el buen manejo de los residuos en sus respectivas obras.
- Se deben priorizar las medidas de prevención y reducción de los RCD, lo que implica un cambio en la conciencia ambiental en el gremio de la construcción de Barranquilla, fomentando así la sostenibilidad.
- Es importante implementar medidas de aprovechamiento de aquellos RCD que cuenten con características para su reutilización o reciclaje. De esta manera, se disminuye la cantidad de residuos dispuestos en rellenos sanitarios, aumentando la vida útil de los mismos.
- La separación en la fuente representa la clave para maximizar el aprovechamiento de los residuos generados en obra, pues evita que se contaminen o se mezclen con residuos que afecten las propiedades para su reutilización o reciclaje.
- Es necesario afianzar el acompañamiento de las entidades locales como la alcaldía, la policía ambiental y los entes de control, a las empresas constructoras que se encuentran en el periodo de implementación de la Resolución 1482 de 2017.
- Adicional al beneficio económico, la implementación de estas nuevas tecnologías de tratamiento de residuos trae consigo mejoras en la calidad de vida de la población y en el medio ambiente, debido

a que genera fuentes de empleo y reduce la explotación de recursos no renovables.

- Asimismo, a raíz de la identificación de los alcances del documento y de los puntos a mejorar en la ciudad de Barranquilla, es posible realizar las siguientes recomendaciones.
- En futuras investigaciones, se hace necesario realizar un análisis económico para conocer la rentabilidad que tendría el mercado de los residuos de construcción y demolición, como el agregado reciclado o el acero, y definir, además, tarifas óptimas para la recolección, transporte y comercialización de los productos finales obtenidos del procesamiento en una planta de tratamiento. Asimismo, se recomienda realizar una evaluación económica comparativa entre los gastos que acarrea la gestión actual de los residuos y los costos e ingresos que se tendrían al implementar las medidas de gestión integral de los mismos.
- Se recomienda realizar un estudio para definir la ubicación de la planta de tratamiento, identificando todos los focos o puntos de generación de RCD de la ciudad.
- Es necesario tener en cuenta los diferentes ensayos (físicos, mecánicos, químicos y biológicos), para la caracterización de los RCD, con el objetivo de definir el tamaño y capacidad de la trituradora a ser empleada en la planta de tratamiento, así como los tamaños de los productos a comercializar para ser incorporados en la construcción de pavimentos y edificios.
- Por último, con este artículo investigativo se pretende dar el primer paso para corregir y disminuir las prácticas inadecuadas que se están llevando a cabo en la ciudad, mediante la aplicación y puesta en

marcha de un plan de gestión integral de residuos que garantice un cambio cultural, comercial y político, que dé beneficios tributarios para la comercialización y reúso de agregados pétreos reciclados.

Así, se espera orientar a la ciudad de Barranquilla hacia la sostenibilidad, partiendo del manejo óptimo de los residuos de construcción y demolición.

REFERENCIAS

- Alcaldía de Barranquilla. (2012). Decreto 0860. , 3 de septiembre. Retrieved from www.barranquilla.gov.co/publicaciones/doc_download/1649-gaceta-no-373
- Alcaldía mayor de Bogotá. (2004). Decreto 190. , 1 de junio.
- Alcaldía mayor de Bogotá. (2006). Decreto 312. , 15 de agosto.
- Alcaldía mayor de Bogotá. (2007). Decreto 620. , 28 de diciembre.
- Alcaldía municipal de Medellín. (2002). Decreto 151. , 20 de febrero.
- Alcaldía municipal de Medellín. (2013). Guía de manejo socio-ambiental para la construcción de obras de infraestructura pública. , marzo.
- Barranquilla verde, A. de B. (2017). Resolución 1482. Retrieved from <http://barranquillaverde.gov.co/planeacion-gestion-y-control/normatividad>
- Castaño, J., Misle Rodriguez, R., Lasso, L. A., Gómez Cabrera, A., & Ocampo, M. S. (2013). Gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en Bogotá: perspectivas y limitantes. *Tecnura*, 17(38), 121–129. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2013.4.a09>
- Colombia. (1974). Decreto Ley 2811. Retrieved from http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Decreto_2811_de_1974.pdf
- Colombia. (2003). Decreto 1505. , 6 de junio.
- Colombia. (2013). Decreto 2981. Retrieved from http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Decretos/2013/Documents/DICIEMBRE/20/DECRETO_2981_DEL_20_DE_DICIEMBRE_DE_2013.pdf
- Colombia. (2015). Decreto 1076. , 26 de mayo.
- Congreso de Colombia. (1994). ley 142. Diario Oficial No. 41.433 de 11 de julio.
- Congreso de Colombia. (2008). Decreto 1259. , Diario Oficial No. 47.208 de 19 de diciembre.
- Del Río, M., Izquierdo, P., Salto, I., & Santa Cruz, J. (2010). La regulación jurídica de los residuos de construcción demolición (RCD) en España. El caso de la Comunidad de Madrid. *Informes de La Construcción*, 62(517), 81–86. <https://doi.org/10.3989/ic.08.059>
- Departamento técnico Administrativo del Medio Ambiente Barranquilla – DAMAB. (2016). Resolución 1011. , 28 de junio. economycircuar.org. (2018). Economía Circular. Retrieved from https://economycircuar.org/wp/?page_id=62
- Ministerio del medio ambiente de Colombia. (1994). Resolución 541. 14 de diciembre.
- Morán del Pozo, J. M., Juan Valdés, A., Aguado, P. J., Guerra, M. I., & Medina, C. (2011). Estado actual de la gestión de residuos de construcción y demolición: limitaciones. *Informes de La Construcción*, 63(521),

- 89–95. <https://doi.org/10.3989/ic.09.038>
- Pacheco-Bustos, C., & Páez, C. (2019). Guía para el manejo integral de los Residuos de Construcción y Demolición en la ciudad de Barranquilla. Barranquilla: Editorial Universidad del Norte.
- Pacheco, C., Sánchez, E., Fuentes, L., & Rondón, H. (2017). Residuos de construcción y demolición (RCD), una perspectiva de aprovechamiento para la ciudad de Barranquilla desde su modelo de gestión. *Revista Ingeniería y Desarrollo*, (57).
- Programa de las Naciones Unidas. (2018). Objetivos del desarrollo sostenible. Retrieved from <http://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html>
- Ramírez, J. M. C. (2007). Colección de tesis digitales, Universidad de las Américas Puebla, Guía para el manejo de residuos sólidos generados en la industria de la construcción. Retrieved from http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/mgc/cortina_r_jm/indice.html
- Robayo, R., Mattey, P., Silva, Y., Burgos, D., & Delvasto, S. (2015). Los residuos de la construcción y demolición en la ciudad de Cali: un análisis hacia su gestión, manejo y aprovechamiento. *Tecnura*. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.2.a12>
- Secretaría del Medio Ambiente, E. P. de M. (2010). Manual de gestión socio-ambiental para obras de construcción. Retrieved from http://www.colmayor.edu.co/uploaded_files/images/archivos/normograma/manuales/Manualambientalparaprocesosconstructivos.pdf
- Secretaría Distrital de Ambiente, B. D. C. (2012). Resolución 1115. Retrieved from http://www2.igac.gov.co/igac_web/normograma_files/RESOLUCION11152012.pdf
- Secretaría distrital del medio ambiente de Bogoá. (2013). Resolución 715. , 30 de mayo. Retrieved from <http://www.fvs.gov.co/transparencia/marco-legal/normatividad/resolución-715-2013>
- Secretaría distrital del medio ambiente de Bogotá. (2011). Resolución 2397. , 25 de abril.
- Xargay, H., Ripani, M., Caggiano, A., Folino, P., & Enzo Martinelli. (2019). Uso de materiales reciclados en compuestos cementicios. *Tecnura*, 23(60), 38–51. <https://doi.org/10.14483/22487638.14697>





Análisis de agua no contabilizada en el sistema de abastecimiento urbano del municipio de Facatativá, Colombia

Analysis of non-revenue water in the urban supply system of the municipality of Facatativá, Colombia

Diego Bueno-Herrera¹ , Edison Monroy-Ávila² , Carlos Zafra-Mejía³ 

Cómo citar: Bueno-Herrera, D., Monroy-Ávila, E. y Zafra-Mejía, C. (2020). Análisis de agua no contabilizada en el sistema de abastecimiento urbano del municipio de Facatativá, Colombia. *Tecnura*, 24(63) 73-87. DOI: <https://doi.org/10.14483/22487638.15333>

Fecha de recepción: 19 de junio de 2019

Fecha de aceptación: 18 de octubre de 2019

RESUMEN

Contexto: Las pérdidas de agua son un obstáculo financiero para empresas prestadoras del servicio de abastecimiento, ya que generan pérdidas económicas que son trasladadas a los usuarios, elevando de esta manera los costos de suministro del agua. El objetivo de este artículo es presentar un análisis del agua no contabilizada en un sistema de abastecimiento urbano en Colombia.

Método: Este estudio se realizó a partir de información del agua producida (AP) y facturada por el sistema de abastecimiento durante cerca de 16 años. Se realizó un análisis comparativo con respecto a reportes de agua no contabilizada en sistemas colombianos e internacionales de referencia. Se evaluó también la influencia del régimen de precipitación sobre el índice de

agua no contabilizada (IANC). Se realizó finalmente un análisis económico prospectivo mediante modelos ARIMA.

Resultados: Se observa un incremento del 5,0 % en el IANC por cada 100 000 m³ de AP. Existe un incremento del 2,28 % en el IANC por cada incremento de 100 mm en la precipitación anual. El sistema posee un menor precio en el AP (22,2 %) con respecto a sistemas latinoamericanos de referencia. Sin embargo, el sistema posee un mayor precio (33,3 %) en relación con el promedio colombiano. El análisis ARIMA muestra que los efectos del AP en un instante de tiempo determinado se transfieren durante seis meses en el sistema de abastecimiento.

Conclusiones: La aplicación del IANC en sistemas de abastecimiento es una herramienta útil

1 Ingeniero civil, especialista en Agua y Saneamiento Ambiental. Escuela de Posgrados, Universidad Manuela Beltrán. Bogotá, Colombia. Contacto: diegob693@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2086-3781>

2 Ingeniero ambiental, especialista en Agua y Saneamiento Ambiental, magíster en Tecnologías para el Manejo de Aguas y Residuos. Escuela de Posgrados, Universidad Manuela Beltrán. Bogotá, Colombia. Contacto: ingenierofabianm@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3757-9442>

3 Ingeniero civil, magíster en Ingeniería Ambiental, doctor en Ingeniería Ambiental. Grupo de Investigación en Ingeniería Ambiental (GII-AUD), Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: czafra@udistrital.edu.co

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4061-4897>

para el estudio y desarrollo de programas de control de pérdidas de agua.

Palabras clave: acueducto; agua no contabilizada; ARIMA; sistema de abastecimiento.

ABSTRACT

Context: Water losses are a financial obstacle for supply service providers as they generate economic losses that are passed on to users, thereby raising water supply costs. The objective of this paper is to show an analysis of non-revenue water in an urban supply system in Colombia.

Method: This study was conducted from information of water produced (WP) and billed by the supply system for about 16 years. A comparative analysis was carried out with respect to reports of non-revenue water in Colombian and international reference systems. Rainfall influence on the non-revenue water index (NRWI) was also

assessed. A prospective economic analysis was finally carried out using ARIMA models.

Results: There is an increase of 5.0% in NRWI per 100 000 m³ of WP. There is an increase of 2.28% in NRWI for each increase of 100 mm in annual rainfall. The system has a lower price on WP (22.2%) in relation with Latin American reference systems. However, the system has a higher price (33.3%) relative to the Colombian average. Analysis ARIMA shows that the effects of AP in an instant of time are transferred during six months in the water supply system.

Conclusions: The application of NRWI in supply systems is a useful tool for the study and development of water loss control programs.

Keywords: Aqueduct; Non-revenue water; ARIMA; Water supply system.

INTRODUCCIÓN

Las pérdidas de agua en sistemas de abastecimiento posiblemente tuvieron un impacto ambiental negativo por la sobreexplotación del recurso hídrico y, en lo financiero, conllevaron probablemente al incremento de tarifas por prestación del servicio debido a las elevadas inversiones económicas para cubrir estos costos operacionales y administrativos (Tabesh et al., 2018). Las investigaciones a nivel mundial indicaron que, de seguir las prácticas actuales de consumo de agua, enfrentaremos una escasez mundial del 40 %, entre la demanda prevista y el suministro disponible para el año 2030 (Agatón et al., 2016; Salimi et al., 2018). Por ejemplo, se estimó para el año 2013 que 780 millones de habitantes no tuvieron acceso a agua potable segura, y que en algunos países esto provocó la muerte de grupos sensibles (niños y ancianos) y pérdidas anuales de hasta el 7,0 % del PIB (The World Bank, 2013; Pérez, Flores,

González y Mota, 2019). En el mundo, más de 32 billones de m³ de agua potable se fugaron de sistemas de abastecimiento al año, con un costo asociado superior a los USD 18.000 millones (OSE, 2019).

En el contexto latinoamericano, el Banco Mundial (2013) estimó en promedio que el 45% del agua producida correspondió a agua no facturada. El caso colombiano no fue la excepción, Ojeda y Arias (2000), y García y Benavides (2019) reportaron en promedio que las pérdidas de agua fueron posiblemente superiores al 33% y 43% en los sistemas de abastecimiento municipales, respectivamente. García, Vargas y Granados (2013) también reportaron la escasez de estudios publicados que reunieran y analizaran los datos de pérdidas de agua en empresas prestadoras del servicio de acueducto. Esta carencia de información pudo afectar el proceso de control, regulación y las propuestas de gestión que se plantearon para la disminución de las pérdidas del líquido en los sistemas de abastecimiento latinoamericanos.

A partir de lo anterior, es necesario entonces desarrollar investigaciones que estudien los factores que incrementan las pérdidas de agua en sistemas de abastecimiento para poder tener acueductos más eficientes y sustentables. En este sentido, el porcentaje de pérdidas en función del índice de agua no contabilizada (IANC) es tal vez uno de los métodos de mayor utilidad para evaluar financiera y técnicamente estos sistemas de abastecimiento. Este índice permitirá desarrollar programas más eficientes para la prevención, reducción y control de pérdidas, disminuyendo así los costos de distribución del agua.

El IANC en las empresas de acueducto es un indicador que representa el porcentaje de pérdidas de agua y refleja la eficiencia con la que opera el sistema (González-Gómez, García-Rubio y Guardiola, 2011). Se calcula como la diferencia porcentual entre el caudal que ingresa y el caudal que sale de una etapa productiva (Tabesh, Yekta y Burrows, 2009). Las pérdidas de agua en un acueducto se clasifican en dos tipos: comerciales y técnicas. Asimismo, las primeras se pueden dividir en: conexiones ilegales, facturación de volúmenes menores a los reales cuando los medidores no funcionan adecuadamente o son alterados, y ausencia de medidores. Por otro lado, las pérdidas técnicas son aquellas que se generan por fugas en accesorios, tuberías fisuradas, rebosaderos y tanques de almacenamiento (Kanakoudis y Gonelas, 2016; Cherchi et al., 2015). Las pérdidas de agua se pueden reducir, pero difícilmente se lograría llegar a eliminarlas en su totalidad. No obstante, es necesario proponer programas de gestión para la detección de fugas, usuarios fraudulentos y fallas en el sistema de acueducto (Boztaş, Özdemir, Durmuşçelebi y Firat, 2019).

En el ámbito internacional existe evidencia del interés por reducir las pérdidas de agua en sistemas de abastecimiento. Por ejemplo,

Dogo et al. (2019) y Venkatesh (2012) reportaron que Dinamarca ha sido capaz de reducir sus pérdidas en 9,0% mediante un proceso que inició en 1989, con un impuesto sobre el agua producida, el cual les brindó a los proveedores incentivos para reducir las pérdidas y mejorar los sistemas de abastecimiento. Ho, Lin y Lo (2010) desarrollaron una metodología técnica mediante la integración de un modelo de red neuronal artificial basado en sísmica y sistemas de información geográfica, para estudiar las fugas de agua en un sistema de abastecimiento. Nazif, Karamouz, Tabesh y Moridi (2010) también implementaron un modelo de optimización para correlacionar el nivel del agua en los tanques de almacenamiento con las pérdidas de agua en sistemas de distribución.

Una de las metodologías más reconocidas para evaluar las pérdidas de agua en sistemas de abastecimiento (técnicas y comerciales) de países en vías de desarrollo fue la propuesta por la Asociación Internacional del Agua (IWA, por su sigla en inglés). Esta metodología se fundamentó en el desarrollo de un balance de masas del sistema, el cual permitió conocer las condiciones técnicas de funcionamiento, determinar los índices de pérdidas (IANC) en los subsistemas que lo constituyeron, y formular un programa de disminución y control de pérdidas de agua (Liemberger y Wyatt, 2018). En este sentido, la Comisión de Regulación de Agua Potable de Colombia adoptó el IANC (Resolución CRA 315 de 2009) como el indicador de pérdidas para los sistemas de abastecimiento (Castillo, 2014).

El objetivo principal de este artículo es presentar un análisis del agua no contabilizada mediante el IANC en un sistema de abastecimiento urbano en Colombia. Este estudio se realiza a partir de información recolectada durante 15,7 años (2000-2015). Se presenta también un análisis comparativo con respecto a los reportes

de agua no contabilizada de otras localidades nacionales e internacionales de referencia. Se evalúa además la influencia de las condiciones climáticas sobre el IANC. Finalmente, se expone un análisis económico prospectivo mediante un estudio estadístico de series de tiempo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del lugar

El lugar de investigación se localizó en el municipio de Facatativá, en el extremo occidental de la sabana de Bogotá, Colombia (4°48'46" N, 74°21'00" O). La zona se caracterizó por una elevación promedio de 2586 m s. n. m. y una temperatura media anual de 13,4 °C, con una variación entre 0-22 °C en el mes más seco. La población estimada para el año 2015 fue de 112 600 habitantes. La cobertura del servicio de acueducto fue del 100% en el casco urbano, y 10% en el sector rural del municipio. El sistema contabilizó 26 576 usuarios para el año 2015, suministrando un caudal promedio de 472 530 m³/mes. Los usuarios facturados se clasificaron de la siguiente manera: residenciales = 24 470, comerciales = 1839, oficiales = 236, y especiales = 30. El sistema de acueducto contó con dos plantas de potabilización (El Galtillo y La Guapucha). Estas fueron de tipo convencional con un caudal de diseño de 280 y 30 l/s, respectivamente. La red de distribución de agua antigua del municipio fue construida con tubería de asbesto-cemento, hierro fundido y hierro galvanizado. Algunas de estas tuberías fueron remplazadas por tubería de PVC.

Recolección de información

La información utilizada para este estudio correspondió a los registros de caudal de agua producida (AP) en la planta de potabilización y caudal de agua facturada (AF) por los usuarios entre el 01/01/2000-31/08/2015. En la recolección de información se utilizaron como referentes metodológicos los tra-

bajos realizados por Kanakoudis y Gonelas (2016), y Liemberger y Wyatt (2018). Los registros de AP tuvieron una frecuencia de recolección diaria y los de AF, cada dos meses. De esta manera, la escala temporal de este estudio para el análisis de agua no contabilizada en el sistema fue bimestral. Todos los registros empleados fueron suministrados por la empresa prestadora del servicio de abastecimiento de agua de la municipalidad en estudio. La información climática (precipitación mensual) se tomó del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (Ideam), y correspondió a las siguientes estaciones climatológicas localizadas en el interior del municipio de Facatativá: Tisquesusa (4°48'20,5" N; 74°17'3" W), Tesoro (4°48'0,12" N; 74°19'3,9" W) y Venecia (4°51'1,2" N; 74°24'26,9" W).

El costo promedio de referencia para el análisis económico prospectivo en la presente investigación fue de USD 0,38 por m³ de AP, el cual correspondió a septiembre de 2015. Este costo promedio de AP fue suministrado por la empresa prestadora del servicio de abastecimiento. La recolección de información para el análisis económico prospectivo se realizó teniendo como referente metodológico el trabajo realizado por Cherchi et al. (2015). La información de costos de AP para otras localidades colombianas e internacionales de referencia fueron tomadas del estudio colombiano sectorial de servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado (Robayo et al., 2017) y del informe del Banco Mundial sobre tarifas de agua potable y alcantarillado en América Latina (The World Bank, 2005).

Análisis de información

La variación temporal de agua no contabilizada en el sistema de abastecimiento fue estudiada entre 01/01/2000-31/08/2015. Al respecto, se identificaron los periodos de tiempo de máxima y mínima agua no contabilizada. En este

análisis se utilizó el índice IANC (ecuación (1)) (González-Gómez, García-Rubio y Guardiola, 2011; Tabesh, Yekta y Burrows, 2009):

$$\text{IANC}(\%) = (\text{AP} - \text{AF}) / \text{AP} * 100 \quad (1)$$

Donde, IANC representó el porcentaje de agua no contabilizada en el sistema de abastecimiento; AP, el volumen de agua producido en la potabilizadora a nivel bimestral (m^3), y AF, el volumen de agua facturado por los usuarios a nivel bimestral (m^3). Aquí se utilizó también el índice de agua no contabilizada per cápita (IANCP = IANC por cada 100 000 habitantes) y el índice de pérdidas por usuario facturado (IPUF = $\text{m}^3/\text{suscriptor}^*\text{-mes}$) (Castillo, 2014; Tabesh, Yekta y Burrows, 2009).

Adicionalmente, se estudió la posible relación entre el consumo de agua (AF) y el número de usuarios registrados, con el objeto de evaluar la variación temporal de la dotación en el sistema de abastecimiento (litros/habitante*día). Esta dotación fue comparada con la reportada por referentes bibliográficos colombianos: Reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico - RAS (MDE, 2000) y la Resolución 2320 de 2009 por la cual se modificó parcialmente el RAS (MAVDT, 2009). Asimismo, se evaluó la posible relación entre la dotación y el IANC. Se hizo también un análisis comparativo del IANC entre el sistema de abastecimiento en estudio y nueve municipios colombianos de referencia con población urbana entre 8000 y 540 000 habitantes: Gachancipá, Pitalito, Mosquera, Sogamoso, Zipaquirá, Tunja, Villavicencio, Soacha e Ibagué.

En este estudio, se analizó la influencia del régimen de precipitación sobre el índice IANC. Se recurrió a los registros mensuales de precipitación de las tres estaciones climatológicas

seleccionadas (Tisquesusa, Tesoro y Venecia). El régimen de precipitación mensual (P) fue estudiado mediante los periodos propuestos por el método de quintiles (Q_i) de Bolognesi (Bohn, Piccolo y Perillo, 2011). Este método consideró los siguientes periodos mensuales de precipitación (P): muy seco ($P < Q^1$), seco ($Q^1 \leq P < Q^2$), normal ($Q^2 \leq P < Q^3$), lluvioso ($Q^3 \leq P < Q^4$), y muy lluvioso ($Q^4 \leq P < Q^5$). Se estudiaron también los periodos anuales de incremento y disminución de la precipitación asociados con el fenómeno climático de Oscilación del Sur: El Niño y La Niña (Díaz, Escobar y Serna, 2014).

Finalmente, se llevó a cabo un análisis económico que incluyó una comparación de los costos de AP (USD por m^3) en relación con sistemas de abastecimiento de seis países latinoamericanos de referencia. Para esto se tuvo como referente el estudio latinoamericano del Banco Mundial en esta materia (The World Bank, 2005). Se determinó también el costo de agua no facturada durante el periodo de estudio.

Posteriormente, se adelantó un análisis económico prospectivo mediante modelos autorregresivos, integrados y de promedios móviles (ARIMA, por su acrónimo en inglés). Este análisis se desarrolló a corto (un año), mediano (cinco años) y largo plazo (20 años), periodo durante el cual se tuvieron en cuenta como referentes metodológicos las investigaciones de Venkatesh (2012) y Cherchi et al. (2015). La tasa de cambio promedio de pesos colombianos (COP) a dólar americano (USD) para la época de estudio fue de COP 3068,34 por cada dólar.

Análisis estadístico

La distribución normal de las series de tiempo fue evaluada con una prueba de Kolmogorov-Smirnov ($p\text{-valor} > 0,05$). Se utilizaron el coeficiente de correlación de Pearson y la

prueba *t-Student* para estudiar las posibles relaciones y diferencias entre variables, respectivamente. Se adoptaron también modelos ARIMA con la metodología de [Box-Jenkins \(1990\)](#) para estudiar las series de tiempo bimestrales de AP y AF. Para los modelos ARIMA se tuvieron en cuenta las tres etapas reportadas por [Guerrero \(2003\)](#): identificación, estimación y verificación del modelo. Durante la etapa de identificación del modelo se determinaron los órdenes de los polinomios autorregresivos (p) y de promedios móviles (q), así como también el grado de diferenciación (d) para cancelar la no estacionalidad de las series de tiempo en estudio. Es decir, se determinaron los órdenes p , d y q del modelo ARIMA. En la segunda etapa se determinaron los parámetros de los polinomios autorregresivos (ϕ_1, \dots, ϕ_p) y de promedios móviles ($\theta_1, \dots, \theta_q$) para cada modelo identificado por el método de máxima verosimilitud. Finalmente, se verificaron los ocho supuestos propuestos por [Box-Jenkins \(1990\)](#) con el fin de seleccionar los mejores modelos ARIMA para cada serie de tiempo en estudio. Todas las anteriores etapas se trabajaron en el programa informático IBM-SPSS V. 18.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Agua no contabilizada

En promedio mensual, los resultados mostraron que durante todo el periodo de investigación el AP por el sistema de abastecimiento fue de 472 530 m³; mientras que el AF fue de 308 850 m³ (figura 1). Es decir, el sistema dejó de facturar en promedio por mes 163 680 m³, lo cual representó un porcentaje de agua no contabilizada del 34,6 % (IANC). La prueba *t-Student* permitió evidenciar diferencias significativas entre el AP y AF (p -valor < 0,001). En relación con la variación temporal del IANC, los hallazgos mostraron que entre los meses de marzo y abril de 2010 se re-

gistró el mayor IANC (44,7 %) durante todo el periodo de estudio. Durante estos meses también se observó la mayor AP (542 647 m³) y la menor AF en el sistema (299 945 m³). De esta manera, los resultados sugirieron que cuando ocurrió la mayor producción de agua también ocurrió la menor facturación. Es decir, a medida que se incrementó la disponibilidad de agua en el sistema probablemente también se incrementó el porcentaje de agua no contabilizada.

A partir de lo anterior, se realizó un análisis de correlación lineal de Pearson entre el IANC (%) y AP (m³). Los resultados mostraron una relación positiva entre media y considerable, entre estas dos variables (r -Pearson = 0,619; p -valor < 0,001). En promedio, se observó un incremento del 5,0 % en el IANC por cada 100 000 m³ de AP. El modelo de regresión lineal obtenido fue el siguiente ([ecuación \(2\)](#)):

$$\text{IANC} = 0,00005 * \text{AP} - 11,7 \quad (2)$$

Donde IANC representó el índice de agua no contabilizada (%), y AP, el volumen de agua producida en el sistema de abastecimiento (m³).

Por otro lado, los resultados sugirieron una relación positiva de débil a media (r -Pearson = 0,318; p -valor = 0,002) entre el AP y AF. Es decir, a medida que se incrementó la disponibilidad de agua en el sistema de abastecimiento probablemente se incrementó también el volumen de agua facturado. No obstante, esta relación fue menor en comparación con la relación entre el IANC y AP (r -Pearson = 0,619; p -valor < 0,001). Las variables más significativas para estudiar la variación temporal del agua no contabilizada en el sistema fueron el IANC y AP ([figura 1](#)).

Al comparar el IANC con municipios de referencia, se observó que el sistema en estudio estuvo por debajo y por encima, en relación

con otros sistemas de abastecimiento. En este estudio, el IANC promedio anual fue de 34,6 %, siendo inferior al reportado por los siguientes municipios de referencia: Soacha (72,3 %), Villavicencio (67,0 %), Sogamoso (43,6%), Ibagué (46,6%), Zipaquirá (48,2%), Gachancipá (36,7%) y Pitalito (35,9%). Por el contrario, el IANC anual fue mayor en relación con los siguientes municipios: Tunja (23,9%) y Mosquera (21,3%). Los resultados

mostraron que el IANC del sistema en estudio fue menor en comparación con siete de los nueve municipios de referencia seleccionados (77,8%). En promedio en Colombia, el IANC fue de 45,3% entre los años 2007 y 2011 (Castillo, 2014) y 43,6% para 2017 (DNP, 2018). De esta manera, los resultados sugirieron inicialmente un panorama favorable para el municipio en estudio en relación con el agua no contabilizada. No obstante,

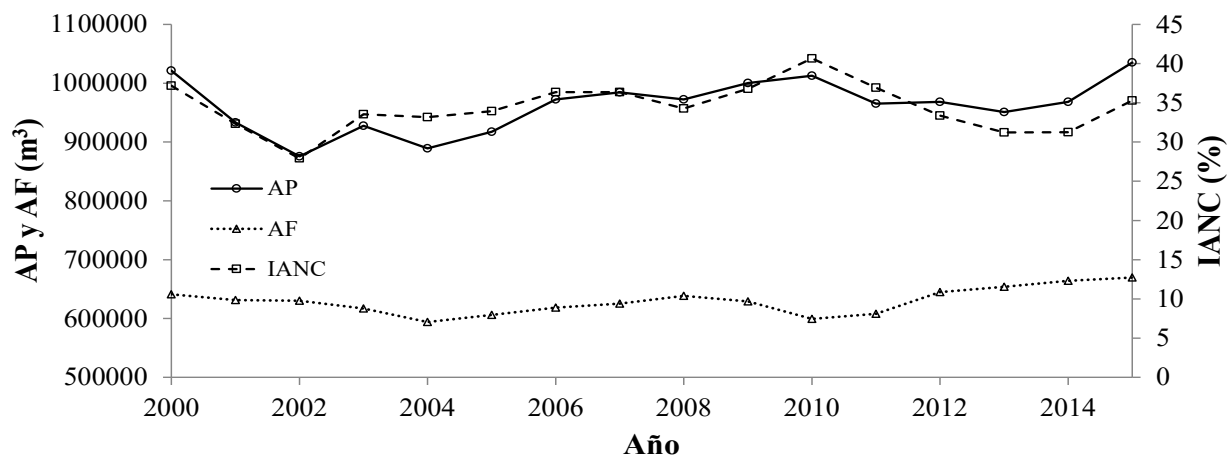


Figura 1. Variación promedio bimensual del IANC, AP y AF en el sistema de abastecimiento durante la totalidad del periodo de investigación

Fuente: elaboración propia.

el IANC máximo permisible por la normatividad colombiana fue de 30% (DNP, 2018). En países desarrollados el IANC tendió a 15% y en países en vías de desarrollo tendió a 35% (Kingdom, Liemberger y Marin, 2006). Al realizar un análisis comparativo anual en relación con el IANC por cada 100 000 habitantes (IANC per cápita: IANCP) los resultados fueron diferentes. El IANCP promedio para el municipio de estudio fue de 30,7. Los resultados mostraron un mayor IANCP en los siguientes municipios de referencia: Gachancipá (43,9), Pitalito (46,3), Sogamoso (44,4), y Zipaquirá (43,4). Por otro lado, los siguientes municipios tuvieron un IANCP menor: Mosquera (26,9), Soacha (13,7), Villavicencio (13,3), Ibagué (8,65) y Tunja (8,10). El IANCP en el sistema de estudio fue mayor en comparación con cinco de los nueve municipios de referencia (55,5 %). De esta manera, los resultados sugirieron un panorama menos favorable para el sistema de estudio en relación con el agua no contabilizada per cápita. Es decir, el acueducto probablemente experimentó dificultades técnicas y comerciales en la reducción de pérdidas debido a la magnitud de su IANCP; lo cual pudo ser una señal de la eficiencia con la que se prestó el servicio, así como de los costos que debieron asumir los usuarios del sistema. Tabesh et al. (2018) reportaron que las pérdidas económicas por agua no contabilizada fueron trasladadas di-

mostraron que el IANC del sistema en estudio fue menor en comparación con siete de los nueve municipios de referencia seleccionados (77,8%). En promedio en Colombia, el IANC fue de 45,3% entre los años 2007 y 2011 (Castillo, 2014) y 43,6% para 2017 (DNP, 2018). De esta manera, los resultados sugirieron inicialmente un panorama favorable para el municipio en estudio en relación con el agua no contabilizada. No obstante,

rectamente a los usuarios facturados, elevando así los costos de suministro del agua. En relación con el índice de pérdidas por usuario facturado (IPIUF), los resultados mostraron en promedio que, para el sistema de abastecimiento en estudio, este fue de 6,16 m³/suscriptor*mes. En el orden nacional, se reportó en promedio un IPIUF de 14,3 entre los años 2007-2011, con un rango de variación entre 3,20-33,5 (Castillo, 2014). Por ejemplo, los IPIUF para Zipaquirá, Tunja y Mosquera para el año 2011 fueron de 2,20, 4,60 y 8,70, respectivamente. De esta manera, los resultados sugirieron un IPIUF menor (56,9%) en el sistema de estudio en relación con el promedio colombiano. En cuanto a Latinoamérica, por ejemplo, se han reportado IPIUF para el año 2008 de 4,80, 9,30, 20,0 y 9,70 en las ciudades de Curitiba

(Brasil), Santiago (Chile), Buenos Aires (Argentina) y Bogotá (Colombia), respectivamente (Kingdom, Liemberger y Marin, 2006). Por tanto, se evidenciaron IPIUF superiores en la región latinoamericana, en comparación con el sistema en estudio. Por otro lado, se estudió la variación anual del consumo de agua en el sistema de abastecimiento con el objeto de evaluar su posible relación con el IANC. Los resultados indicaron que en 2000 y 2015 los usuarios facturados (UF) fueron 13 801 y 26 576, respectivamente. Los consumos de agua durante estos mismos años fueron 748 y 419 l/UF*día, respectivamente (figura 2). Es decir, las dotaciones de agua durante estos años fueron de 249,3 y 139,7 l/habitante*día, respectivamente (promedio: 3 habitantes por UF).

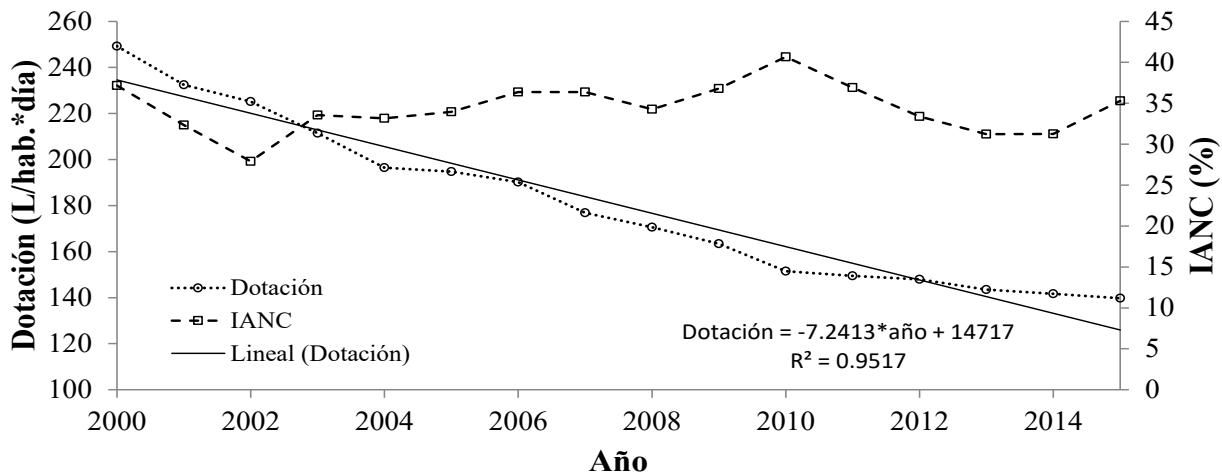


Figura 2. Variación anual promedio del IANC y la dotación en el sistema de abastecimiento de estudio. Modelo de regresión lineal para la dotación anual

Fuente: elaboración propia.

Esta última dotación coincidió con las recomendaciones de diseño dadas en la Resolución 2320 de 2009, por la cual se modificó parcialmente el RAS (140 l/habitante*día) (MAVDT, 2009). De esta manera, los resultados sugirieron durante el periodo de estudio una disminución de la dotación del 43,9 %; en promedio, 7,24 l/habitante*año (2,93 %/ha-

bitante*año). Sin embargo, el IANC no evidenció la misma tendencia decreciente (figura 2). Un análisis de correlación lineal de Pearson confirmó que no existió una relación significativa entre la dotación y el IANC (p-valor = 0,497). Al parecer, el sistema de abastecimiento en estudio fue más efectivo durante las campañas de ahorro y uso eficiente del

agua por parte de los UF, en comparación con las medidas adoptadas para disminuir las pérdidas técnicas y comerciales de agua (i.e., para disminuir el IANC).

Influencia del régimen de precipitación

Los resultados sugirieron que en el área de estudio las precipitaciones tuvieron un régimen bimodal, donde la época seca se registró entre enero y marzo, y agosto y septiembre ($P < Q_2$, quintiles de Bolognesi); mientras que la época de lluvias se registró entre abril y julio, y octubre y diciembre ($P \geq Q_3$). En promedio, hubo una precipitación total anual de 789 mm. Se observaron también periodos anuales de incremento y disminución de la precipitación posiblemente asociados con el fenómeno climático de Oscilación del Sur (El Niño y La Niña). Al respecto, el Ideam (2014) reportó que durante los siguientes años se observaron eventos de La Niña con una intensidad fuerte en el área de estudio: 2007 y 2010. Estos eventos incrementaron la precipitación total anual. Durante el primer y segundo evento la precipitación anual se incrementó en 13,2% y 32,6% con respecto de la precipitación anual promedio, respectivamente (figura 3). Según los periodos propuestos por el método de quintiles de Bolognesi (Bohn, Piccolo y Perillo, 2011), estos periodos correspondieron a muy lluviosos ($Q_3 \leq P < Q_5$). Durante estos periodos también se incrementó el IANC, en 4,05% y 18,5%, respectivamente.

Por otro lado, la Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Colombia reportó que durante el periodo de estudio se observaron eventos de El Niño de intensidad moderada y fuerte en los años 2002 y 2014, respectivamente (UNGRD, 2016).

Estos eventos disminuyeron la precipitación total anual en el área de estudio. En promedio, durante el primer y segundo evento de

El Niño la precipitación disminuyó en 19,6% y 10,5% con respecto de la precipitación promedio anual, respectivamente (figura 3). Estos periodos de tiempo correspondieron a muy secos ($P < Q_1$), según el método de quintiles propuesto por Bolognesi (Bohn, Piccolo y Perillo, 2011). Durante estos periodos también se disminuyó el IANC, en 23,6 % y 11,6%, respectivamente.

A partir de lo anterior, mediante un análisis de Pearson se evidenció una relación positiva de considerable a muy fuerte (r -Pearson = 0,812; p -valor < 0,001) entre el IANC (%) y la altura total de precipitación (mm). Los resultados sugirieron que a medida que se incrementó la precipitación también lo hizo el IANC (figura 3). Esta tendencia tal vez estuvo asociada con una mayor producción de agua en el sistema durante los periodos de incremento de la precipitación. Es decir, a medida que aumentó la disponibilidad de agua en el sistema también lo hizo el porcentaje de agua no contabilizada. En promedio, se observó un crecimiento del 2,28% en el IANC por cada incremento de 100 mm en la precipitación anual. El modelo de regresión lineal obtenido fue el siguiente (ecuación 3):

$$\text{IANC} = 0,0228 * P + 16,4 \quad (3)$$

Donde IANC representó el índice de agua no contabilizada (%), y P , la altura anual de precipitación (mm).

Análisis económico

Uno de los análisis más importantes durante la evaluación del IANC fueron las pérdidas económicas que tuvo la empresa prestadora del servicio de agua en estudio. Al respecto, se utilizaron las estructuras tarifarias de

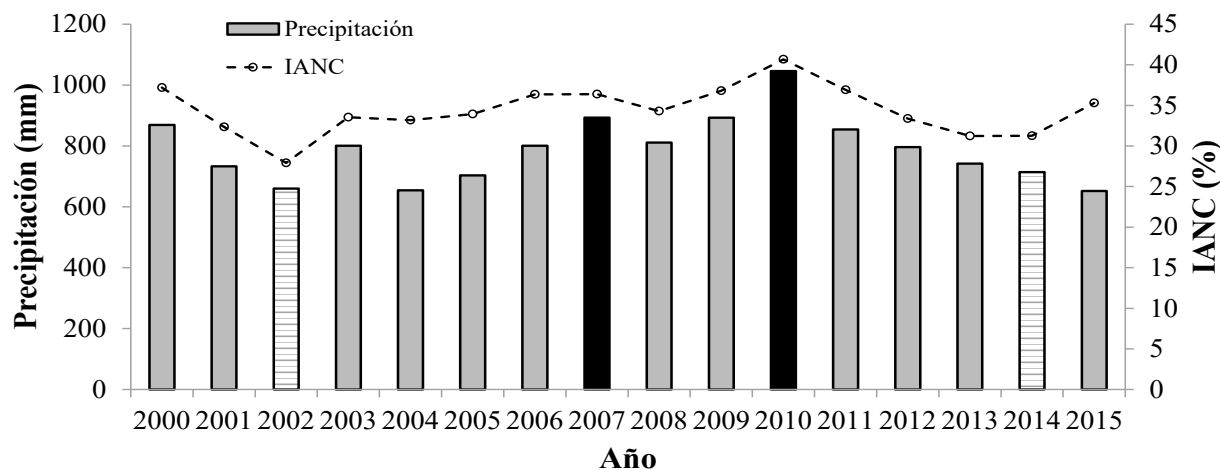


Figura 3. Variación anual de la precipitación e IANC. Columnas negras: eventos fuertes de “La Niña”. Columnas con líneas horizontales: eventos entre moderados y fuertes del “El Niño”.
Fuente: elaboración propia.

agua potable y alcantarillado de seis países latinoamericanos de referencia ([The World Bank, 2005](#)): Perú, Chile, Colombia, Brasil, Argentina y México. El análisis económico se llevó a cabo con respecto de las tarifas de agua potable en la categoría doméstica o residencial normal. Esta categoría fue seleccionada debido a que fue la mayoritaria en la población de estudio (92,1%).

El estrato socioeconómico seleccionado para este análisis fue el tipo dos (2), debido a que fue el mayoritario en Colombia y en la población de estudio para un consumo promedio mensual de 20 m³ por UF ([The World Bank, 2005](#)).

La [tabla 1](#), presenta los precios por m³ de AP en ciudades latinoamericanas y colombianas de referencia. Se muestran también las diferencias porcentuales con respecto al precio facturado por usuario en el sistema de abastecimiento en estudio. Según los resultados, en Argentina y Brasil se aplicaron los precios más bajos (USD 0,06 m³) y más altos (USD 0,91 m³) en Latinoamérica, res-

pectivamente. El promedio de la región para los países de referencia fue de USD 0,44 m³, estando Colombia un 2,27% por encima de este valor. En cuanto a la localidad de estudio, se registró un precio menor (22,2%) con respecto al promedio latinoamericano de referencia. En el contexto colombiano, en promedio, hubo un precio por m³ menor (USD 0,24 m³) con respecto al sistema en estudio (USD 0,36 m³).

Es decir, en la localidad de estudio el precio por m³ de AF fue un 33,3% mayor; el cual fue solo superado por el valor facturado en la ciudad de Bogotá (USD 0,38 m³).

Al relacionar el AP y AF durante todo el periodo de investigación ([figura 1](#)), según los resultados, en promedio se dejaron de contabilizar 29 462 400 m³, los cuales representaron una pérdida económica para el sistema de USD 10 606 464 para el año 2015. Según observación bimestral, el análisis económico prospectivo mediante modelos ARIMA evidenció para el AP una estructura temporal: $p=3$, $d=0$ y $q=2$ ($R^2=0,413$;

Tabla 1. Precio promedio de AP en países latinoamericanos y ciudades colombianas de referencia

Localidad	Precio (USD/m ³)	Diferencia (%) ^a
Latinoamérica		
Brasil	0,91	+152,8
México	0,57	+58,3
Chile	0,46	+27,8
Colombia	0,45	+25,0
Perú	0,22	-38,9
Argentina	0,06	-83,3
Promedio latinoamericano	0,44	+22,2
Colombia		
Ibagué	0,14	-61,1
Neiva	0,14	-61,1
Valledupar	0,15	-58,3
Pasto	0,17	-52,8
Popayán	0,19	-47,2
Bucaramanga	0,19	-47,2
Pereira	0,21	-41,7
Cúcuta	0,25	-30,6
Manizales	0,25	-30,6
Barranquilla	0,26	-27,8
Medellín	0,27	-25,0
Cartagena	0,33	-8,30
Cali	0,35	-2,80
Bogotá	0,38	+5,60
Promedio colombiano	0,24	-33,3

^a Diferencia porcentual en el precio por m³ con respecto de la localidad de estudio. Precio por m³ en la localidad de estudio para el año 2015 = USD 0,36 m³

Fuente: elaboración propia, con información de The World Bank (2005).

Ljung-Box $Q=0,059$; error absoluto promedio $=3,85\%$). Es decir, el AP en el sistema de abastecimiento en un instante de tiempo determinado estuvo influenciada por el AP durante los seis meses inmediatamente anteriores ($p=3$). Los modelos ARIMA también

indicaron una variabilidad corta en el AP. Es decir, en un instante determinado se sugirió una variación del AP durante los cuatro meses inmediatamente anteriores ($q=2$). En relación con el AF, se registró, según observación bimestral, un modelo ARIMA: $p=0$, $d=1$ y $q=1$

($R^2=0,371$; Ljung-Box $Q = 0,474$; error absoluto promedio = $4,14\%$). Es decir, en un instante de tiempo determinado el AF no estuvo influenciada por el AF de los meses anteriores ($p=0$). Igualmente, existió una variación del AF durante los dos meses inmediatamente anteriores ($q=1$). De esta manera, el análisis

mediante modelos ARIMA indicó un comportamiento temporal diferente para el AP y AF en el sistema. Finalmente, de acuerdo con los resultados ARIMA, en promedio, a corto (2016), mediano (2020) y largo plazo (2035) existirá una pérdida económica de USD 717 074, USD 3 420 279 y USD 13 223 779, respectivamente (tabla 2).

Tabla 2. Precio promedio de AP en países latinoamericanos y ciudades colombianas de referencia

Pronóstico	Tiempo (años)	Ll _a – AP (m ³)	LS _b -AP _c (m ³)	LI-AF _d (m ³)	LS-AF (m ³)	LI-IAN-Ce (%)	LS-IANC (%)	LI-Costo (USD)	LS-Costo (USD)	Costo promedio (USD)
Corto	1	881 777	1 109 706	588 204	739 322	33,3	33,4	634 118	800 029	717 074
Mediano	5	862 118	1 098 793	556 191	771 335	29,8	35,5	3 304 012	3 536 546	3 420 279
Largo	20	849 375	1 090 363	480 580	846 946	22,3	43,4	10 515 614	15 931 944	13 223 779

^a LI=límite inferior del pronóstico. ^b LS=límite superior del pronóstico; ^c AP=agua producida; ^d AF=agua facturada; ^e

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

Los resultados muestran que cuando crece la disponibilidad de agua al interior del sistema de abastecimiento (AP) probablemente también aumenta el IANC ($r=0,619$). En promedio, se observa un incremento del 5,0% en el IANC por cada 100 000 m³ de AP. También se sugiere al IANC y AP como las variables más adecuadas para estudiar la variación temporal del agua no contabilizada en el sistema. El régimen de precipitación tiene influencia sobre el IANC. Existe un aumento del 2,28% en el IANC por cada incremento de 100 mm en la precipitación total anual ($r=0,812$). Se evidenció un panorama favorable para el sistema cuando se utilizan como variables principales de estudio el IANC (34,6%) e IPUF (6,16 m³/suscriptor*mes). No obstante, es desfavorable cuando se utiliza como variable principal de estudio el IANCP (30,7%/100.000 habitantes).

También, una evaluación integral de pérdidas de agua en sistemas de abastecimiento

debe considerar índices adicionales al IANC. En este estudio se observa que no existe relación entre el IANC (%) y la dotación (l/habitante*día). En efecto, según los resultados, la empresa operadora del sistema es tal vez más efectiva durante los programas de ahorro y uso eficiente del agua (-43,9%) en comparación con los programas de reducción de pérdidas técnicas y comerciales (34,6%). Estos dos programas deberían ser complementarios para gestionar integralmente el sistema de abastecimiento en estudio.

El análisis económico indica que el sistema en estudio posee un menor precio en el AP (22,2%) con respecto a sistemas latinoamericanos de referencia. Sin embargo, presenta un mayor precio (33,3%) en relación con el promedio colombiano. El análisis mediante modelos ARIMA señala una estructura temporal diferente para las series de tiempo de AP y AF. Es decir, los efectos del AP en un instante de tiempo determinado se transfieren durante seis meses (persistencia) en el sistema de abastecimiento; mientras que los efectos del AF no se transfieren en el tiempo.

En promedio, el análisis económico prospectivo mediante modelos ARIMA muestra que a corto (2016), mediano (2020) y largo plazo (2035) existirá una pérdida de USD 717 074, USD 3 420 279 y USD 13 223 779 en el sistema, respectivamente.

Por último, este estudio permite ampliar el conocimiento en relación con el análisis de las pérdidas de agua en sistemas de abastecimiento urbano mediante el IANC, y será de utilidad para las empresas públicas y privadas prestadoras del servicio de acueducto. Lo anterior con el objeto de desarrollar programas de control de pérdidas, y de ahorro y uso eficiente del agua.

FINANCIAMIENTO

Esta investigación fue financiada por el Grupo de Investigación en Sistemas y Recursos Ambientales Sostenibles (Syras) de la Universidad Manuela Beltrán (Colombia), y fue apoyada académicamente por el Grupo de Investigación en Ingeniería Ambiental (GIAUD) de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Colombia).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la empresa Aguas de Facatativá E.S.P., por su apoyo logístico durante esta investigación.

REFERENCIAS

- Agatón, A.L., Ruiz, J.C.C. y Sayago, U.F.C. (2016). Review of the status of art collection and utilization of rain water in urban and airports. *Tecnura*, 20(50), 141-153. DOI: <https://doi.org/10.14483/22487638.11567>
- Bohn, V.Y., Piccolo, M.C. y Perillo, G.M.E. (2011). Análisis de los periodos secos y

húmedos en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). *Revista de Climatología*, 11(3), 31-43. Recuperado de <http://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/21270>

- Box, G.E.P. y Jenkins, G. (1990). *Time series analysis, forecasting and control*. San Francisco, CA, EE. UU.: Holden-Day, Inc.
- Boztaş, F., Özdemir, Ö., Durmuşçelebi, F.M. y Firat, M. (2019). Analyzing the effect of the unreported leakages in service connections of water distribution networks on non-revenue water. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(8), 4393-4406. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-018-2085-0>
- Castillo, C.A. (2014). Marco tarifario para los servicios públicos de acueducto y alcantarillado (No. REGG-FOR07). Bogotá: Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico Recuperado de <https://tramitesccu.cra.gov.co/normatividad/admon1202/files/3.%20Documento%20de%20trabajo%20Perdidas.pdf>
- Cherchi, C., Badruzzaman, M., Gordon, M., Bunn, S. y Jacangelo, J.G. (2015). Investigation of cost and energy optimization of drinking water distribution systems. *Environmental Science & Technology*, 49(22), 13724-13732. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03666>
- Departamento Nacional de Planeación (DNP) (2018). Estudio sectorial de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado 2014-2017. Bogotá. Recuperado de https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2019/Ene/informe_sectorial-cuatrenio_2014-2017_.pdf
- Díaz, Á.J.Á., Escobar, Y.C. y Serna, S.E.G. (2014). Análisis de la influencia de El Niño y La Niña en la oferta hídrica mensual de la cuenca del río Cali. *Tecnura*, 18(41),

- 120-133. DOI: <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.3.a09>
- Dogo, E.M., Salami, A.F., Nwulu, N.I. y Aigbavboa, C.O. (2019). Blockchain and internet of things-based technologies for intelligent water management system. En F. Al-Turjman (ed.), *Artificial Intelligence in IoT* (pp. 129-150). Cham, Alemania: Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-04110-6_7
- García, J.C. y Benavides, H. (2019). Adjustment value of water leakage index in infrastructure. *DYNA*, 86(208), 316-320. DOI: <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v86n208.67230>.
- García, M., Vargas, C. y Granados, M. (2013). Estudio comparativo del índice de agua no contabilizada en Colombia para el periodo 1995-2011. *Tecnogestión*, 10(1), 26-35.
- González-Gómez, F., García-Rubio, M.A. y Guardiola, J. (2011). Why is non-revenue water so high in so many cities? *International Journal of Water Resources Development*, 27(2), 345-360. DOI: <https://doi.org/10.1080/07900627.2010.548317>
- Guerrero, V.M. (2003). *Análisis estadístico de series de tiempo económicas*. Barcelona: International Thomson Editores, S. A. de C. V.
- Ho, C. I., Lin, M.D. y Lo, S.L. (2010). Use of a GIS-based hybrid artificial neural network to prioritize the order of pipe replacement in a water distribution network. *Environmental Monitoring and Assessment*, 166(1-4), 177-189. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-009-0994-6>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) (2014). Actualización del componente meteorológico del modelo institucional del Ideam sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia, como insumo para el Atlas Climatológico. Bogotá. Recuperado de <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/440517/Actualizacion+Modelo+Institucional+El+Ni%C3%B1o+-+La+Ni%C3%B1a.pdf/02f5e53b-0349-41f1-87e0-5513286d1d1d>
- Kanakoudis, V. y Gonelas, K. (2016). Non-revenue water reduction through pressure management in Kozani's water distribution network: From theory to practice. *Desalination and Water Treatment*, 57(25), 11436-11446. DOI: <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1049967>
- Kingdom, B., Liemberger, R. y Marin, P. (2006). The challenge of reducing non-revenue water (NRW) in developing countries - how the private sector can help: A look at performance-based service contracting (No. 39405). Washington, D.C.: The World Bank. Recuperado de <http://documents.worldbank.org/curated/en/385761468330326484/The-challenge-of-reducing-non-revenue-water-NRW-in-developing-countries-how-the-private-sector-can-help-a-look-at-performance-based-service-contracting>
- Liemberger, R. y Wyatt, A. (2018). Quantifying the global non-revenue water problem. *Water Supply*, 19(3), 831-837. DOI: <https://doi.org/10.2166/ws.2018.129>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) (2009). Resolución 2320. Bogotá. Recuperado de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=38487>
- Ministerio de Desarrollo Económico (MDE) (2000). Resolución 1096. Bogotá. Recuperado de <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=38541>
- Nazif, S., Karamouz, M., Tabesh, M. y Moridi, A. (2010). Pressure management model for urban water distribution networks. *Water Re-*

- sources Management, 24(3), 437-458. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9454-x>
- Obras Sanitarias del Estado (OSE) (2019). Agua no contabilizada. Uruguay. Recuperado de <http://www.ose.com.uy/agua/agua-no-contabilizada>
- Ojeda, E. y Arias, R. (2000). Informe nacional sobre la gestión del agua en Colombia. Bogotá. Recuperado de <https://www.cepal.org/dnri/proyectos/samtac/inco00200.pdf>
- Pérez, S.E.B., Flores, S.M., González, O.N. y Mota, R.H. (2019). Implementación del método de escasez en la determinación de la huella hídrica en la zona costera de San Blas, México. *Tecnura*, 23(62). DOI: <https://doi.org/10.14483/22487638.15796>
- Robayo, V., Castillo, D., Tangarife, I., Rojas, J., Puerto, C. y Villalba, N. (2017). Informe sectorial de acueducto y alcantarillado 2016. Bogotá: Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. Recuperado de <https://www.superservicios.gov.co/?q=publicaciones/acueducto-alcantarillado-y-aseo/informe-sectorial-acueducto-y-alcantarillado-2016>
- Salimi, A., Karami, H., Farzin, S., Hassanvand, M., Azad, A. y Kisi, O. (2018). Design of water supply system from rivers using artificial intelligence to model water hammer. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 0(0), 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1080/09715010.2018.1465366>
- Tabesh, M., Roozbahani, A., Roghani, B., Faghghi, N.R. y Heydarzadeh, R. (2018). Risk assessment of factors influencing non-revenue water using bayesian networks and fuzzy logic. *Water Resources Management*, 32(11), 3647-3670. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-018-2011-8>
- Tabesh, M., Yekta, A.H.A. y Burrows, R. (2009). An integrated model to evaluate losses in water distribution systems. *Water Resources Management*, 23(3), 477-492. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9284-2>
- The World Bank (2005). Las tarifas de agua potable y alcantarillado en America Latina (No. 32738). Washington, D.C. Recuperado de <http://documentos.bancomundial.org/curated/es/398411468772501567/Las-tarifas-de-agua-potable-y-alcantarillado-en-America-Latina>
- The World Bank (2013). América Latina: ¿Por qué las empresas de agua y saneamiento intentan ahorrar energía? Recuperado de <https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2013/09/03/latin-america-water-loss-energy-efficiency>
- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) (2016). Fenómeno El Niño. Análisis Comparativo 1997-1998/2014-2016. Bogotá. Recuperado de https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/20564/Fenomeno_nino-2016.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Venkatesh, G. (2012). Cost-benefit analysis – leakage reduction by rehabilitating old water pipelines: Case study of Oslo (Norway). *Urban Water Journal*, 9(4), 277-286. DOI: <https://doi.org/10.1080/1573062X.2012.660960>





Critical flow in open channels: Numerical solution using the Newton-Raphson method for Android 4.0 application

Flujo crítico en canales abiertos, solución numérica mediante el método de Newton-Raphson para aplicación Android 4.0

Édgar Orlando Ladino Moreno¹ , César Augusto García-Ubaque² ,
María Camila García-Vaca³ 

Cómo citar: Ladino-Moreno, E.O., García-Ubaque, C.A. y García-Vaca, M.C. (2020). Critical flow in open channels: Numerical solution using the Newton-Raphson method for Android 4.0 application. *Tecnura*, 24(63) 88-103. DOI: <https://doi.org/10.14483/22487638.16196>

Fecha de recepción: 10 de junio de 2019

Fecha de aceptación: 18 de octubre de 2019

ABSTRACT

Context: In this article we present an algorithm under JavaScript source code for critical flow equation solution.

Method: An object-oriented programming language was implemented for Android 4.0 or higher systems based on iterative and incremental processes (Agile development). The numerical method of Newton-Raphson was used to determine the critical depth of seven hydraulic sections (rectangular, trapezoidal, asymmetric trapezoidal, triangular, asymmetric triangular, parabolic and circular). A potential function was obtained to establish the seed value in iterative process, in order to accelerate and guarantee the convergence level for each

section. This value is directly associated with hydraulic problem pre-established conditions.

Results: The application calculates: critical depth, critical speed, hydraulic area, specific energy, wet perimeter and mirror. The results calculated by the application were validated against Excel analysis tool (Goal Seek) results and Hcanales[®] software developed by Máximo Villón Béjar Engineer. Finally, the application is available for free in Google Play Store, with the name "Critical Flow in Channels. Newton Raphson Solution".

Conclusions: It is possible to develop easily accessible applications that meet the technical conditions required for the resolution of engineering-related situations.

Keywords: application software, educational software, water flow, fluid dynamics, JavaScript code.

- 1 Civil Engineer, Universidad Militar Nueva Granada. Topographic Engineer, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. MSc Civil Engineering, Escuela Colombiana de Ingeniería, Colombia. Associated Profesor asistente, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Contacto: edgar.ladino@unimilitar.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7770-452X>
- 2 Civil Engineer, Universidad Nacional de Colombia, Colombia. MSc Civil Engineering, Universidad de los Andes, Colombia. PhD in Engineering, Universidad de los Andes, Colombia. Titular Professor Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Contacto: cagarciau@udistrital.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6959-6610>
- 3 Chemical Engineer, Universidad de los Andes, Colombia. MSc Chemical Engineering, Universidad de los Andes, Colombia. Professor Universidad Católica de Colombia, Colombia. Contacto: mgarciav@ucatolica.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1382-7387>

RESUMEN

Contexto: En este artículo se presenta el desarrollo de un algoritmo bajo código fuente JavaScript para la solución de la ecuación de flujo crítico.

Método: Se implementó un lenguaje de programación orientado a objetos para sistemas Android 4.0 o superiores, a partir de procesos iterativos e incrementales (desarrollo ágil). Se utilizó el método numérico de Newton-Raphson para determinar la profundidad crítica de siete secciones hidráulicas (rectangular, trapezoidal, trapezoidal asimétrico, triangular, triangular asimétrico, parabólico y circular). Con el propósito de acelerar y garantizar el nivel de convergencia para cada sección, se obtuvo una función potencial para establecer el valor semilla en el proceso iterativo; dicho valor se asocia de forma directa a las condiciones preestablecidas del problema hidráulico.

Resultados: La aplicación calcula la profundidad crítica, velocidad crítica, área hidráulica, energía específica, perímetro mojado y el espejo. Los resultados fueron validados contra los obtenidos por medio de la herramienta para análisis de Excel (buscar objetivo) y por el software Hcanales® desarrollado por el ingeniero Máximo Villón Béjar. Finalmente, la aplicación se encuentra disponible de forma gratuita en Play Store (Google), con el nombre de "Flujo Crítico en Canales. Solución Newton Raphson".

Conclusiones: Es posible desarrollar aplicaciones de fácil acceso que cumplan con las condiciones técnicas requeridas para la resolución de situaciones relacionadas con ingeniería.

Palabras clave: código JavaScript, dinámica de fluidos, flujo de agua, programa informático, programa informático didáctico.

INTRODUCTION

Teaching and learning ways must be in line with technological developments that are experienced today (Contreras, Escobar, & Tristancho, 2013; Sotelo & Solarte, 2014). The generation of different learning scenarios leads the student to relate the influence of diverse variables and methodologies in real problems solution (Gómez, Galvis, & Mariño, 1998). In this sense, applications development for smartphones, becomes an attractive alternative (Gasca, Camargo, & Medina, 2014), when they are oriented to educational processes (Jonoski et al., 2012). Educational software (ES), are defined as applications or computer programs that facilitate the teaching-learning process (Vidal, Gómez, & Ruiz, 2010; Drumea, 2012). In the free-flowing hydraulic field, most equations that describe the flow behavior do not resist an analytical development, due mainly, to the non-linearity of the functions. Which requires

numerical methods implementation that solve the hydraulic problem iteratively (Diaz & Benitez, 1998). In real flow problems it is necessary to use successive approximation methods (Vidal, Gómez, & Ruiz, 2010). The developed algorithm calculates the critical depth from the numerical method of Newton-Raphson, for 5 successive iterations, based on a preset seed value, which accelerates the convergence.

Critical Flow

The Froude Number relates the speed, the geometric parameters of the section and the gravitational effects. The critical depth of the flow is defined as the condition for which, the Froude Number (FN) is equal to 1, where the specific energy is minimal (equation 1). If $FN < 1$, a subcritical flow is established, and if $FN > 1$, the flow is supercritical (Figure 1).

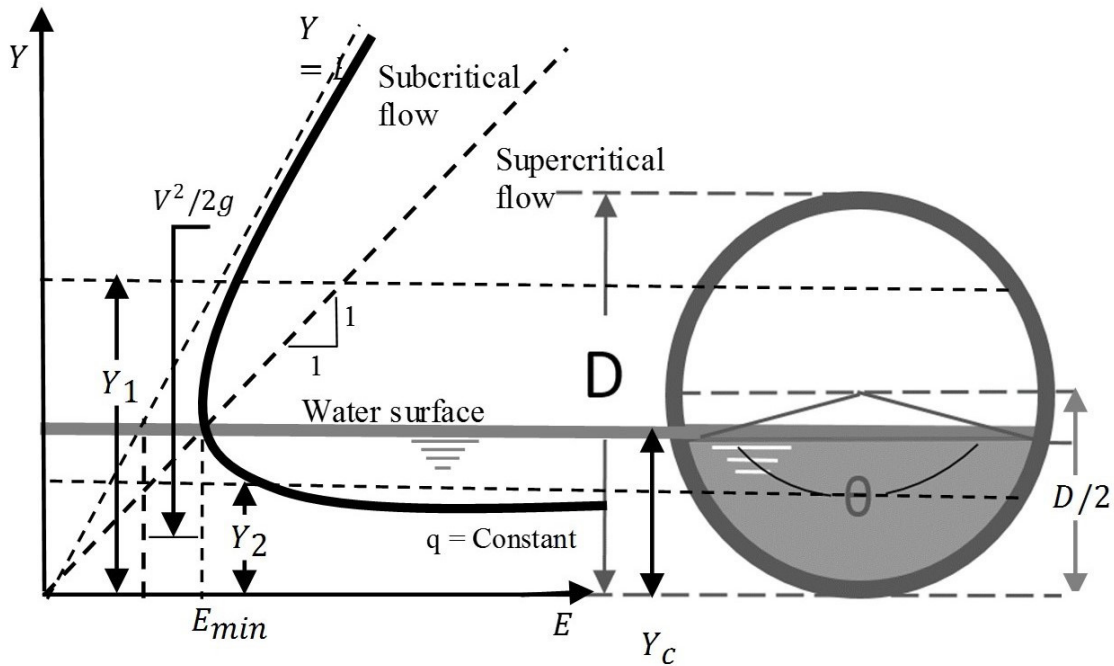


Figure 1. Specific energy diagram

Source: Authors.

Froude:

$$NF = \frac{V}{\sqrt{g \frac{A}{T}}} \quad (1)$$

Where: V = Speed (m/s); A = Hydraulic area (m^2); T = Mirror (m); g = Gravity (m/s^2).

Function:

$$f(Y_c) = gA^3T^{-1} - Q^2 = 0 \quad (2)$$

Where: Q = Flow (m^3/s); A = Hydraulic area (m^2); T = Mirror (m); g = Gravity (m/s^2).

Derivative:

$$f'(Y_c) = g \left[-A^3T^{-2} \frac{dT}{dY_c} + 3T^{-1}A^2 \frac{dA}{dY_c} \right] \quad (3)$$

Newton Raphson Approach:

$$Y_{c_{n+1}} = Y_{c_n} - \frac{f(Y_{c_n})}{f'(Y_{c_n})} \quad (4)$$

METHODOLOGY

For the application development we used iterative and incremental processes (Agile Development), in three specific phases:

- In the first phase, the flow diagram of the iterative process for each of the hydraulic sections (rectangular, trapezoidal, trapezoidal asymmetric, triangular, triangular asymmetric, parabolic and circular) was established.
- In the second phase, the source code (JavaScript) was developed (Lindley, 2013).
- For the last phase, the application was validated by comparing the results against the values obtained by Excel analysis tool (Goal Seek) and by Hcanales® software.

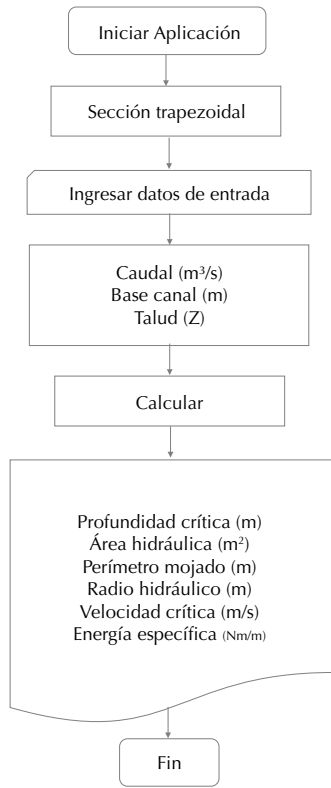


Figure 2. Application flow diagram for the user interface (trapezoidal channel)
 Source: Authors.

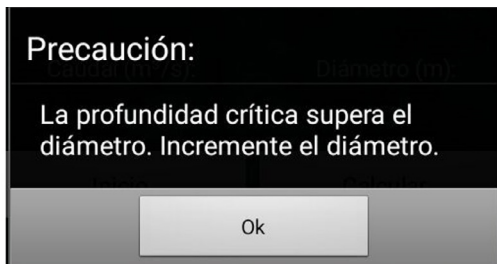


Figure 4. Caution message (circular section)
 Source: Authors.

The flow chart for the user interface is presented below, which varies according to the selected hydraulic section (Figure 2).

In case of a circular section, the height of critical depth exceeds the diameter value, the application generates a warning, where it is recommended to increase the diameter.

The algorithm shown in Figure 3, was used to program the solution for trapezoidal channel.

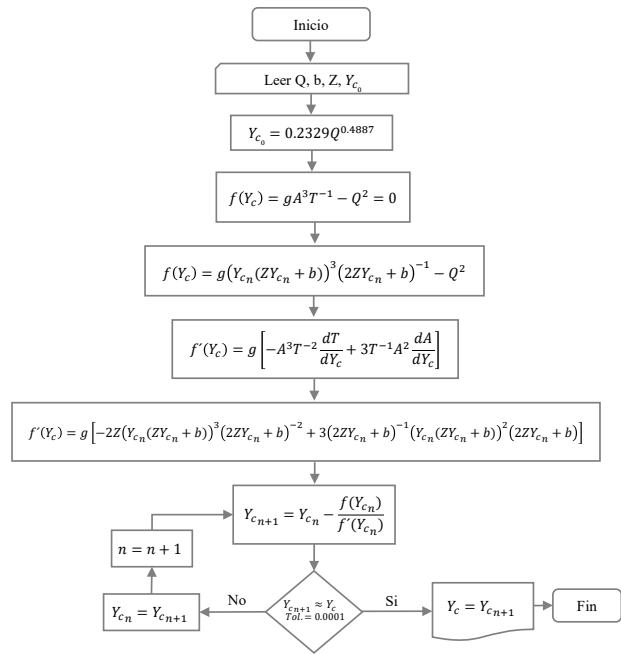


Figure 3. Flow diagram for calculating critical depth (trapezoidal channel)
 Source: Authors.

RESULTS

Trapezoidal Channel

When you start the application, a menu with seven options of hydraulic sections is displayed (rectangular, trapezoidal, asymmetric trapezoidal, triangular, asymmetric triangular, parabolic and circular). For each section, the algorithm calculates: critical depth, mirror, hydraulic radius, specific energy, flow type, hydraulic area, wet perimeter, critical flow velocity and the Froude number. In order to validate the application, it is proposed to determine the critical depth for a symmetric trapezoidal channel (figure 5), by means of three different methodologies: Newton Raphson, Goal Seek (Excel) and Hcanales®. Hydraulic channel conditions are in Table 1.

Table 1. Input parameters trapezoidal channel

Flow (m ³ /s):	12.25
Base channel (m):	2.25
Talud (Z):	3.5

Source: Authors.

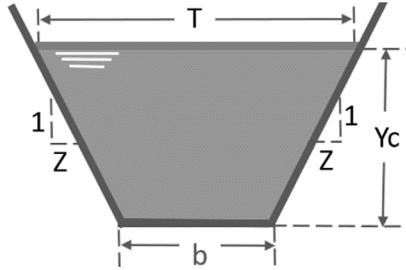


Figure 5. Trapezoidal channel.
 Source: Authors.

Hydraulic area:

$$A = Y_c(ZY_c + b) \quad (5)$$

Wet perimeter:

$$P = 2Y_c\sqrt{Z^2 + 1} + b \quad (6)$$

Hydraulic radius:

$$R = \frac{Y_c(ZY_c + b)}{Y_c\sqrt{Z^2 + 1} + b} \quad (7)$$

Mirror:

$$T = 2ZY_c + b \quad (8)$$

Specific Energy:

$$Ee = Y_c + \frac{V^2}{2g} \quad (9)$$

Considering (1), (2) and (3), we obtain:

Derivative hydraulic area:

$$\frac{dA}{dY_c} = 2ZY_c + b \quad (10)$$

Mirror derivative:

$$\frac{dT}{dY_c} = 2Z \quad (11)$$

Approach Newton Raphson:

$$Y_{c_{n+1}} = Y_{c_n} \quad (12)$$

$$-\frac{g(Y_{c_n}(ZY_{c_n} + b))^3(2ZY_{c_n} + b)^{-1} - Q^2}{g[-2Z(Y_{c_n}(ZY_{c_n} + b))^3(2ZY_{c_n} + b)^{-2} + 3(2ZY_{c_n} + b)^{-1}(Y_{c_n}(ZY_{c_n} + b))^2(2ZY_{c_n} + b)]}$$

In the case of symmetric trapezoidal channel, the following function is proposed for seed value:

$$f(Y_c) = 0.2329Q^{0.4887} \quad (13)$$

Where: Q = Flow rate (m³/ s); Y_c = Critical depth (m).

Tabla 2. Critical depth calculation (Excel, Newton-Raphson), (trapezoidal channel)

Iter.	Yc n+1	Area (m ²)	T (m)	dA/dYc	dT/dYc	f(Yc)	f'(Yc)	Newton Raphson
1	0.79239	3.98050	7.79676	7.7968	7.000	-70.7087	395.05587	0.971379
2	0.97138	5.48812	9.04965	9.0497	7.000	29.1251	747.81227	0.932432
3	0.93243	5.14097	8.77702	8.7770	7.000	1.8024	656.70487	0.929687
4	0.92969	5.11691	8.75781	8.7578	7.000	0.0084	650.60865	0.929674
5	0.92967	5.11680	8.75772	8.7577	7.000	0.0000	650.58016	0.9297

Source: Authors.

```
Sub Calculo_Yc_Trapezoidal_simetrico()
' Calcula El tirante critico para la seccion trapezoidal simétrico
    Range("l19").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Range("ab18")
End Sub
```

Figure 6. Visual Code (Excel). Iteration for Yc calculation (symmetric trapezoidal channel)

Fuente: Authors.

The results obtained from these three methodologies, generate the same value for the critical depth, under the initial conditions established.

Table 3. Comparison of Yc results (trapezoidal channel)

Parameter	Excel		HCanales (Software)	Application (JavaScript)
	Goal Seek	Newton Raphson		
Critical depth (m):	0.9297	0.9297	0.9297	0.9297
Mirror (m):	8.7577	8.7577	8.7577	8.7577
Hydraulic radius (m):	0.5674	0.5674	0.5674	0.5674
Specific energy (Nm/N):	1.2218	1.2218	1.2218	1.2218
Hydraulic area (m ²):	5.1168	5.1168	5.1168	5.1168
Perimeter (m):	9.0181	9.0181	9.0181	9.0181
Critical speed (m/s):	2.3941	2.3941	2.3941	2.3941
Froude number:	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

Source: Authors.

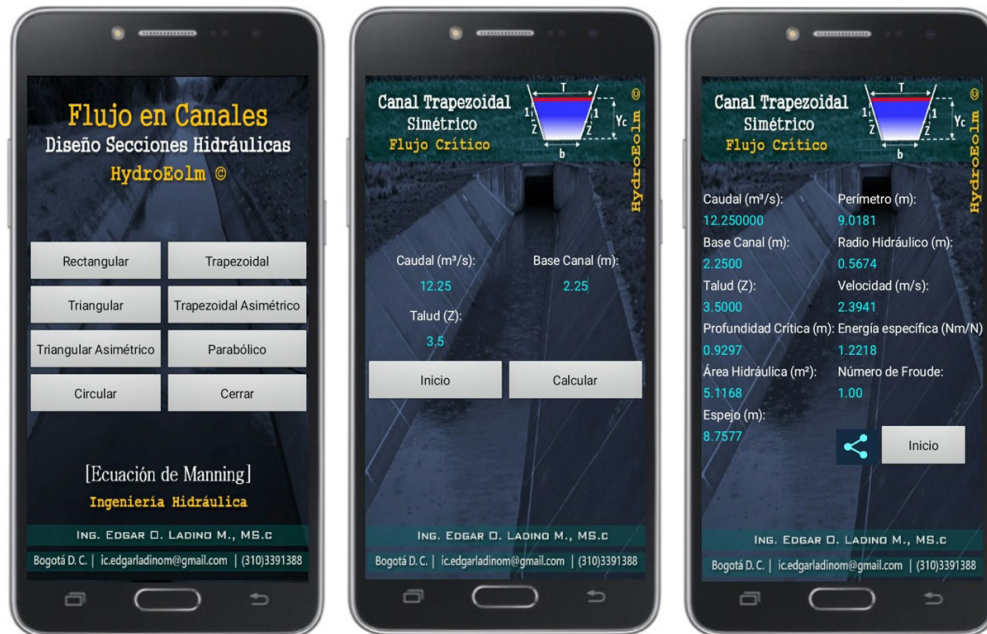


Figure 7. Trapezoidal channel, (Application solution for critical depth)
Fuente: Authors.

Asymmetric Trapezoidal Channel

Considering (1), and with the purpose of verifying the capacity of the application for critical depth calculation, we proposed an asymmetric trapezoidal section, with these hydraulic conditions:

Table 4. Input parameters asymmetric trapezoidal channel

Flow (m ³ /s):	1.75
Base channel (m):	1.2
Talud (ZA):	5
Talud (ZB):	2

Source: Authors.

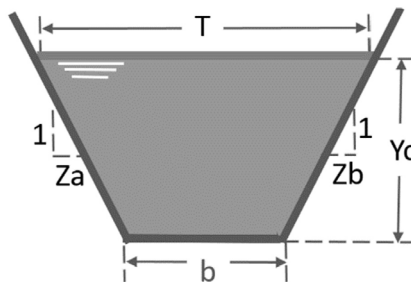


Figure 5. Trapezoidal channel.
Source: Authors.

Hydraulic area:

$$A = 0.5(Z_a Y_c^2 + 2b Y_c + Z_b Y_c^2) \quad (14)$$

Wet perimeter:

$$P = Y_c \sqrt{Z_a^2 + 1} + b + Y_c \sqrt{Z_b^2 + 1} \quad (15)$$

Hydraulic radius:

$$R = \frac{0.5(Z_a Y_c^2 + 2b Y_c + Z_b Y_c^2)}{Y_c \sqrt{Z_a^2 + 1} + b + Y_c \sqrt{Z_b^2 + 1}} \quad (16)$$

Mirror:

$$T = Z_a Y_c + b + Z_b Y_c \quad (17)$$

Hydraulic area derivative:

$$\frac{dA}{dY_c} = Z_a Y_c + b + Z_b Y_c \quad (18)$$

Mirror derivative:

$$\frac{dT}{dY_c} = Z_a + Z_b \quad (19)$$

From equations (2), (3) and (4), we can conclude that:

Newton Raphson Approach: (20)

$$f(Y_{c_n}) = g \left(0.5(Z_a Y_{c_n}^2 + 2b Y_{c_n} + Z_b Y_{c_n}^2) \right)^3 (Z_a Y_{c_n} + b + Z_b Y_{c_n})^{-1} - Q^2 \quad (21)$$

$$f'(Y_{c_n}) = g \left[- \left(0.5(Z_a Y_{c_n}^2 + 2b Y_{c_n} + Z_b Y_{c_n}^2) \right)^3 (Z_a Y_{c_n} + b + Z_b Y_{c_n})^{-2} (Z_a + Z_b) + 3(Z_a Y_{c_n} + b + Z_b Y_{c_n})^{-1} \left(0.5(Z_a Y_{c_n}^2 + 2b Y_{c_n} + Z_b Y_{c_n}^2) \right)^2 (Z_a Y_c + b + Z_b Y_c) \right]$$

For the asymmetric trapezoidal channel, a potential function was implemented: critical depth vs. flow, for the initial value (seed value). This function accelerates the numerical method convergence. The visual code used in Excel is shown in [Figure 9](#).

$$f(Y_c) = 0.2379Q^{0.5045} \quad (22)$$

Table 5. Critical depth calculation (Excel, Newton-Raphson) (Asymmetric trapezoidal channel)

Iter.	Yc n+1	Area (m ²)	T (m)	dA/dYc	dT/dYc	f(Yc)	f'(Yc)	Newton Raphson
1	0.31551	0.7270	3.4085	3.4085	7.000	-1.9566	13.28386	0.462796
2	0.46280	1.3049	4.4395	4.4396	7.000	1.8482	42.37605	0.419181
3	0.41918	1.1180	4.1342	4.1343	7.000	0.2535	31.17162	0.411050
4	0.41105	1.0846	4.0773	4.0773	7.000	0.0075	29.35139	0.410796
5	0.41080	1.0835	4.0755	4.0756	7.000	0.0000	29.29582	0.4108

Source: Authors.

```
Sub Calculo_Yc_Trapezoidal_Asimetrico()
' Calcula El tirante critico para la seccion trapezoidal asimétrica
Range("t19").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Range("ab18")
End Sub
```

Figure 9. Visual code (Excel). Iteration for Yc calculation. (Asymmetric trapezoidal channel)

Fuente: Authors.

Table 6. Comparison of Y_c results (Asymmetric trapezoidal channel)

Parameter	Excel		HCanales (Software)
	Goal Seek	Newton Raphson	
Critical depth (m):	0.4108	0.4108	0.4108
Mirror (m):	4.0756	4.0756	4.0756
Hydraulic radius (m):	0.2572	0.2572	0.2572
Specific energy (Nm/N):	0.5437	0.5437	0.5437
Hydraulic area (m ²):	1.0836	1.0836	1.0836
Perimeter (m):	4.2132	4.2132	4.2132
Critical speed (m/s):	1.6150	1.6150	1.6150
Froude number:	1.0000	1.0000	1.0000

Source: Authors.

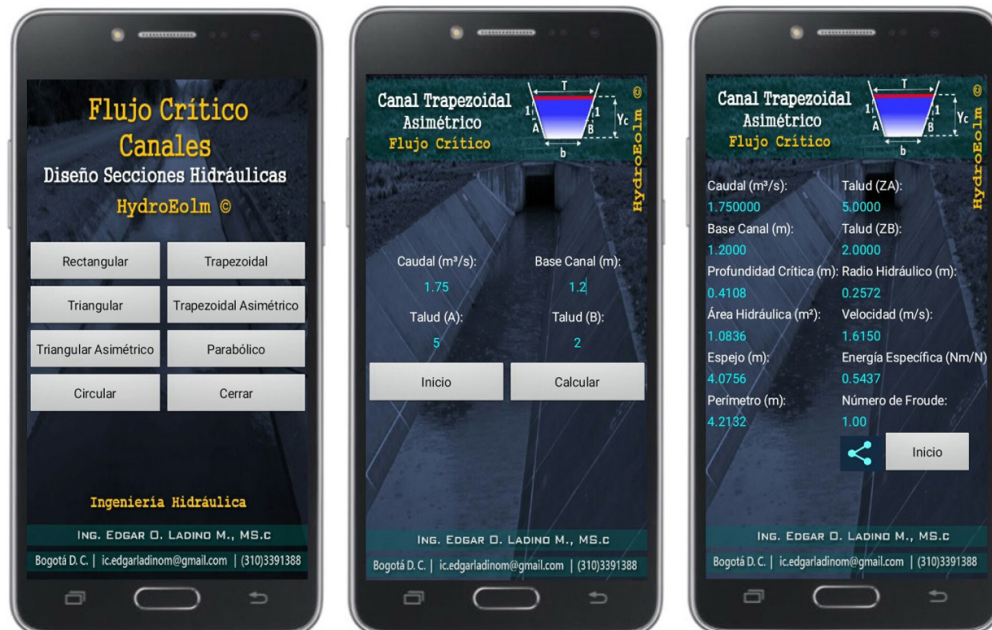


Figure 10. Asymmetric trapezoidal channel (Application critical depth solution)

Fuente: Authors.

Circular Channel

To evaluate the Application results, we present the following hydraulic problem:

Table 7. Input parameters circular channel

Flow (m ³ /s):	0.145
Diameter (m):	0.4

Source: Authors.

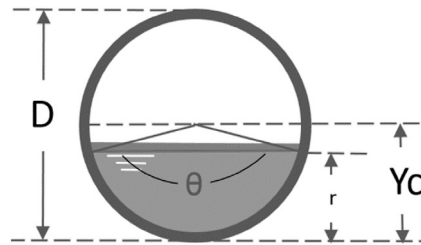


Figure 11. Circular channel
Source: Authors.

Central Angle

$$\theta = 2\text{acos}\left[1 - \frac{2Y_c}{D}\right] \quad (23)$$

Hydraulic area:

$$A = \frac{D^2}{8}(\theta - \sin \theta) \quad (24)$$

Wet perimeter:

$$P = \frac{\theta D}{2} \quad (25)$$

Hydraulic radius:

$$R = \frac{D(\theta - \sin \theta)}{4\theta} \quad (26)$$

Mirror:

$$T = D \sin(\theta/2) \quad (27)$$

Hydraulic area derivative:

$$Ee = Y_c + \frac{V^2}{2g} \quad (28)$$

Newton Raphson Approach:

Function:

$$f(\theta) = \left[\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\right]^{\frac{1}{3}} [\theta - \sin \theta]^{-1} - \frac{A_{full}}{2\pi \left[\frac{Q^2 D}{g}\right]^{\frac{1}{3}}} = 0 \quad (29)$$

Derivative:

$$f'(\theta) = \left[-\left[\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\right]^{\frac{1}{3}} [\theta - \sin \theta]^{-2} [1 - \cos \theta] + \frac{1}{6} [\theta - \sin \theta]^{-1} \left[\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\right]^{-\frac{2}{3}} \left[\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\right]\right] \frac{d\theta}{dY_c} \quad (30)$$

Where:

$$\frac{d\theta}{dY_c} = \frac{4/D}{\sqrt{1 - \left[1 - \frac{2Y_n}{D}\right]^2}} \quad (31)$$

$$\theta_{n+1} = \theta_n - \frac{f(\theta_n)}{f'(\theta_n)} \quad (32)$$

$$\theta_{n+1} = \theta_n \quad (33)$$

$$\left[\sin\left(\frac{\theta_{cn}}{2}\right)\right]^{\frac{1}{3}} [\theta_{cn} - \sin \theta_{cn}]^{-1} - \frac{A_{full}}{2\pi \left[\frac{Q^2 D}{g}\right]^{\frac{1}{3}}} - \left[-\left[\sin\left(\frac{\theta_{cn}}{2}\right)\right]^{\frac{1}{3}} [\theta_{cn} - \sin \theta_{cn}]^{-2} [1 - \cos \theta_{cn}] + \frac{1}{6} [\theta_{cn} - \sin \theta_{cn}]^{-1} \left[\sin\left(\frac{\theta_{cn}}{2}\right)\right]^{-\frac{2}{3}} \left[\cos\left(\frac{\theta_{cn}}{2}\right)\right]\right] \frac{d\theta_{cn}}{dY_c}$$

Table 8. Yc solution (Excel – Newton-Raphson) (circular channel)

Iter.	Yc n+1	Area (m ²)	T (m)	dA/dYc	dT/dYc	f(Yc)	f'(Yc)	Newton Raphson
1	0.21035	3.24511	10.01341	0.08798	-1.8064238	0.259050819	13.28386	0.462796
2	0.25905	3.74104	10.46661	0.01824	-1.07705017	0.275984611	42.37605	0.419181
3	0.27598	3.92102	10.81060	0.00019	-0.92107472	0.276189028	31.17162	0.411050
4	0.27619	3.92323	10.81552	-0.00002	-0.91939261	0.276171857	29.35139	0.410796
5	0.27617	3.92304	10.81510	0.00000	-0.91953374	0.2762	29.29582	0.4108

Source: Authors.

```
Sub Calculo_Yc_Circular()

' Calcula El tirante critico para la seccion circular

Range("s29").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Range("ad29")
End Sub
```

Figure 12. Visual code (Excel). Iteration for Yc calculation

Fuente: Authors.

Figure 13. was constructed from the section factor for critical flow.

$$A^3T^{-1} = g^{-1}Q^2 \quad (34)$$

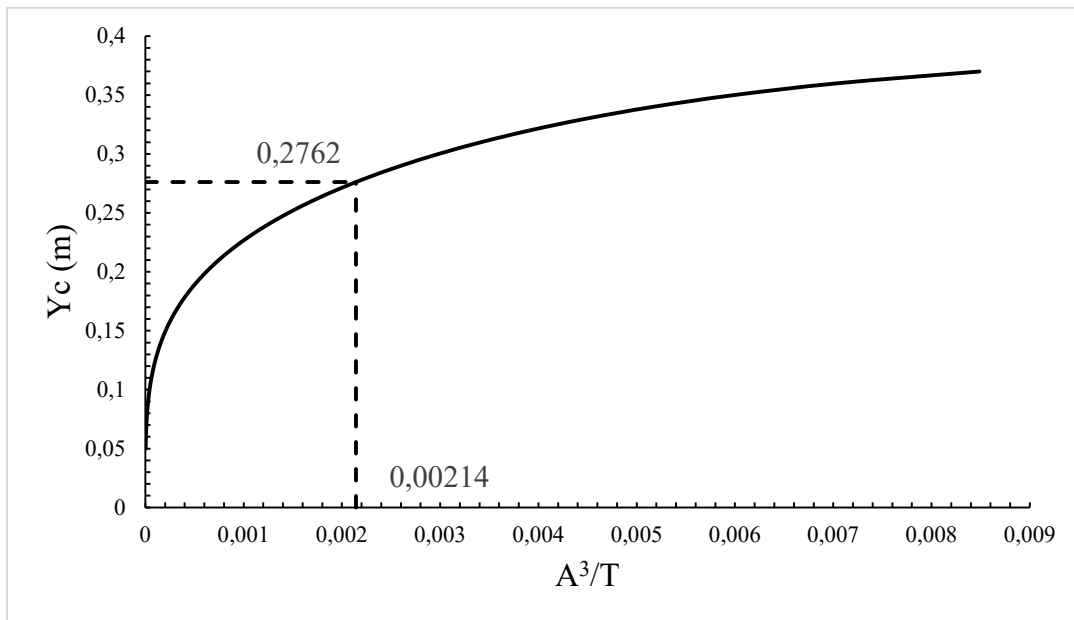


Figure 13. Circular pipe (graphic solution)

Fuente: Authors.

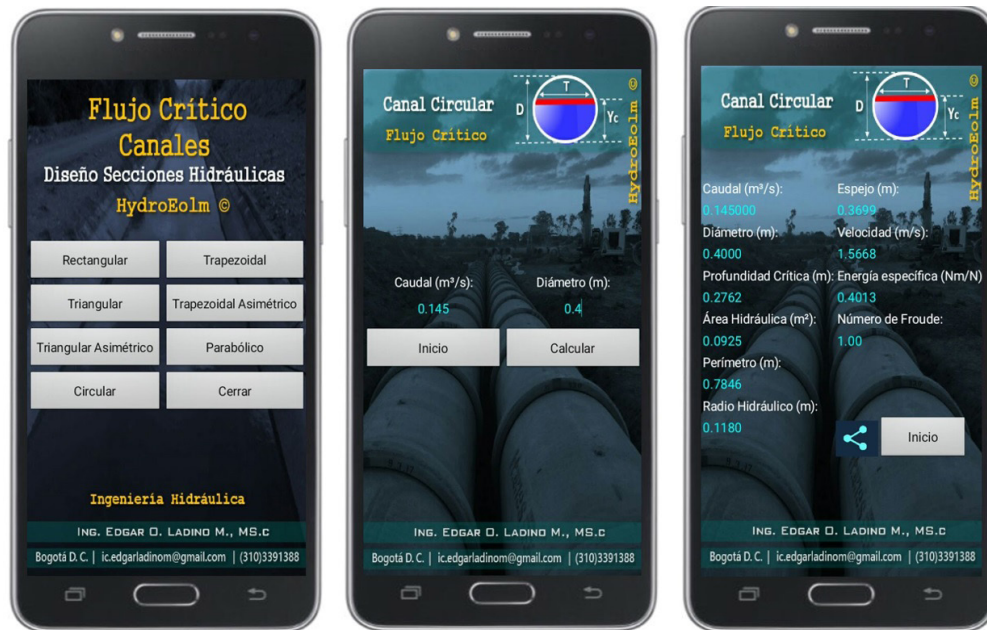


Figure 14. Circular channel, (Application critical depth calculation)
Source: Authors.

Table 9. Comparison of Y_c results (circular channel)

Parameter	Excel			
	Goal Seek	Newton Raphson	HCanales (Software)	Application (JavaScript)
Critical depth (m):	0.2762	0.2762	0.2762	0.2762
Mirror (m):	0.3699	0.3699	0.3699	0.3699
Hydraulic radius (m):	0.1180	0.1180	0.1180	0.1180
Specific energy (Nm/N):	0.4013	0.4013	0.4013	0.4013
Hydraulic area (m ²):	0.0925	0.0925	0.0925	0.0925
Perimeter (m):	0.7846	0.7846	0.7846	0.7846
Critical speed (m/s):	1.5668	1.5668	1.5668	1.5668
Froude number:	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

Source: Authors.

Finally, the application was submitted to some exercises development proposed in different Hydraulics books. In order to validate the algorithm developed, the results are presented

in tables 10, 11 and 12. Similarly, the results calculated by the Application are shown in figures 15, 16 and 17.

Table 10. Results comparison Exercise 3.5, Hydraulics of channels

Book	Exercise	Input parameters	Output parameters	Book	Application
Channel hydraulics (Sotelo, 2002)	3.5 (Pg. 195)	Flow (m ³ /s): 20	Critical depth (m):	1.1710	1.1710
		Base channel (m): 4	Critical velocity (m/s):	2.967	2.9668
		Talud (Z): 1.5	Specific energy (Nm/m):	1.62	1.6197

Source: Authors.

Table 11. Results comparison Exercise 4.2, Hydraulics of open channels

Book	Exercise	Input parameters	Output parameters	Book	Application
Hydraulics of open channels (Chow, 1994)	4.2 (Pg. 68)	Flow (m ³ /s): 11.32674	Critical depth (m):	0.6553	0.6547
		Base channel (m): 6.0960	Critical velocity (m/s):	2.3336	2.3362
		Talud (Z): 2	Specific energy (Nm/m):	0.9329	0.9329

Source: Authors.

Table 12. Results comparison Exercise 4.3, Hydraulics of open channels

Book	Exercise	Input parameters	Output parameters	Book	Application
Hydraulics of open channels (Chow, 1994)	4.3 (Pg. 68)	Flow (m ³ /s): 0.566334	Critical depth (m):	0.4389	0.4374
		Base channel (m): 0.9144	Critical velocity (m/s):	1.8174	1.8253
			Specific energy (Nm/m):	0.6072	0.6072

Source: Authors.



Figure 15. Exercise 3.5, Hydraulics of channels, Gilberto Sotelo (Application Critical depth calculation)
 Source: Authors.



Figure 16. Exercise 4.2, Hydraulics of open channels, Ven Te Chow (Application Critical depth calculation)
 Source: Authors.

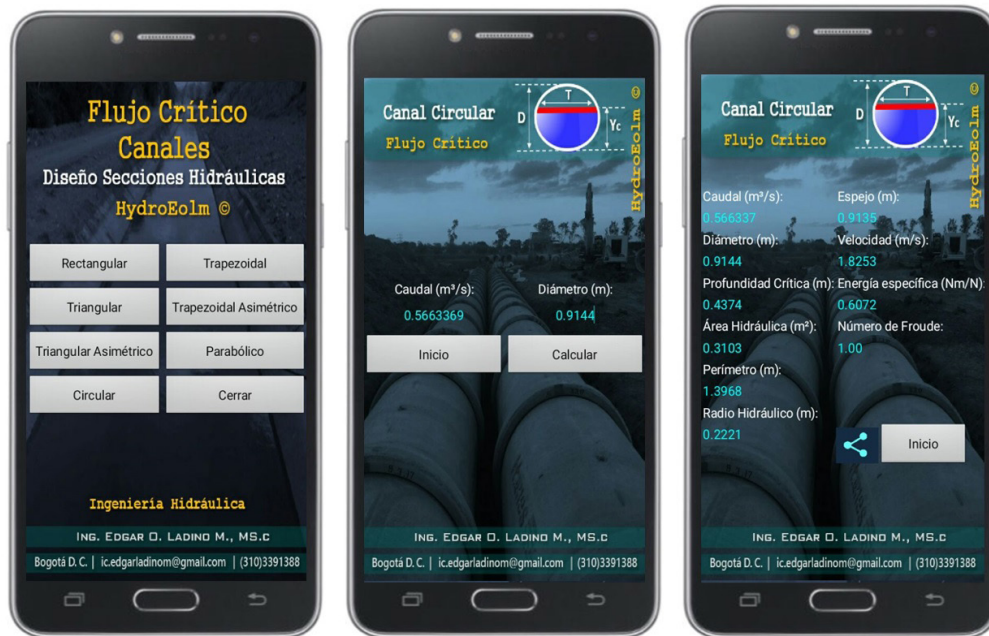


Figure 17. Exercise 4.3, Hydraulics of open channels, Ven Te Chow (Application Critical depth calculation)
Source: Authors.

CONCLUSIONS

The algorithm developed for the application "Diseño de Canales Hidráulicos HydroEolm" under JavaScript programming language avoids the use of calculation curves for critical depth. The results showed that the application effectively calculates the critical depth, critical speed, hydraulic area, specific energy, wet perimeter and the mirror.

In the application development, the results were compared with different exercises proposed in Hydraulics books, showing optimal outputs. Likewise, about 95 hydraulic exercises were performed, which were validated by comparing the application results against results obtained from three different methodologies (Goal Seek, Newton-Rapson, Hcanales[®]).

Finally, the development of algorithms for operating systems compatible with iOS and Windows is recommended, which expands

the coverage of the application to a greater number of users. This application has been downloaded in Colombia, Bolivia, Peru, Costa Rica and Algeria.

REFERENCES

- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de Canales Abiertos*. Bogotá D.C.: McGraw-Hill.
- Contreras, L.E., Escobar, I., & Trisancho, J.A. (2013). Estrategias educativas para el uso de las TIC en educación superior. *Tecnura*, 17, 161-173. doi:<https://doi.org/10.14483/22487638.7246>
- Diaz, J., & Benitez, F. (1998). *Introducción a los métodos numéricos para la resolución de ecuaciones*. Cádiz: Universidad de Cádiz.
- Drumea, A. (2012). Education in development of electronic modules using free and open source software tools. *Hidraulica*, (3/4), 54-60.

Gasca, M. C., Camargo, L. L., & Medina, B. (2014). Metodología para el desarrollo de aplicaciones móviles. *Tecnura*, 18(40), 20-35.

Gómez, R., Galvis, A., & Mariño, O. (1998). Ingeniería de software educativo con modelaje orientado por objetos: un medio para desarrollar micromundos interactivos. *Informática Educativa Uniandes Lidie*, 11(1), 9-30.

Jonoski, A., Alfonso, L., Almoradie, A., Popescu, I., Van Andel, S., & Vojinovic, Z. (2012). Mobile phone applications in the water domain. *Environmental Engineering and Management Journal*, 11, 919-930.

Lindley, C. (2013). *JavaScript Enlightenment*. Sebastopol: O'Reilly Media Inc.

Sotelo, F., & Solarte, M. F. (2014). Incorporación de recursos web como servicios de e-learning al sistema de gestión de aprendizaje. LRN: una revisión. *Tecnura*, 18(39), 165-180. doi:<https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.1.a12>

Sotelo, G. (2002). *Hidráulica de Canales*. México: Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Vidal, M., Gómez, F., & Ruiz, A. (2010). Software Educativos. *Educación Médica Superior*, 24(1). Retrieved from http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-21412010000100012





Una revisión de plataformas robóticas para el sector de la construcción

Robotics platforms for the construction sector: A review

Yeyson Alejandro Becerra Mora¹ 

Cómo citar: Becerra Mora, Y.A. (2020). Una revisión de plataformas robóticas para el sector de la construcción Tecnura. Tecnura, 24(63) 115-132. DOI: <https://doi.org/10.14483/22487638.15384>

Fecha de recepción: 10 de junio de 2019

Fecha de aceptación: 18 de octubre de 2019

RESUMEN

Contexto: En los últimos años la robótica ha venido integrándose a los distintos sectores económicos, permitiendo optimizar recursos y tiempos de producción; así como reducir los riesgos a los que se puede enfrentar el humano en su entorno de trabajo. Uno de los sectores más dinámicos y complejos para los sistemas autónomos es el de la construcción; razón por la cual se ha hecho pocos adelantos en los últimos años. En este trabajo se presenta una revisión de trabajos realizados para el sector de la construcción mediante sistemas robóticos.

Método: Este trabajo presenta inicialmente las ventajas y desventajas que tienen los robots en entornos de construcción. Posteriormente se divide en tres categorías los diversos trabajos presentados; la primera se enfoca en aquellos sistemas que fabrican piezas o módulos con geometrías complejas en entornos fuera del área de construcción; la segunda muestra sistemas retroalimentados para entornos cambiantes y algoritmos de planificación de rutas utilizados para el posi-

cionamiento del efector final; y la última, robots que realizan tareas pesadas o repetitivas para el beneficio del ser humano.

Resultados: Se obtiene un panorama de los diversos trabajos que se han hecho en robótica para el sector de la construcción; conociendo los actuales sistemas robóticos y los elementos que los componen para el desarrollo de tareas en este entorno.

Conclusiones: Los brazos robóticos que fueron inicialmente empleados en el sector de la industria llegan al sector de la construcción para desarrollar superficies complejas que involucren la optimización de recursos y tiempo. Este sector ha empezado a atraer recurso humano con habilidades en robótica e inteligencia artificial, haciendo que estas labores sean interdisciplinarias. Las proyecciones muestran que el ser humano reducirá los riesgos de lesiones en este sector, ya no tendrá que realizar tareas repetitivas o que involucren fuerza, debido a que el robot se encargará de ellas.

Palabras clave: robótica; construcción; arquitectura; geometrías complejas.

¹ Ingeniero en Automatización, máster en Automática y Robótica. Docente de la Corporación Unificada Nacional de Educación Superior (CUN). Bogotá, Colombia. Contacto: yeyson_becerra@cun.edu.co
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6718-4962>

ABSTRACT

Context: In recent years, robotics has been integrated into different economic sectors, allowing resources and production time to be optimized; as well as reducing the risks that humans can face in their work space. One of the most dynamic and complex sectors for the autonomous systems, is construction sector; which is why little progress has been made in the last years. This paper presents a review of studies for the construction sector using robotic systems.

Method: This review initially presents the advantages and disadvantages that robots have in construction environments. Subsequently, the different studies presented are divided into three categories; the first focuses on those systems that allow for off-site manufacturing, like building modules and pieces with complex geometry; the second shows feedback systems for dynamic environments and path planning algorithms used for positioning the end-effector; and the last one, robots that perform heavy or repetitive tasks for the benefit of the human being.

Results: An overview of the different studies that have been done in robotics for the construction sector is obtained; knowing state of the art robotic systems and the elements that compose them for the development of tasks in this environment.

Conclusions: The robotic arms were initially designed to be used in the industry sector, nevertheless, recently they are being used in the construction sector to develop complex surfaces that involve the optimization of resources and time. Furthermore, this sector has begun to attract human resources with skills in robotics and artificial intelligence, making construction tasks, interdisciplinary. The projections show that the human beings will reduce the risks of injuries in this sector; they will no longer have to perform repetitive or heavy tasks, because the robot will take care of them.

Keywords: robotics; construction; architecture; complex geometries.

INTRODUCCIÓN

Hasta hace algunos años, la industria de la construcción presentaba una gran cantidad de procesos manuales, comprometiendo la seguridad y bienestar del trabajador en muchos de ellos. Estadísticas de los últimos años muestran que existe una gran demanda para cubrir vacantes en labores de construcción, impidiendo que este sector crezca a su potencial. Estas dos principales razones han permitido el ingreso de la robótica al sector de la construcción; con el propósito de ayudar a remplazar o mejorar procesos existentes, y hacerlos más precisos, eficientes y óptimos.

Como se mencionó previamente, diversos países alrededor del mundo están viendo problemas en contratar mano de obra calificada; debido a que se está presentando una

menor oferta para cubrir vacantes en este sector. Además, en la actualidad las nuevas generaciones no se están interesando en trabajos donde se utilice más la fuerza que el cerebro. Por esta razón, la robótica se presenta como una solución ante ello, para que este sector continúe creciendo y construya más con menos recursos.

Un ejemplo de lo previamente escrito se presenta en Japón, país que ha disminuido el número de trabajadores en el sector de la construcción. Estadísticas muestran que la edad promedio de ellos se encuentra en los 54 años. Esto claramente muestra una problemática ya que muchos de ellos se jubilarán próximamente, creando una deficiencia de mano de obra en este sector. Lo más preocupante es que los trabajadores que están próximos a retirarse no van a ser reemplazados por jóvenes constructores, ya que los menores de 30 años solo ocupan en torno de un 10 % de

la fuerza laboral en el sector. Otro ejemplo es Estados Unidos, el cual también está presentando el mismo fenómeno que Japón; la fuerza laboral en el sector de la construcción se ha venido envejeciendo en la última década, según lo afirma la compañía Advanced Construction Robotics. En la actualidad hay problemas para encontrar personal calificado para este tipo de labores y más aún con el desinterés que muestran las generaciones más jóvenes para estos cargos.

Se debe tener en cuenta que el sector de la construcción es de los menos automatizados actualmente, pues tiene como fuente de productividad la mano de obra humana; por lo cual se entiende que las tareas de construcción son complicadas para ser automatizadas. Un ejemplo de ello para entender lo mencionado es que un robot industrial opera en entornos controlados, mientras que un robot en el sector de la construcción debe enfrentarse a entornos cambiantes. Lo cual lleva a que estos últimos deban adaptarse a cambios constantes en su sitio de trabajo, evitando la reprogramación de ellos en la medida de lo posible, con el fin de llegar a ser productivos y rentables.

Actualmente se están empleando brazos robóticos industriales que permiten colaborar en diversas tareas de la construcción; sin embargo, se debe tener en cuenta que diferencias entre la superficie de un laboratorio (entorno controlado) y la del sitio de la construcción pueden ser considerables (entorno cambiante). La intervención del humano en tareas colaborativas con un robot industrial es crucial, ya que en ocasiones este último debe ser intervenido por posibles fallas que presente en la construcción; sin embargo, la precisión que alcanza un robot es casi imposible de ser replicada por el humano.

Los sitios de construcción tienden a ser desordenados y en constante cambio, razón por la cual se vuelve un desafío operar robots en

estos entornos. Un estudio realizado por ABI Research indica que en 2018 se encontró que el 28,7 % de los robots comerciales tenían algún tipo de navegación autónoma, la cual se ha vuelto relevante para la robótica en la construcción; así mismo, este también predice que para 2027, el porcentaje aumentará hasta el 79,3 % (ABI Research, 2019).

El presente artículo se divide en cinco secciones: la primera muestra una serie de ventajas y desafíos que se han identificado para los robots en el sector de la construcción; la segunda presenta diversas plataformas robóticas que se encargan de fabricar geometrías de difícil construcción para el ser humano; la tercera plantea la relevancia de los sensores para los sistemas robóticos y cómo estos colaboran a la toma de decisiones en un entorno cambiante; la cuarta muestra robots robustos para tareas de demolición, levantamiento de cargas pesadas u oficios riesgosos; la última sección sugiere algunas conclusiones.

VENTAJAS Y DESAFÍOS DE LA ROBÓTICA EN EL SECTOR CONSTRUCCIÓN

Adoptar robots en el sector de la construcción puede traer diversas ventajas, una de ellas es bajar costos de operación a través de recortes en la carga de trabajo necesaria para la obra. Albañiles y obreros que trabajen junto a robots colaborativos pueden incrementar la productividad en la construcción; haciendo que estos últimos realicen las tareas tediosas, repetitivas y pesadas. A diferencia de lo que se podría pensar, los robots llegan a ser ayudantes de los humanos y no a tomar la totalidad de los puestos de trabajo en este sector. Por tanto, un cambio en las relaciones y colaboraciones presentadas en el lugar de trabajo está emergiendo en la actualidad.

Los robots también pueden incrementar la eficiencia en tareas repetitivas; mientras un humano tiene que lidiar con diversos elementos, como agotamiento, aburrimiento,

problemas personales, errores, pereza, entre otros; un robot, no. Esto hace que la calidad de trabajo del humano se vea comprometida. Un robot puede operar por periodos mucho más prolongados que los de un humano (24 horas/día – 7 días/semana), sin verse comprometida la calidad de sus labores; solo teniendo en cuenta mantenimiento o posibles fallas que se puedan presentar en el sistema. Además, los robots pueden llegar a ser muy precisos en diversas tareas (ensamblaje de piezas, soldado, fresado, manipulación, perforación, entre otras).

Con esta tecnología es posible crear proyectos personalizados y que respondan a la demanda del mercado. Esto permite prefabricar componentes en el lugar de la construcción, evitando la necesidad de transportar materiales o bienes de dimensiones considerables. Por tanto, tiempo y costos del proyecto se reducen; además, cambios imprevistos que pueda sugerir el cliente se pueden realizar rápidamente y con una mínima pérdida de recursos.

Mejorar la movilidad, incrementar la fuerza o, incluso, reducir accidentes asociados al trabajo pueden ser posibles gracias al uso de exoesqueletos. Esta es otra ventaja que ofrece la robótica en el sector de la construcción, haciendo que el trabajador no se vea sometido a altos niveles de estrés causados por labores físicas exigentes.

La robótica reduce el riesgo de accidentes entre los trabajadores de obra, ya que las tareas que comprometan la seguridad del humano pueden ser asignadas a los robots. Eso hace que el número de demandas que pueden ser interpuestas por los mismos trabajadores a la compañía de construcción debido a accidentes laborales, se vean reducidas considerablemente. Además, los robots tienen la ventaja de trabajar en entornos riesgosos (alturas, espacios reducidos, oscuridad, aire contaminado, etc.).

La logística y gestión de una obra también puede ser mejorada a través de robots móviles, los cuales, a su vez, puedan comunicarse con otros dispositivos para solicitar información. Esto permitirá mejorar en tareas colaborativas y seguridad en el equipo de trabajo. Por tanto, mejorar la conectividad a través de redes 5G, hará que los robots mejoren sus habilidades de comunicación y cooperación entre ellos. Para desarrollar una tarea específica en una obra, diversos robots pueden trabajar juntos en distintas sub tareas, para completar el trabajo en un menor tiempo. Además, trabajar en enjambre permitirá que todos los robots aprendan de lo que uno de ellos está aprendiendo, haciéndolos más listos y asequibles.

Por otro lado, aún se presentan algunas desventajas en la actualidad para el uso masivo de la robótica en el sector de la construcción. Los brazos robóticos fueron originalmente pensados para ser operados en entornos controlados y así orientados al sector industrial. En el sector de la construcción, cada espacio es único, además de desorganizado por los diversos elementos que se pueden encontrar alrededor. Lo cual exige una mayor autonomía en estos sistemas, haciendo de los sensores, sistemas de control y la inteligencia artificial, elementos claves para el desarrollo de tareas más exigentes.

La destreza es otro desafío al que se enfrenta la robótica en los distintos sectores económicos y en la cual se está trabajando en distintos centros de investigación. Para el sector de la construcción en particular, labores como tender cableado exigen de una destreza mucho mayor a la que actualmente poseen los robots.

Otras desventajas se presentan en el sitio de trabajo donde se lleva a cabo la construcción. Una de ellas tiene que ver con las superficies irregulares; si bien la industria o los mismos laboratorios ofrecen superficies regulares para que los robots desarrollen sus labores, el

sector de la construcción no puede hacer lo mismo. Esto hace que el robot pierda el sistema de referencia en su extremo y no pueda ejercer adecuadamente su labor, reduciendo precisión en la misma. Las inclemencias climáticas se pueden volver también un problema para esta tecnología, ya que se debe tener en cuenta que las labores en ocasiones han de ser en entornos abiertos, lo cual hace que la operación del robot se pueda ver comprometida.

GEOMETRÍAS COMPLEJAS

La robótica permite que los arquitectos tengan más herramientas para que lleven sus diseños a la realidad; generando geometrías complejas que hace unos años no era posible desarrollarlas, ya fuera por la falta de precisión del humano o por el excesivo costo que generaba desarrollarlas.

En la Escuela Politécnica Federal de Zurich (ETHZ), investigadores elaboraron una pared de madera con pequeñas piezas de distintos grosores en el año 2012 y una pared en ladrillo con forma de onda en 2016. Para ello se emplearon dos plataformas móviles: dimRob (Helm, Ercan, Gramazio y Kohler, 2012) e IF (Dörfler et al., 2016). Si bien el concepto de estos dos sistemas es el mismo, IF trae algunas mejoras sobre su predecesora dimRob; su precisión aumenta y la intervención humana se reduce considerablemente ya que no tiene que ser reposicionada manualmente.

Estas dos plataformas se encuentran equipadas con brazos robóticos, sensores (escáneres 2D, 3D e IMU), sistemas de control, software (Grasshopper Rhinoceros, ROS, ABB Robot Control y Python) y pinzas de vacío. El sistema permite conocer su propia localización dentro del entorno de fabricación y ensamblar componentes de construcción de una manera precisa en el espacio (Sandy et al., 2016).

Mallas de polímero para procesos de moldeo en estructuras de concreto, pueden ser desarrolladas a través de un método de tejido robótico (Hack, Lauer, Gramazio y Kohler, 2014). El sistema está provisto de un brazo robótico de 6 grados de libertad (GDL), una boquilla para extrudir el material y un subsistema de enfriamiento; este permite la construcción de geometrías complejas y la optimización de recursos.

Haciendo uso de la misma plataforma mencionada previamente (IF); se diseñó, desarrolló y evaluó una herramienta final (end-effector) para el brazo robótico de esta; la cual permite fabricar prototipos de mallas en alambre de distintos diámetros. Esto se elaboró con el fin de construir estructuras de concreto en acero reforzado que respondieran a geometrías complejas que son de difícil construcción con las actuales técnicas de fabricación (Kumar et al., 2017).

Es posible lograr curvaturas complejas a través de una producción manual o de un fresado en CNC a gran escala, pero ninguno de estos dos métodos es económico. Ahora bien, robotic hotwire cutting (RHWC) rompe con esta tendencia (McGee, Feringa y Sondergaard, 2013). Teniendo en cuenta el método RHWC, Sondergaard propone la utilización de una cuchilla en caliente (hotblade) para realizar cortes en distintos tipos de materiales.

Esta es montada entre dos brazos robóticos, lo cual ayuda a definir su posición y orientación; de esta forma, es posible determinar la geometría del objeto. Un robot más soporta la pieza que se desea cortar y la mueve linealmente en dirección de la cuchilla. El corte de la superficie para generar las curvaturas se ha de realizar por segmentos, esto teniendo en cuenta las dimensiones del objeto a cortar, así como la inestabilidad en la cuchilla (Sondergaard et al., 2016).

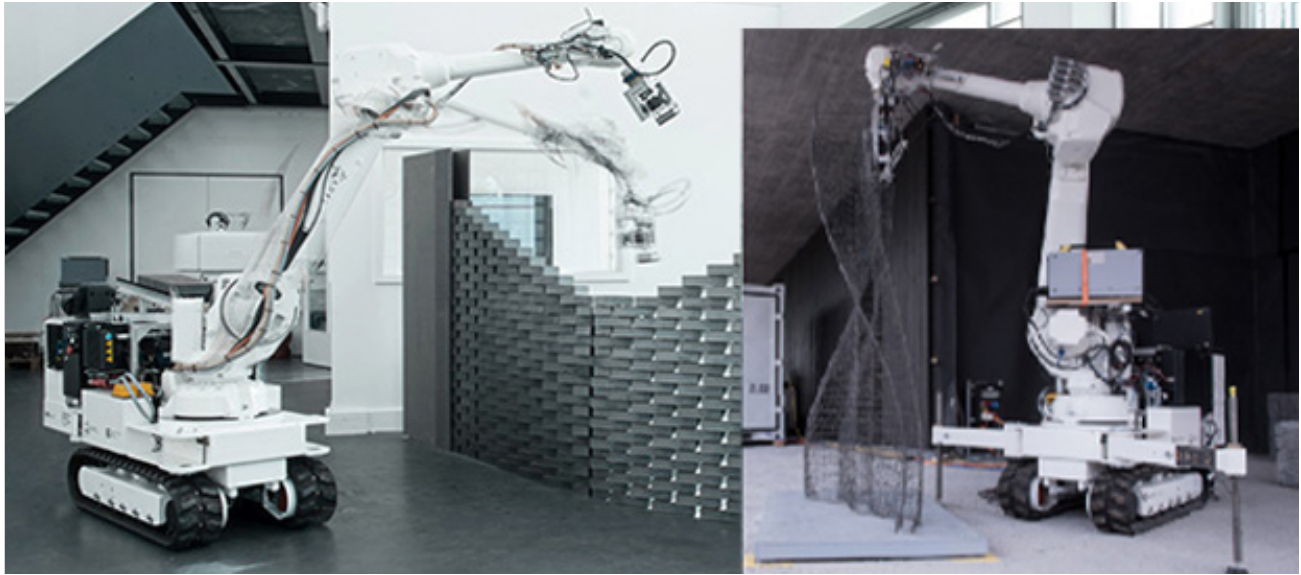


Figura 1. Plataforma robótica IF desarrollada por ETHZ (izq) End-effector para elaboración de prototipos de mallas de alambre (der).
Fuente: Ajustado de (Dörfler et al., 2016) y (Kumar et al., 2017)

Las impresoras 3D tienen limitantes con respecto al volumen que pueden construir, lo cual hace que los diseños sean pensados en pequeñas piezas o módulos. En el sector de la construcción se complica aún más el uso de estas impresoras debido a las dimensiones en las cuales se trabajan; sin embargo, el uso de brazos robóticos o plataformas móviles facilita la creación de sistemas de impresión 3D que construyan estructuras en una sola pieza.

Además, si se combinan robos industriales con técnicas basadas en extrusión, como contour crafting (Khoshnevis, Hwang, Yao y Yeh, 2006), se obtienen estructuras en concreto sin la necesidad de utilizar encofrados (Nemato-llahi, Xia y Sanjayan, 2017). El MIT propone utilizar un sistema robusto que permita fabricar en el sitio de trabajo, estructuras arquitectónicas personalizadas utilizando información del entorno. El sistema se compone por una plataforma móvil y un brazo robótico que a su vez está compuesto por un brazo eléctrico y uno hidráulico. El experimento que se llevó a cabo para evaluar su operación fue construir un domo de 14,6 metros y 3,7 metros de alto;

con un tiempo de 13,5 horas (Keating, Leland, Cai y Oxman, 2017).

Bhooshan, Ladinig, Mele y Block (2019) proponen utilizar un brazo robótico que realice un proceso de impresión 3D por capas a gran escala utilizando concreto, generando así una estructura esquelética en este material. A diferencia de imprimir capa por capa de forma vertical (método convencional) desde un robot industrial, Zhang et al. (2015) sugieren un generador de ruta para superficies curvas, imprimiendo en ángulo estas mismas.

Por otro lado, tener distintos robots trabajando sobre una misma estructura permite acelerar el tiempo de producción, así como construir estructuras más fuertes y complejas. Inclusive, se puede pensar en utilizar enjambres robóticos de este tipo para construir en áreas remotas o de difícil acceso (Zhang et al., 2018). Fabricar estructuras de concreto de grandes dimensiones en el área de construcción se vuelve una ventaja, ya que evita el problema de movilizar pesos considerables (Lim et al., 2012).

Al hablar de las geometrías complejas para paneles arquitectónicos, regularmente se piensa en la utilización de moldes; sin embargo, como se mencionó previamente, un robot industrial puede recrear geometrías complejas con gran precisión y en menor tiempo; empleando distintas herramientas y trayectorias.

[Bard, Cupkova, Washburn y Zeglin \(2018\)](#) utilizan este principio en paneles de concreto: primero, deposita el material a través de una boquilla ubicada en el extremo del robot, y segundo, remueve, a través de un barrido, pequeñas cantidades de material en la superficie de la pieza. Otra técnica es utilizar lycra como encofrado para verter concreto dentro de ella, apoyándose en brazos robóticos que trabajan cooperativamente para que la estiren y la posicionen según las necesidades de diseño.

Las piezas fabricadas son de tres extremidades; dos de ellas están sujetas a cada uno de los robots y la restante se encuentra sujeta a la armadura, la cual también se utiliza para realizar el ingreso del concreto. Este tipo de piezas permiten construir fachadas, paredes e inclusive esculturas ([Culver, Koerner y Sarafian, 2016](#)).

Dejando a un lado el uso de brazos robóticos, [Shaffer \(2017\)](#) presenta un encofrado robotizado, semejante a una cadena, el cual crea una superficie de fundición que puede moverse y cambiar de forma.

El mecanismo está compuesto por distintos eslabones enlazados entre sí, los cuales son accionados por motores en cada uno de sus ejes; igualmente el accionamiento de cada uno de estos motores se puede realizar remotamente a través de una app. Esta propuesta puede mejorar la respuesta a requerimientos arquitectónicos a través de personalizado y variabilidad en cada desarrollo.

SISTEMAS RETROALIMENTADOS Y ALGORITMOS DE PLANIFICACIÓN

Como se pudo entender de la anterior sección, se abarcaron diversos sistemas en lazo abierto que permiten construir estructuras con geometrías complejas, y esto gracias a que los procesos de fabricación tienden a ser predeterminados. Sumado a lo anterior, en los últimos años se ha evolucionado hacia sistemas en lazo cerrado para robots en el sector de la construcción; por tanto, sensores externos se han vuelto aliados primordiales en este nuevo desafío.

Lo que se busca con esto es que los robots sean capaces de recibir información del entorno de trabajo (área de construcción), la procesen y actúen en función de esta. [Dubor et al. \(2016\)](#) plantean un marco de trabajo para la fabricación robótica el cual logre: enlazar datos, conocer el comportamiento del material, interactuar, definir protocolos y tener retroalimentación; además, combinar herramientas paramétricas (Rhinoceros 3D + Grasshopper 3D) con plugins CAM (Kuka\prc) para explorar el potencial y las limitaciones que tiene el proceso de fabricación robótica. Los sensores ayudan a conocer las variables del entorno que pueden afectar la fabricación de la pieza o estructura, como temperatura, velocidad de extrusión del material, humedad, presión, entre otras; así como optimizar la trayectoria del brazo robótico y trabajar de forma colaborativa con humanos o inclusive con otros robots.

Por otro lado, los sensores dan a conocer los avances de la obra y el comportamiento dinámico del material de construcción; [Sutjipto et al. \(2019\)](#) consideran que mediante una cámara en el extremo de un brazo robótico se determina si una locación del espacio de trabajo está ocupada por material previamente depositado. Igualmente, el uso de cámaras, técnicas de visión y brazos robóticos posibilita identificar y manipular ob-

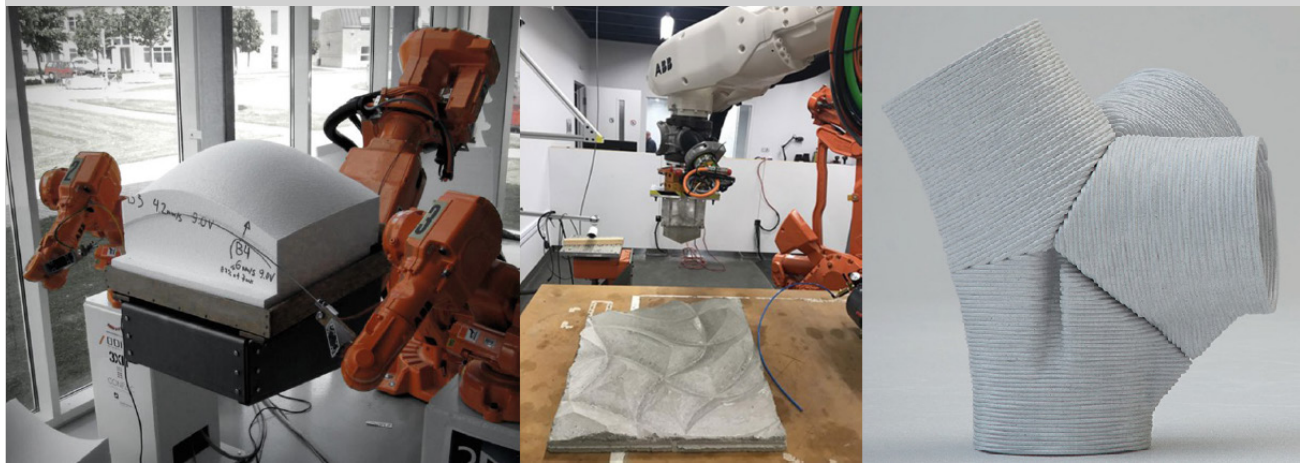


Figura 2. Hotblade para la fabricación de superficies curvas (izq.). Impresión 3D en concreto (med.). Módulos en concreto fabricados con un brazo robótico (der.)

Fuente: Ajustado de (Sondergaard et al., 2016), (Bard, Cupkova, Washburn y Zeglin, 2018) y (Bhooshan, Ladinig, Mele y Block, 2019)

jetos (Bueno, Arteaga y Candea, 2013), así como ensamblar cada uno de estos en una estructura prediseñada (Feng et al., 2014; Feng et al., 2015).

La robótica cooperativa también ha hecho sus aportes en el sector de la construcción; un ejemplo de ello es Termes (Petersen, Nagpal y Werfel, 2011), un sistema autónomo multirrobot bioinspirado que permite construir estructuras 3D de acuerdo con las especificaciones del usuario; además tiene la capacidad de responder ante cambios en la obra. El sistema se compone de robots móviles que se comunican entre ellos y de bloques especializados para su fácil manipulación, así como de un algoritmo de control descentralizado. Otro ejemplo es Fiberbots (Kayser et al., 2018), el cual es un sistema bioinspirado de robots idénticos que construyen distintas partes de la misma estructura en paralelo. Estos crean tubos compuestos que se pueden escalar y extender, controlando la curvatura estos. El diseño del robot se divide en tres tareas: manipulación del material compuesto, movilidad y coordinación entre robots.

De acuerdo con el trabajo cooperativo que puede hacerse entre robots, la planificación de rutas (path planning) es otra técnica que ha tomado relevancia no solo en la robótica móvil (Arbulú, Martínez y Montiel, 2015), (Martínez, Orjuela y Arbulú, 2016), sino también en brazos robóticos empleados en distintos sectores, entre ellos la construcción. Esta permite realizar tareas, como ensamblar piezas o evitar obstáculos, ya sean estos, la misma estructura que se está fabricando u otro robot que esté trabajando en paralelo.

Existen algoritmos que resuelven eficientemente la secuencia de extrusión, las poses del efector final del robot, la posición de las articulaciones y las trayectorias transitorias para cerchas espaciales (Huang, Garret y Mueller, 2018). Un ejemplo más puntual es que mientras un robot sostiene la estructura temporalmente, el otro posiciona una pieza dentro de esta (Gandia et al., 2019).

Existen sistemas robustos donde interactúan robots de 6 GDL, los cuales a su vez son integrados a una base con movimiento en tres ejes que ensamblan estructuras de ma-

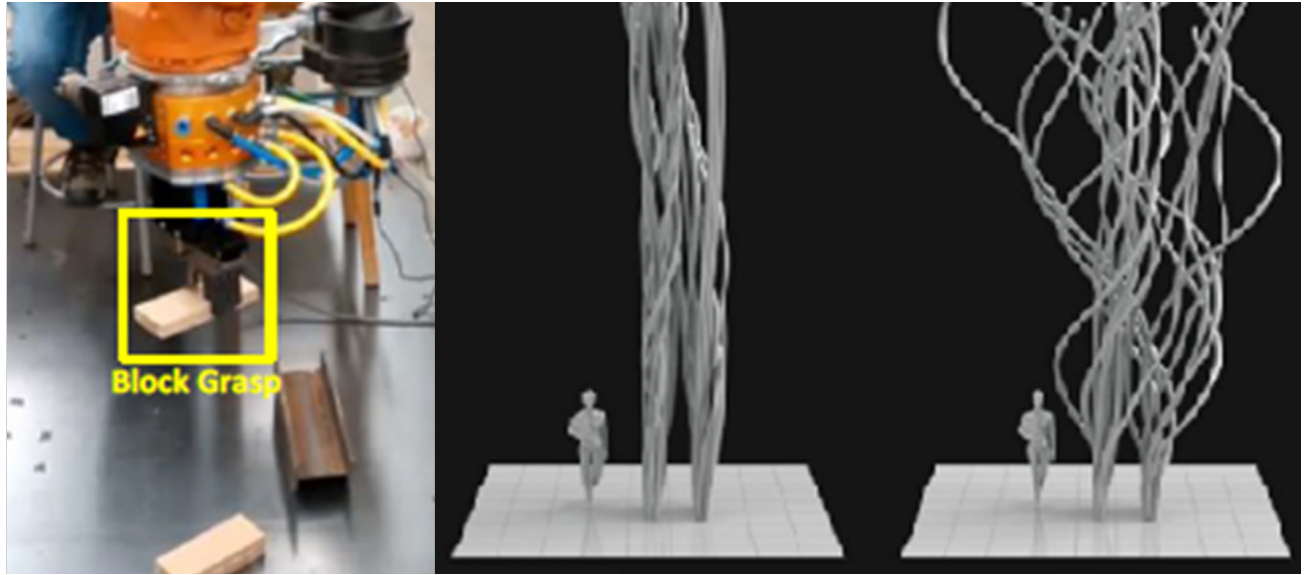


Figura 3. Sistema de visión y brazo robótico (izq.). Fiberbots (der.)
Fuente: Ajustado de (Feng et al., 2014) y (Kayser et al., 2018.)

dera (Thoma et al., 2018) o estructuras de metal (Parascho et al., 2017); haciendo uso de diversas herramientas (fresado, taladrado, cortado, soldadura, etc.); y soportados en algoritmos de planificación de rutas al ser un trabajo cooperativo.

Trabajar junto a robots fue la idea que tuvo Shimizu Corporation, además de reducir el agotamiento y las tareas repetitivas, así como el de aumentar la productividad y el entusiasmo de las generaciones más jóvenes al trabajar en el sector de la construcción. La compañía actualmente cuenta con tres robots para este sector: el primero se especializa en soldar autónomamente sin la intervención humana; el segundo se encarga de instalar techos, detectando su locación a través de imágenes y LIDAR (laser imaging detection and ranging); y el último es un robot móvil que transporta material, planifica rutas para evitar obstáculos y entra a ascensores para moverse entre pisos (Shimizu Corporation, 2019). Empleando igualmente la inteligencia artificial, además de la realidad virtual, la startup SE4 utiliza estas herra-

mientas para enseñarle a brazos robóticos a excavar o apilar bloques para la construcción de estructuras en el espacio. El software es entrenado en un entorno simulado, lo que permite posteriormente al robot desarrollar tareas en un entorno real. El problema radica en los retrasos en la comunicación, así como de no tener agentes inteligentes en el espacio de trabajo (SE4 Inc., 2019).

TRABAJO PESADO

Si bien hasta el momento se han descrito en su gran mayoría brazos robóticos industriales orientados al sector de la construcción –adaptándoles boquillas de extrusión, sensores, algoritmos de planificación de rutas, entre otros elementos–, también se presentan otras configuraciones robóticas que ayudan en tareas más robustas. En la actualidad, diversos sistemas robóticos son operados fuera del área de construcción, debido a lo explicado previamente con respecto a la complejidad que traen estos entornos de trabajo; además el ensamblaje en este sector aún se realiza en el área de trabajo; sin

embargo, se han dado adelantos en traer la fabricación al sitio de trabajo, con el principal objetivo de reducir costos en la obra.

El sistema autónomo SPIDERobot (Moreira et al., 2014) se desarrolló para que trabajara dentro del espacio de la construcción. El hardware de este robot lo componen cuatro cables ubicados en las esquinas superiores del marco de trabajo, los cuales se recogen y se extienden a través de motores; una plataforma móvil a donde convergen cada uno de los cables, una pinza y un sistema de visión (Sousa et al., 2016). El robot posee 4 GDL, los cuales le permiten trasladarse en coordenadas (x, y, z);

así como una rotación en el eje z, la cual está asociada a la pinza. Configuraciones semejantes a SPIDERobot son las realizadas por investigadores de la Universidad de Laval (Barnett y Gosselin, 2015); e investigadores de IAAC y Tecnalia (Izard et al., 2017). La primera de estas se centra en la construcción de una estatua de 2,16 m con una precisión de 1 cm, utilizando espuma de poliuretano como material objeto. La segunda se centra en el desarrollo del robot paralelo Cogiro; entre sus características se resalta que tiene un espacio de trabajo mucho más amplio que el de un robot industrial convencional y su posición-

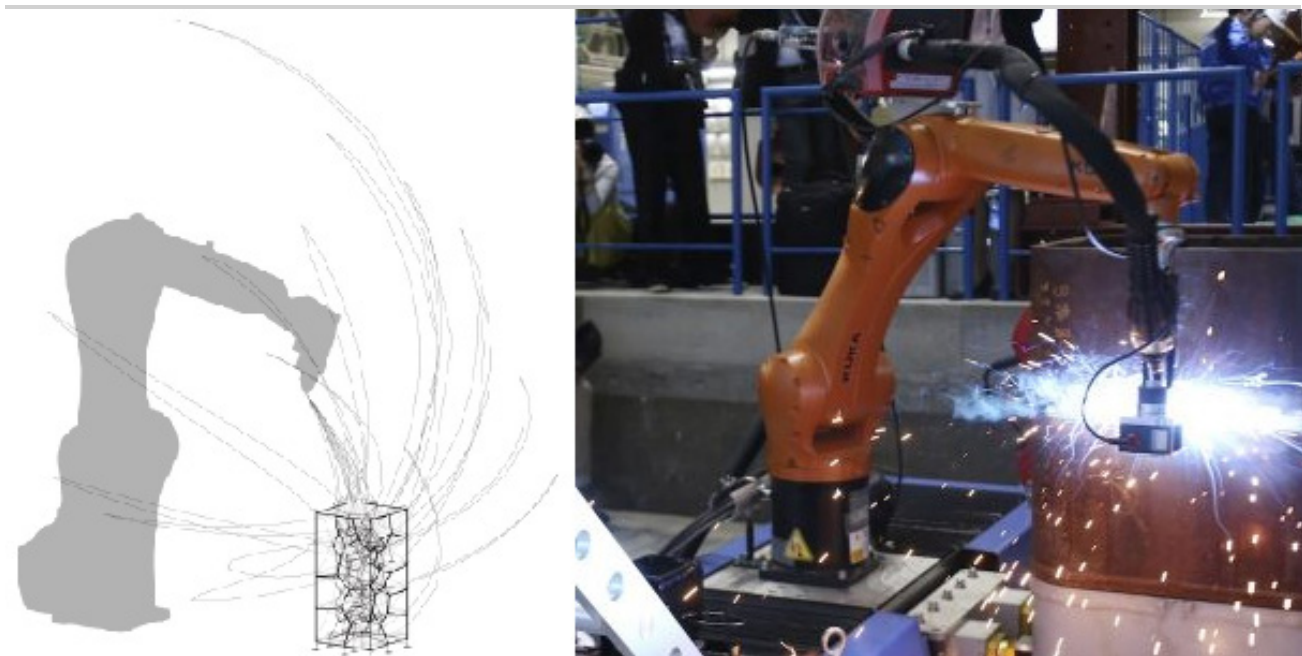


Figura 4. Planificación de rutas (izq.). Robot soldador autónomo de SHIMIZU (der.)
Fuente: Ajustado de (Huang, Garret y Mueller, 2018) y (Shimizu Corporation, 2019)

namiento sigue siendo determinado por el enrollamiento de cables al igual de SPIDERobot. En esta investigación se crearon paredes de arcilla con una geometría ondulante, a través de capas superpuestas unas sobre otras; validando trayectorias rectas y curvas, apilamiento de capas, velocidad de impresión y tiempo de secado del material.

Uno de los inconvenientes que tienen los robots industriales es que son pesados y voluminosos; lo cual los hace de difícil despliegue y desplazamiento en algunas áreas de construcción. La plataforma robótica presentada por Dharmawan et al. (2017) permiten que un robot industrial de bajo peso (Universal Robot UR10) pue-

da navegar entre pisos (sitio de trabajo), otorgándole al brazo robótico 1 GDL extra. El sistema se integra fácilmente a andamios, realiza labores de soldadura e ingresa a espacios estrechos exclusivos para el ser humano. Otro robot colaborativo es SAM100, el cual trabaja de la mano con el albañil en el posicionamiento de ladrillos en construcciones. Entre sus características se encuentran disminuir el costo de la instalación, incrementar la productividad (posiciona 300 ladrillos/hora), reducir el esfuerzo de levantamiento (hasta un 80 %) y mejora la precisión. El sistema lo compone un brazo robótico, inyector de concreto, sistema de alimentación de ladrillos, sensores y software propio de la empresa; además funciona con gas propano. Requiere de dos técnicos: uno que supervisa su correcto desempeño y otro que se encarga de suministrar los ladrillos al sistema (Construction Robotics, 2019).

Otra labor que ocupa gran atención en el sector de la construcción es la demolición. Esta es una de las tareas más riesgosas en este sector, razón por la cual los robots que desempeñan esta tarea ocupan actualmente el 90 % (RIA, 2019) del mercado total de robots utilizados en el sector de la cons-

trucción. El automatizar esta tarea permite mantener alejados a los trabajadores de situaciones riesgosas, haciendo que estos se concentren en tareas más productivas.

Una de las grandes compañías que se dedican al desarrollo de robots para actividades de demolición es Husqvarna; sus robots son teleoperados, tienen un sistema de locomoción para desplazarse a lo largo de la obra y, además, están provistos con un brazo que permite intercambiar herramientas dependiendo de la tarea que se quiera realizar (excavar, palear, agarrar, zanzar, aplastar, remover, etc.). Su alcance llega hasta los 5,5 metros, tienen una alta relación potencia/peso, pueden pasar por puertas de tamaño estándar y tienen un bajo centro de masa que les permite mayor estabilidad (Husqvarna, 2019).

Otro robot con características muy semejantes es el de la compañía Brokk; los niveles de ruido y vibraciones que esta máquina produce son bajos, lo cual lo hace ideal para trabajar en horarios de oficina o inclusive en áreas donde existan restricciones de ruido; además, a diferencia de otros sistemas, labores de cortado y perforado no requieren el uso de agua (Brokk, 2019). Los vehículos au-

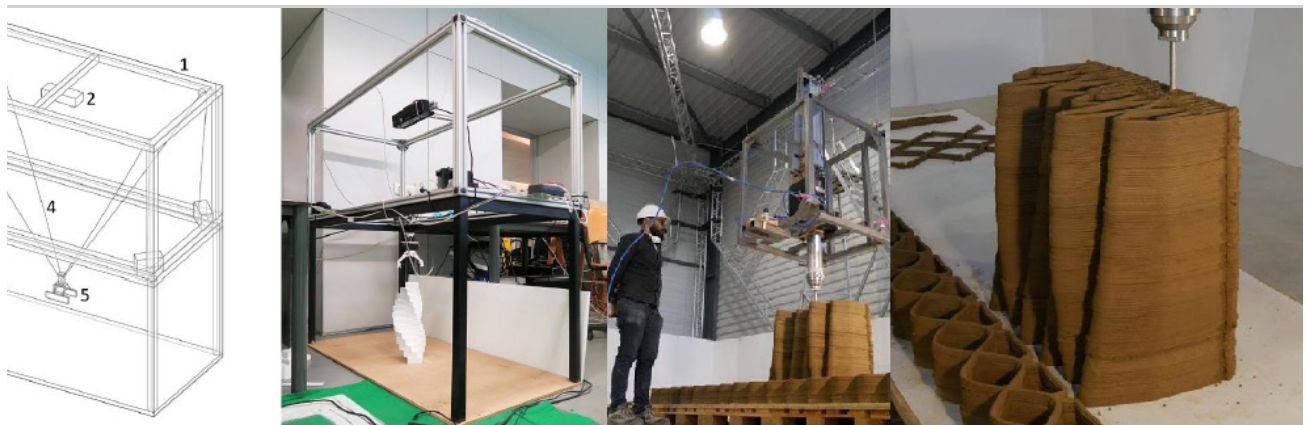


Figura 5. The SPIDERobot (izq.). Cogiro (der.)
Fuente: Ajustado de (Moreira et al., 2014) y (Izard et al., 2017)

tónomos han tomado gran relevancia en los últimos años, atrayendo la atención de centros de investigación y empresas alrededor del mundo; sin embargo, aún se encuentran en desarrollo debido al entorno complejo y altamente dinámico al cual se enfrentan. Partiendo de ese mismo concepto, pero en un entorno más controlado, Built Robotics ha venido desarrollando bulldozers, excavadoras y minicargadores autónomos, los cuales están en la capacidad de realizar las mismas tareas (excavar, empujar, levantar, cargar, manipular, zanjar, etc.) que desarrollan los vehículos convencionales. Cada uno de estos robots está provisto de sensores que permiten detectar personas, animales y otros vehículos; tienen un sistema donde el robot está confinado a trabajar en un lugar delimitado, y el supervisor puede parar la operación en cualquier momento que desee (Built Robotics Inc., 2019).

No solo la demolición tiende a ser una tarea

riesgosa; entrar en contacto con un material como el asbesto también lo es. El proyecto Bots2Rec de Europa (Detert et al., 2017) y el trabajo desarrollado por Takenaka Corporation en Japón (Arai y Hoshino, 2010) buscan utilizar robots móviles para remover autónomamente asbesto de superficies regulares, como paredes, techos, vigas y pisos. Entre las características físicas de los sistemas presentados se encuentran: herramientas abrasivas para la remoción, sensores de fuerza, plataformas móviles, brazos robóticos de 6 o 7 GDL, unidades de aspiración y finalmente, interfaces para ser teleoperados y supervisados. Estos sistemas evitan que operarios entren en contacto directo con este material contaminante, lo cual previene problemas de salud e incrementan el tiempo de remoción sobre las superficies, comparado con el de un humano.

Para el sector de la construcción también se han desarrollado exoesqueletos que permi-



Figura 6. Robot de demolición de Husqvarna (izq.). Robot de demolición de Brokk (der.)
Fuente: Ajustado de (Husqvarna, 2019) y (Brokk, 2019)

ten maximizar características físicas en el ser humano, reduciendo la accidentabilidad y posibles lesiones que se puedan presentar a lo largo de los años por realizar tareas repetitivas y manipulación de altos pesos en el lugar de trabajo. La compañía Cyberdyne desarrolló el sistema HAL, un exoesqueleto que ayuda a incrementar la fuerza del usuario y reducir el estrés aplicado en la espalda por el levantamiento de elementos pesados como los que se pueden encontrar en una obra (Cyberdyne Inc., 2019). Fortis es otro exoesqueleto que permite aliviar la carga del usuario y reducir su fatiga muscular a través de biomecánica; gracias a ello, aumenta la productividad en la obra, y mejora fuerza y resistencia del usuario; adicionalmente, es un sistema que no necesita de una fuente de alimentación para ser utilizado (Lockheed Martin Corporation, 2019).

Los robots humanoides han empezado a ser objeto de investigación para el sector de la construcción, con el fin de que puedan replicar el movimiento humano en entornos de construcción complejos. Se ha avanzado en distintos frentes con el uso de brazos robóticos y robots móviles; algunos ejemplos han sido mencionados en párrafos anteriores, sin embargo todavía es necesaria la intervención humana para unificar las construcciones. HRP-5P es un robot albañil diseñado y desarrollado por Japan's National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, capaz de generar mapas 3D del entorno, detectar objetos, manipular hojas de drywall de hasta 13 kg, así como de emplear herramientas para ensamblarlas (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology [AIST], 2018).

CONCLUSIONES

La robótica continuará expandiéndose en los diversos sectores económicos y definiti-

vamente el sector de la construcción es uno de ellos. Un nuevo uso de los brazos robóticos industriales ha sido descubierto; emplearlos como herramientas que fabrican piezas con geometrías complejas y con un alto grado de precisión es posible, dejando al humano concentrarse en la creatividad del diseño. Si bien, inicialmente, el brazo robótico tenía limitantes en construir espacios amplios o piezas de volúmenes considerables, en la actualidad se tienen plataformas robóticas móviles que permiten ampliar su espacio de trabajo.

El desarrollo de proyectos de construcción se ha vuelto una tarea multidisciplinar, donde no solo se encuentran implicados arquitectos, ingenieros civiles y albañiles, sino también personas con conocimientos en robótica, programación, CAD/CAM, inteligencia artificial, entre otros.

La sociedad en la actualidad se está moviendo hacia el desarrollo de habilidades cognitivas, dejando las tareas repetitivas, de alta precisión o que implican fuerza, a sistemas robóticos que las pueden desempeñar mucho mejor que un ser humano. Debido a esto se está presentando una reducción significativa y un envejecimiento en la población encargada de labores físicas. La robótica no solamente puede ser aprovechada para la fabricación de arquitectura interesante, sino también de mejorar las condiciones del trabajador (ergonomía, seguridad y satisfacción); además de realizar construcciones más simples, más eficientes y menos costosas (tanto en tiempo como en material de obra).

Debido al hecho de que el sector de la construcción es un entorno no estructurado y dinámico; el empleo de sensores en plataformas robóticas permite identificar cambios en el ambiente y así mismo responder ante cambios imprevistos. Otra gran herramienta que viene para estos sistemas es

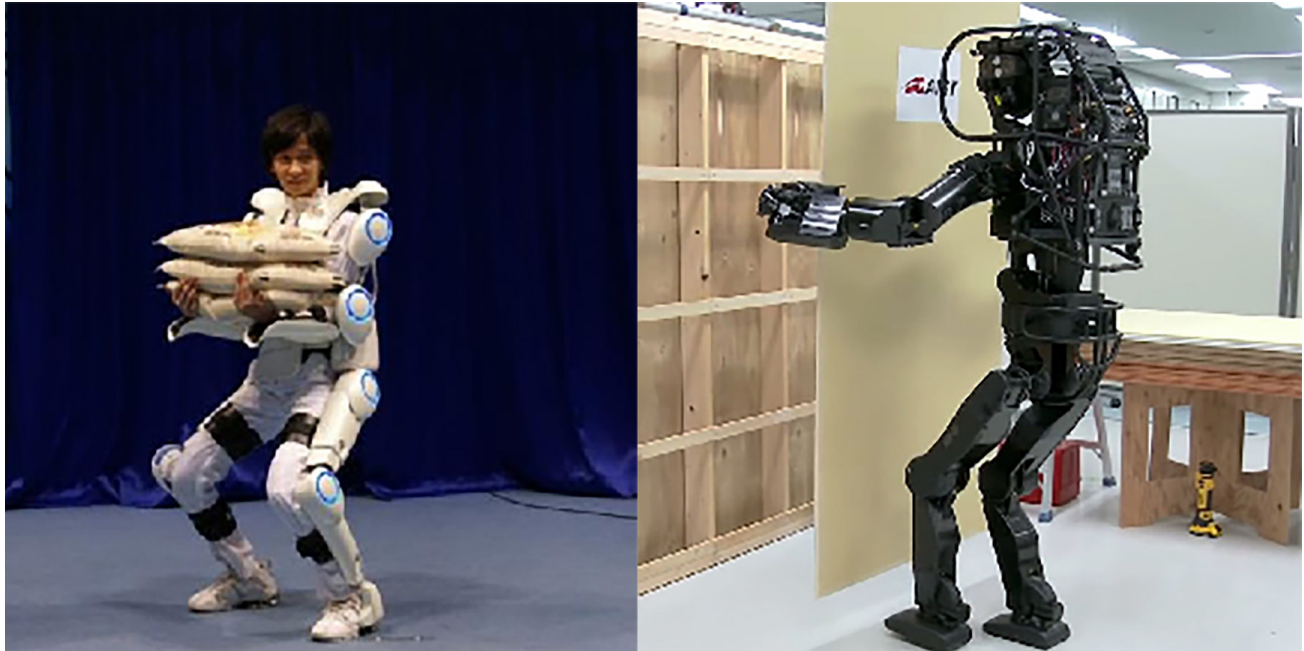


Figura 7. Exoesqueleto de Cyberdyne (izq.). Robot humanoide HRP-5P (der.)
Fuente: Ajustado de (Cyberdyne Inc., 2019) y (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology [AIST], 2018)

el uso de la inteligencia artificial; la cual permitirá aprender tanto del humano como de otros robots y del propio entorno. Estos dos elementos harán de los robots, sistemas más inteligentes y autónomos, con la capacidad de responder ante un sector cambiante como es el de la construcción.

FINANCIAMIENTO

Corporación Unificada Nacional de Educación Superior (CUN).

REFERENCIAS

ABI Research (2019). Construction and mining represent the next frontier of robotics adoption thanks to automation technologies advances. Nueva York. Recuperado de <https://www.abiresearch.com/press/construction-and-mining-represent-next-frontier-robotics-adoption-thanks-automation-technology-advances/>

Arai, M. y Hoshino, H. (2010). Robot system for removing asbestos sprayed on beams. Japón. Recuperado de http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB_DC23562.pdf

Arbulú Saavedra, M. R., Martínez Santa, F., & Montiel Ariza, H. (2015). Metodología para el uso de la técnica de localización de raíces en la planeación de rutas para robots móviles. *Revista Tecnura*, 19(46), 49-64. DOI: <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.4.a04>

Bard, J., Cupkova, D., Washburn, N. y Zeglin, G. (2018). Robotic concrete surface finishing: a moldless approach to creating thermally tuned surface geometry for architectural building components using Profile-3D-Printing. *Construction Robotics*, 2, 53-65.

Barnett, E. y Gosselin, C. (2015). Large-scale 3D printing with a cable-suspended robot. *Additive Manufacturing*, 7(1), 27. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.05.001>

- Bhooshan, S., Ladinig, J., Mele, T. y Block, P. (2019). Function Representation for Robotic 3D Printed Concrete. *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2018*, 98-109.
- Brokk (2019). Construction. EE. UU. Recuperado de <https://www.brokk.com/us/industry/construction/>
- Bueno, M., Arteaga, M. y Candea, A. (2013). Modelado de sistemas de visión en 2D y 3D: Un enfoque hacia el control de robots manipuladores. *Revista Tecnura*, 17(37), 12-21. DOI: <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2013.3.a01>
- Built Robotics Inc. (2019). About. EE. UU. Recuperado de <https://www.builtrobotics.com/>
- Construction Robotics (2019). SAM100. EE. UU. Recuperado de <https://www.construction-robotics.com/sam100/>
- Culver, R., Koerner, J. y Sarafian, J. (2016). Fabric forms: The robotic positioning of fabric formwork. *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016*, 106-121.
- Cyberdyne Inc. (2019). HAL. Japón. Recuperado de <https://www.cyberdyne.jp/english/products/HAL/index.html>
- Detert, T., Eddine, S., Fauroux, J., Haschke, T., Becchi, F., Corves, B., Guzman, R., Herb, F., Linéatte, B., Martin, D. y Barrado, M. (2017). Bots2ReC: Introducing mobile robotic units on construction sites for asbestos rehabilitation. *Construction Robotics*, 1, 29-37.
- Dharmawan, A., Sedoru, B., Foong, S. y Soh, G. (2017). An agile robotic system mounted on scaffold structures for on-site construction work. *Construction Robotics*, 1, 15-27.
- Dörfler, K., Sandy, T., Gifftthaler, M., Gramazio, F., Kohler, M. y Buchli, J. (2016). Mobile robotic brickwork-automation of a discrete robotic fabrication process using an autonomous mobile robot. En D. Reinhardt, R. Saunders y J. Burry (Ed.), *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016* (pp. 204-217). Springer International Publishing.
- Dubor, A., Camprodom, G., Bello, G., Reinhardt, D., Saunders, R., Dunn, K., Niemela, M., Horlyck, S., Alarcon, S., Wozniak, D. y Watt, R. (2016). Sensor and workflow evolutions: Developing a framework for instant robotic toolpath revision. En D. Reinhardt, R. Saunders y J. Burry (Ed.), *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016* (pp. 410-425). Springer International Publishing.
- Feng, C., Xiao, Y., Willete, A., McGee, W. y Kamat, V. (2015). Vision guided autonomous robotic assembly and as-built scanning on structured construction sites. *Automation in Construction*, 59, 128-138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.06.002>
- Feng, C., Xiao, Y., Willete, A., McGee, W., y Kamat, V. (2014). Towards autonomous robotic in-situ assembly on structured construction sites using monocular vision. En *Proceedings of the 31st International Association for Automation and Robotics in Construction* (pp. 163-170). Sidney, Australia.
- Gandia, A., Parascho, S., Rust, R., Casas, G., Gramazio, F. y Kohler, M. (2019). Towards automatic path planning for robotically assembled spatial structures. En J. Willmann, P. Block, M. Hutter, K. Byrne y T. Schork (Ed.), *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2018* (pp. 59-73). Springer International Publishing.

- Hack, N., Lauer, W., Gramazio, F. y Kohler, M. (2014). Mesh-Mould: Robotically fabricated spatial meshes as reinforced concrete formwork. *Architectural Design*, 84(3)
- Helm, V., Ercan, S., Gramazio, F. y Kohler, M. (2012). Mobile robotic fabrication on construction sites: dimRob. En *Proceedings of the 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (pp. 4335-4341). Vilamoura, Algarve, Portugal.
- Huang, Y., Garret, C. y Mueller, C. (2018). Automated sequence and motion planning for robotic spatial extrusion of 3D trusses. *Construction Robotics*, 2, 15-39.
- Husqvarna (2019). Demolition Robots. Suecia. Recuperado de <https://www.husqvarnacp.com/global/machines/demolition-robots/>
- Izard, J., Dubor, A., Hervé, P., Cabay, E., Culla, D., Rodriguez, M. y Barrado, M. (2017). Large-scale 3D printing with cable-driven parallel robots. *Construction Robotics*, 1, 69-76.
- Kayser, M., Cai, L., Falcone, S., Bader, C., Inglessis, N., Darweesh, B. y Oxman, N. (2018). Fiberbots: An autonomous swarm-based robotic system for digital fabrication of fiber-based composites. *Construction Robotics*, 2, 67-79.
- Keating, S., Leland, J., Cai, L. y Oxman, N. (2017). Toward site-specific and self-sufficient robotic fabrication on architectural scales. *Science Robot*, 2, 1-15.
- Khoshnevis, B., Hwang, D., Yao, K. y Yeh, Z. (2006). Mega-scale fabrication by contour crafting. *International Journal Industrial and Systems Engineering*, 1(3), 301-320.
- Kumar, N., Norman, H., Doerfler, K., Walzer, A., Rey, G., Gramazio, F., Kohler, M. y Buchli, J. (2017). Design, development and experimental assessment of a robotic end-effector for non-standard concrete applications. En *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 1707-1713). Singapore, Singapore. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2017.7989201>
- Lim, S., Buswell, R., Le, T., Austin, S., Gibb, A. y Thorpe, T. (2012). Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in Construction*, 21, 262-268.
- Lockheed Martin Corporation (2019). Exoskeleton. EE. UU. Recuperado de <https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/exoskeleton-technologies/military.html>
- Martínez S., F.; Orjuela R., S. y Arbulú S., M. (2017). Global navigation approach for assistant robot. *Revista Tecnura*, 21(51), 105-117. DOI: <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.1.a08>
- McGee, W., Feringa, J. y Sondergaard, A. (2013). Processes for an architecture of volume. En S. Brell-Cockan y J. Braumann (Ed.), *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2012* (pp. 62-71). Springer International Publishing.
- Moreira, E., Pinto, A.M., Costa, P., Moreira, A.P., Veiga, G., Lima, J., Sousa, J.P. y Costa, P. (2014). Cable robot for non-standard architecture and construction: A dynamic positioning system. En *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)* (pp. 3184-3189). Sevilla, España. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIT.2015.7125568>.

- National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (2018). Development of a humanoid robot prototype, HRP-5P, Capable of Heavy Labour. Japón. Recuperado de https://www.aist.go.jp/aist_e/list/latest_research/2018/20181116/en20181116.html
- Nematollahi, B., Xia, M. y Sanjayan, J. (2017). Current progress of 3D concrete printing technologies. En Proceedings of the 34th Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC) (pp. 260-267). Taipéi, Taiwán. DOI: <https://doi.org/10.22260/ISARC2017/0035>
- Parascho, S., Gandia, A., Mirjan, A., Gramazio, F. y Kohler, M. (2017). Cooperative fabrication of spatial metal structures. En A. Menges, B. Sheil, R. Glynn y M. Skavara (Ed.), *Fabricate 2017* (pp. 24-29). UCL Press. DOI: <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000219566>
- Petersen, K., Nagpal, R. y Werfel, J. (2011). Termes: An autonomous robotic system for three-dimensional collective construction. En *Robotics: Science and Systems VII*. 27 a 30 de junio, Los Ángeles, EE. UU.
- Robotic Industries Association (RIA) (2019). Demolition Robots. Míchigan. Recuperado de <https://www.robotics.org/service-robots/demolition-robots>
- Sandy, T., Gifftthaler, M., Dorfler, K., Kohler, M. y Buchli, J. (2016). Autonomous repositioning and localization of an in situ fabricator. En Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (pp. 2852-2858). Estocolmo, Suecia. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2016.7487449>
- SE4 Inc. (2019). Space. Japón. Recuperado de <http://se4.space>
- Shaffer, M. (2017). Developing robotic formwork: enhancing formwork mobility and variability through mechanization. *Construction Robotics*, 1, 77-83.
- Shimizu Corporation. (2019). Construction. Japón. Recuperado de <https://www.shimz.co.jp/en/topics/construction/item12/>
- Sondergaard, A., Feringa, J., Norbjerg, T., Steenstrup, K., Brander, D., Graversen, J., Markvorsen, S., Baerentzen, A., Petkov, K., Hattel, J., Clausen, K., Jensen, K., Knudsen, L. y Kortbek, J. (2016). Robotic hot-blade cutting: An industrial approach to cost-effective production of double curved concrete structures. En D. Reinhardt, R. Saunders y J. Burry (Ed.), *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016* (pp. 150-164). Springer International Publishing.
- Sousa, J., Palop, C., Moreira, E., Pinto, A., Lima, J., Costa, P., Costa, P., Veiga, G. y Moreira, P. (2016). The SPIDERobot: A cable-robot system for on-site in robotics. En D. Reinhardt, R. Saunders y J. Burry (Ed.), *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016* (pp. 230-239). Springer International Publishing.
- Sutjipto, S., Tish, D., Paul, G., Vidal, T. y Schork, T. (2019). Towards feedback loops for robot-controlled additive manufacturing. En J. Willmann, P. Block, M. Hutter, K. Byrne y T. Schork (Ed.), *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2018* (pp. 85-97). Springer International Publishing.

Thoma, A., Adel, A., Helmreich, M., Wehrle, T., Gramazio, F. y Kohler, M. (2018). Robotic fabrication of bespoke timber frame modules. En J. Willmann, P. Block, M. Hutter, K. Byrne y T. Schork (Ed.), *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2018* (pp. 447-458). Springer International Publishing.

Zhang, G., Mondesir, W., Martinez, C., Li, X., Fuhlbrigge, T. y Bheda, H. (2015). Robotic Additive Manufacturing along Curved Surface – a Step towards Freeform Fabrication. En *Proceedings of the 2015 IEEE Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)* (pp. 721-726). Zhuhai, China. DOI: <https://doi.org/10.1109/ROBIO.2015.7418854>.

Zhang, X., Li, M., Lim, J., Weng, Y., Tay, Y., Pham, H. y Pham, Q. (2018). Large-scale 3D printing by a team of mobile robots. *Automation in Construction*, 95, 98-106.





INSTRUCCIONES PARA LOS AUTORES

Revista *TECNURA*
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad Tecnológica

CONTENIDO

Alcance y política editorial de la revista
Tipos de artículos aceptados
Formato del artículo
Envío de artículos
Procedimiento para la publicación
Arbitraje de artículos
Contacto

1. ALCANCE Y POLÍTICA EDITORIAL DE LA REVISTA

La revista *Tecnura* es una publicación institucional de la Facultad Tecnológica de la Universidad Francisco José de Caldas, de carácter científico-tecnológico con periodicidad trimestral, que se publica los meses de enero, abril, julio y octubre. Su primer número apareció en el segundo semestre del año 1997 y hasta la fecha ha mantenido su regularidad.

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

La revista *Tecnura* está dirigida a docentes, investigadores, estudiantes y profesionales interesados en la actualización permanente de sus conocimientos y el seguimiento de los procesos de investigación científico-tecnológica, en el campo de las ingenierías. Tiene como misión divulgar resultados de proyectos de investigación realizados en el área de las ingenierías, a través de la publicación de artículos originales e inéditos, realizados por académicos y profesionales pertenecientes a instituciones nacionales o extranjeras del orden público o privado. Los artículos presentados deben ser trabajos inéditos escritos en español o inglés; sin embargo, tendrán preferencia los artículos que muestren conceptos innovadores de gran interés, que traten sobre asuntos relacionados con el objetivo y cobertura temática de la revista.

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

Tecnura es una revista arbitrada mediante un proceso de revisión entre pares de doble ciego. La periodicidad de la conformación de sus comités Científico y Editorial está sujeta a la publicación de artículos en revistas indexadas internacionalmente por parte de sus respectivos miembros.

La Universidad Distrital Francisco José de Caldas, sus directivas, el Editor, el Comité Editorial y Científico no son responsables por la opinión y criterios expresados en el contenido de los artículos y estos se publican bajo la exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento del Comité Editorial.

Además de la versión impresa, la revista *Tecnura* tiene también una versión digital disponible en su página web: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>

2. TIPOS DE ARTÍCULOS ACEPTADOS

De acuerdo con la clasificación del Índice Nacional de Publicaciones Científicas y Tecnológicas (Publindex-Colciencias), la revista *Tecnura* recibe postulaciones de artículos inéditos de los siguientes tipos:

Artículos de investigación científica y tecnológica: documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos de investigación. La estructura generalmente utilizada contiene cuatro apartes importantes: introducción, metodología, resultados y conclusiones.

Artículos de reflexión: documento que presenta resultados de investigación desde una perspectiva analítica, interpretativa o crítica del autor, sobre un tema específico y recurriendo a fuentes originales.

Artículo de revisión: documento resultado de una investigación donde se analizan, sistematizan e integran los resultados de las investigaciones publicadas o no publicadas, sobre un campo en ciencia o tecnología, con el fin de dar cuenta de los avances y las tendencias de desarrollo. Se caracteriza por presentar una cuidadosa revisión bibliográfica de al menos 50 referencias.

3. FORMATO DEL ARTÍCULO

3.1 Del lenguaje y estilo apropiado para la redacción de artículos

Deben emplearse estructuras de oraciones simples, evitando las que sean demasiado largas o complejas.

El vocabulario empleado debe ser básico y común. Los términos técnicos deben explicarse brevemente; asimismo, el significado de las siglas debe presentarse la primera vez que estas aparecen en el texto.

Los autores son responsables de que su trabajo sea conducido de una manera profesional y ética.

3.2 De la extensión de los documentos

Los artículos no deben tener una extensión de más de 25 páginas en tamaño carta y a doble espacio, con márgenes simétricas de 3 cm. Solo en el caso de los artículos de revisión las 25 páginas no incluyen las referencias bibliográficas.

3.3 Del formato de presentación

Los artículos presentados deben ser trabajos inéditos escritos en español o inglés y deben digitarse en Microsoft Word (2003 en adelante), cumpliendo con las siguientes indicaciones:

Letra *Times New Roman* de 12 puntos (a excepción de que se requiera lo contrario para algunos apartados).

Una columna a doble espacio.

Todas las márgenes de 3 cm.

Los párrafos se justifican, y no debe haber espacio entre los consecutivos.

No incluir saltos de página o finales de sección.

Si se desea resaltar palabras o frases del texto, no usar letra negrita sino letra cursiva.

Los decimales se deben señalar con coma (,) y no con un punto.

Los millares y millones se deben señalar con un espacio fino.

Evitar las notas de pie de página.

Se debe utilizar nomenclatura arábica hasta el tercer nivel únicamente.

3.4 De la estructura del documento

Los trabajos deben tener la siguiente estructura y cumplir con los siguientes requisitos:

Composición de un artículo

Todos los artículos remitidos para su evaluación y posible publicación por parte de la revista *Tecnura* deben tener por lo menos los siguientes componentes:

- Título en español e inglés.
- Información de los autores.
- Resumen en español e inglés.
- Palabras clave en español e inglés.
- Introducción.
- Conclusiones.
- Trabajo futuro (opcional).
- Agradecimientos (opcional).
- Referencias bibliográficas.

Si el artículo es de investigación científica y tecnológica deben tener, además de lo anterior, los siguientes componentes:

- Metodología.
- Resultados.
- Financiamiento.

Título

El título del artículo deberá ser corto o dividido en título y subtítulo, atractivo para el lector potencial y escrito en mayúscula sostenida. Este debe aparecer centrado entre las márgenes, escrito con letra *Times New Roman*, en negrita, tamaño de fuente 18. El título del artículo debe ir en español e inglés separado por un espacio doble. Máximo 20 palabras.

Autores

Después del título debe escribirse el (los) nombre(s) completo(s) del (los) autor(es), acompañado de los datos biográficos básicos: título de pregrado, título de posgrado, ocupación o cargo, afiliación institucional (institución donde labora), dependencia, ciudad, país y correo electrónico. La información anterior debe ir inmediatamente debajo del nombre del autor.

Resumen

Debe establecer el objetivo y alcance del trabajo, una descripción clara y concisa de la metodología, los resultados y las conclusiones obtenidas. Máximo 250 palabras.

Palabras clave

Debe escogerse entre tres y diez palabras clave, escritas en español con letra *Times New Roman*, en negrita y cursiva.

Las palabras clave deben estar escritas en orden alfabético y ser de uso estandarizado, para lo cual se sugiere utilizar bases de datos internacionales según el área del conocimiento. Por ejemplo, en el área de Eléctrica y Electrónica se sugiere utilizar el tesoro de la UNESCO que se pueden encontrar en la página:<http://databases.unesco.org/thessp>.

Abstract

Debe ser una traducción correcta y precisa al idioma inglés del texto que aparece en el resumen en español.

Keywords

Debe ser una traducción correcta y precisa al idioma inglés de la lista de palabras clave en español.

Las *keywords* deben estar escritas en el orden de las palabras clave y ser de uso estandarizado, para lo cual se sugiere utilizar bases de datos internacionales según el área del conocimiento. Por ejemplo, en el área de Eléctrica y Electrónica se sugiere utilizar los Tesoros de la IEEE y/o World Bank que se pueden encontrar en las siguientes páginas respectivamente:http://www.ieee.org/documents/2009Taxonomy_v101.pdf, <http://multites.net/mtsql/wb/site/default.asp>

Introducción

Debe describir el planteamiento general del trabajo, así como contexto, antecedentes, estado de arte de la temática abordada, objetivo y posible alcance del trabajo.

Metodología

La redacción de este apartado debe permitir a cualquier profesional especializado en el tema replicar la investigación.

Resultados

Explicación e interpretación de los hallazgos. Si es necesario, se puede presentar una discusión breve y enfocada a la interpretación de los resultados.

Conclusiones

Implicación de los resultados y su relación con el objetivo propuesto.

Financiamiento

Mencionar la investigación asociada de la cual se derivó el artículo y la entidad que avaló y financió dicha investigación.

Agradecimientos

Preferiblemente deben ser breves y deben incluir los aportes esenciales para el desarrollo del trabajo.

Ecuaciones

Deben aparecer centradas con respecto al texto principal. Las ecuaciones deben ser referenciadas con números consecutivos (escritos entre paréntesis cerca al margen derecho). Las ecuaciones se citan en el texto principal empleando la palabra ecuación y seguida del número entre paréntesis. Las ecuaciones deben ser elaboradas en un editor de ecuaciones apropiado y compatible con el paquete de software InDesign, por ejemplo, el editor de ecuaciones de Windows.

Tablas

Para el caso de realización de tablas se recomienda que estas no sean insertadas como imágenes,

considerando que en este formato no pueden ser modificadas. El encabezado de cada tabla debe incluir la palabra Tabla (en negrita) seguida del número consecutivo correspondiente y de un breve nombre de la tabla. El encabezado debe estar escrito con letra Times New Roman, en cursiva y tamaño de fuente 9.

No se presentan cuadros sino tablas y estas se deben levantar automáticamente desde el procesador de textos. Las tablas deben ir nombradas y referenciadas en el artículo, en estricto orden. Toda tabla debe tener en su parte inferior la fuente de la que fue tomada, o mencionar que es autoría de los autores si es el caso.

Figuras

Todas las figuras o fotografías deben enviarse en formato PNG o TIFF con una resolución mínima de 300 DPI, adaptadas a escala de grises.

El pie o rótulo de cada figura debe incluir la palabra Figura (en negrita) seguida del número consecutivo correspondiente y de una breve descripción del contenido de la figura. El pie de figura debe estar escrito con letra *Times New Roman*, en cursiva y tamaño de fuente 9. Las figuras deben ir nombradas y referenciadas en el artículo, en estricto orden. Toda figura debe tener también la fuente de la que fue tomada, o mencionar que es autoría de los autores si es el caso.

Símbolos

Los símbolos de las constantes, variables y funciones en letras latinas o griegas –incluidos en las ecuaciones– deben ir en cursiva; los símbolos matemáticos y los números no van en cursiva. Se deben identificar los símbolos inmediatamente después de la ecuación. Se deben utilizar las unidades, dimensiones y símbolos del sistema internacional.

Cuando se empleen siglas o abreviaturas, se debe anotar primero la equivalencia completa, seguida de la sigla o abreviatura correspondiente entre paréntesis y en lo subsecuente se escribe solo la sigla o abreviatura respectiva.

Referencias bibliográficas

El estilo de citación de referencias adoptado por la revista **Tecnura** es APA sexta edición. Las citas, referencias bibliográficas e infografía se incluyen al final del artículo. Las referencias bibliográficas deben ordenarse alfabéticamente de acuerdo con el primer apellido del primer autor, sin numeración.

Solo deben aparecer las referencias que fueron citadas en el texto principal del trabajo, en las tablas o en las figuras. Es decir, en la lista no deben aparecer otras referencias aunque hayan sido consultadas por los autores para la preparación del trabajo. Sugerimos utilizar herramientas como: *Citas y bibliografía* de Microsoft Word (para APA sexta edición versión 2013 o superior), *Zotero*, *Mendeley*, entre otras.

El llamado de una referencia bibliográfica se inserta en el texto, en el punto pertinente, bajo ciertas características:

Si la oración incluye el apellido del autor, solo se debe escribir la fecha dentro de un paréntesis, ejemplo:

Cuando Vasco (2012), analizó el problema de presentado en

Cuando no se incluye el autor en la oración, debe ir entre el paréntesis el apellido y la fecha.

La investigación de materiales dio una visión en el área (Martínez, 2012).

Si el documento u obra tiene más de dos autores, se debe citar la primera vez con todos los apellidos.

1990. (Fernández Morales, Villa Krieg & Caro de Villa, 2008)

En las menciones siguientes, solo se debe escribir el primer apellido del autor, seguido de un "et al".

En cuanto al estudio de las aguas, Fernández Morales et al. (2008) encontraron que ...

Cuando el documento u obra tiene más de seis autores, se debe utilizar desde la primera mención el "et al".

A continuación se describen una serie de ejemplos de las referencias más utilizadas, según

el estilo de referencias adoptado por la revista *Tecnura*:

Publicaciones Periódicas:

Forma Básica

Apellidos, A. A., Apellidos, B. B. & Apellidos, C. C. (Fecha). Título del artículo. *Título de la publicación*, volumen (número), pp. xx-xx. doi: xx.xxxxxxx

Artículo básico

Guevara López, P., Valdez Martínez, J., Agudelo González, J., & Delgado Reyes, G. (2014). Aproximación numérica del modelo epidemiológico SI para la propagación de gusanos informáticos, simulación y análisis de su error. *Revista Tecnura*, 18(42), 12 -23. doi:<http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.4.a01>

Artículo web

Rodríguez Páez, S., Fajardo Jaimes, A., & Páez Rueda, C. (2014). Híbrido rat-race miniaturizado para la banda ISM 2,4 GHZ. *Revista Tecnura*, 18(42), 38-52. Recuperado de <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/article/view/8059/9675>

Libros:

Forma Básica

Apellidos, A. A. (Año). *Título*. Ciudad: Editorial.

Apellidos, A. A. (Año). *Título*. Recuperado de <http://www.xxxxxx.xxx>

Apellidos, A. A. (Año). *Título*. doi: xx.xxxxxxxx

Apellidos, A. A. (Ed.). (Año). *Título*. Ciudad: Editorial.

Libro con autor

Goleman, D. (2000). *La inteligencia emocional: Por qué es más importante que el cociente intelectual*. México: Ediciones B.

Libro con editor:

Castillo Ortiz, A. M. (Ed.). (2000). *Administración educativa: Técnicas, estrategias y prácticas gerenciales*. San Juan: Publicaciones Puertorriqueñas

Libro versión electrónica:

Montero, M. & Sonn, C. C. (Eds.). (2009). *Psychology of Liberation: Theory and applications*. [Versión de Springer]. doi: 10.1007/978-0-387-85784-8

Informe técnico:

Forma Básica

Apellidos, A. A. (Año). *Título*. (Informe Núm. xxx). Ciudad: Editorial

Informe con autores

Weaver, P. L., & Schwagerl, J. J. (2009). *U. S. Fish and Wildlife Service refuges and other nearby reserves in Southwestern Puerto Rico*. (General Technical Report IITF-40). San Juan: International Institute of Tropical Forestry.

Informe de una agencia del gobierno

Federal Interagency Forum on Child and Family Statistics. *America's Children: Key National Indicators of Well-Being, 2009*. Washington, DC: U.S. Government Printing Office. Recuperado de <http://www.childstats.gov/pubs/index.asp>

Tesis

Forma Básica

Apellidos, A. A. (Año). *Título*. (Tesis inédita de maestría o doctorado). Nombre de la institución, Localización.

Tesis inédita, impresa

Muñoz Castillo, L. (2004). *Determinación del conocimiento sobre inteligencia emocional que poseen los maestros y la importancia que le adscriben al concepto en el aprovechamiento de los estudiantes*. (Tesis inédita de maestría). Universidad Metropolitana, San Juan, PR.

Tesis de base de datos comercial

Santini Rivera, M. (1998). *The effects of various types of verbal feedback on the performance of selected motor development skills of adolescent males with Down syndrome*. (Tesis doctoral). Disponible

en la base de datos ProQuest Dissertations and Theses. (AAT 9832765).

Tesis web

Aquino Ríos, A. (2008). *Análisis en el desarrollo de los temas transversales en los currículos de español, matemáticas, ciencias y estudios sociales del Departamento de Educación*. (Tesis de maestría, Universidad Metropolitana). Recuperado de http://suagm.edu/umet/biblioteca/UMTESIS/Tesis_Educacion/ARAquinoRios1512.pdf

Estándares o patentes

Forma Básica

Apellidos, A. A. Título de la patente. País y número de la patente. Clasificación de la patente, fecha de concesión oficial. Número y fecha de solicitud de la patente, paginación.

Hernández Suárez, C. A., Gómez Saavedra, V. A., & Peña Lote, R. A. Equipo medidor de indicadores de calidad del servicio de energía eléctrica para usuario residencial. Colombia., 655. G4F 10/0, 15 de Marzo 2013. 27 de Octubre 2011, 147

4. ENVÍO DE ARTÍCULOS

Los autores deben enviar sus artículos a través de la aplicación para tal fin del Open Journal System en formato digital, adjuntando la carta de presentación y el formato de información artículo-autores.

4.1 Carta de presentación

El artículo debe ir acompañado de una carta de presentación dirigida al director y editor de la revista, Ing. Cesar Augusto García Ubaque, donde incluya:

Solicitud expresa de considerar su artículo para publicarlo en la revista Tecnura.

Título completo del trabajo.

Nombres completos de todos los autores del trabajo.

Certificación de la originalidad y el carácter inédito del trabajo.

Exclusividad de su remisión a la revista *Tecnura*.
Confirmación de la autoría con la firma de todos los autores.

Esta carta deberá estar firmada por todos los autores, escanearse y enviarse junto con los demás documentos solicitados.

4.2 Formato de información artículo-autores

El artículo además debe ir acompañado de un formato de información sobre el artículo y sus autores, el cual se puede descargar de la página web de la revista *Tecnura*: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>, en la sección "Formatos y Documentos". Es importante completar todos los campos de información solicitados, algunos de ellos tienen comentarios para aclarar mejor lo que se está solicitando. El formato no debe escanearse.

4.3 Artículo

Artículo en formato digital (Word 2003 en adelante) que cumpla con todas las normas de presentación descritas en el capítulo 3, "Formato del artículo", de la presente en las instrucciones a los autores.

5. PROCEDIMIENTO PARA LA PUBLICACIÓN

El procedimiento que sigue la revista *Tecnura* para la evaluación y posible publicación de los trabajos enviados por los autores es el siguiente en orden cronológico:

Envío del artículo acompañado de la carta de presentación y el formato de información por parte de los autores.

Notificación al autor de correspondencia de la recepción del artículo.

Verificación del tema del artículo con respecto a las áreas de interés de la revista.

Verificación de las normas de presentación por parte del monitor de la revista.

Notificación al autor de correspondencia de la evaluación de las normas de presentación.

Envío de las correcciones realizadas por los autores con respecto a la evaluación de las normas de presentación.

Envío del artículo a los árbitros seleccionados.

Notificación del inicio del proceso de arbitraje del artículo.

Notificación a los autores de la decisión tomada por el Comité Editorial y de las evaluaciones hechas por los árbitros.

Envío de las correcciones realizadas por los autores con respecto a las evaluaciones de los árbitros.

Estudio de la versión final del artículo y de las evaluaciones de los árbitros por parte del Comité Editorial.

Envío por parte de los autores de la carta de cesión de derechos al editor de la revista.

Envío de la versión con corrección de estilo y diagramada a los autores.

Verificación de errores y aprobación final de la versión con corrección de estilo y diagramada por parte de los autores.

Publicación del artículo en el número correspondiente de la revista *Tecnura*.

Notificación a los autores de la publicación del número de interés.

Envío de un ejemplar de la revista a cada autor del artículo publicado.

6. PROCESO DE ARBITRAJE DE ARTÍCULOS

Considerando la periodicidad trimestral de la revista, el Comité Editorial realiza cuatro convocatorias anuales para la recepción de artículos, aproximadamente en los meses de febrero, mayo, agosto y noviembre. Los artículos serán recibidos hasta la fecha máxima establecida en cada convocatoria.

Una vez recibidos los artículos el monitor de la revista realizará una primera evaluación de forma para verificar que cumplan con todos los elementos mencionados en esta guía de instrucciones a los autores. Luego de recibir nuevamente el artículo con las correcciones de forma solicitadas por el

monitor de la revista, este será sometido a evaluación por tres pares académicos (paulatinamente se espera incorporar un mayor número de pares externos que participen en el proceso).

Cada artículo remitido a la revista *Tecnura* es revisado por dos pares académicos externos a la institución de los autores, mediante un proceso de “revisión entre pares” (*Peer-review*) de doble-ciego, garantizando el anonimato de los autores y evaluadores; se considera confidencial todo trabajo recibido y así se le exige a sus evaluadores.

Las posibles conclusiones de los resultados de la evaluación por parte de los árbitros son únicamente tres: publicar el artículo sin modificaciones, publicar el artículo con modificaciones o no publicar el artículo.

Posteriormente, el Comité Editorial toma la decisión de publicar o no los artículos, con base en los resultados de las evaluaciones realizadas por los árbitros asignados. En caso de existir contradicciones en las evaluaciones con respecto a la publicación de un artículo, el Comité Editorial enviará el artículo a un tercer árbitro y se inclinará por las dos evaluaciones que tengan el mismo concepto respecto a la publicación del artículo.

En cada convocatoria el autor de correspondencia debe sugerir al menos cuatro posibles evaluadores externos a su institución laboral, los cuales deben ser especialistas en el tema específico del artículo remitido, tener al menos maestría y por lo menos dos deben ser internacionales. Los posibles evaluadores pueden pertenecer a una universidad o industria, pública o privada; de estos se debe proporcionar el nombre completo, su formación académica más alta, su afiliación institucional y su correo electrónico. Estos cuatro potenciales

evaluadores serán analizados por el Comité Editorial a fin de ampliar la base de datos de los árbitros de la revista *Tecnura*.

El Comité Editorial de la revista *Tecnura* se reserva los derechos de impresión, reproducción total o parcial del artículo, así como el de aceptarlo o rechazarlo. Igualmente, se reserva el derecho de hacer cualquier modificación editorial que estime conveniente; en tal caso el autor recibirá por escrito recomendaciones de los evaluadores. Si las acepta, deberá entregar el artículo con los ajustes sugeridos dentro de las fechas fijadas por la revista para garantizar su publicación dentro del número programado.

6. CONTACTO

Para cualquier solicitud de información adicional puede comunicarse a través del correo electrónico de la revista *Tecnura*: tecnura@udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com, o por mensajería con el Ing. Cesar Augusto García Ubaque, Director y Editor de la revista *Tecnura*, a la dirección:

Revista Tecnura
Sala de Revistas, Bloque 5, Oficina 305.
Facultad Tecnológica
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Transversal 70 B N. 73 a 35 sur
Teléfono: 571 – 3239300 Extensión: 5003
Celular: 57–3153614852
Bogotá D.C., Colombia
Email:
tecnura.ud@correo.udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com
Página web:
<https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>



INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

Tecnura journal District francisco José de caldas university Faculty of technology

CONTENT

Scope and editorial policy of the journal
Type of accepted articles
Article format
Article submission
Publication procedure
Article arbitration
Contact

SCOPE AND EDITORIAL POLICY OF THE JOURNAL

Tecnura journal is an institutional publication of the Faculty of Technology from University Francisco José de Caldas. It is a scientific and technological publication with quarterly periodicity, which is published in January, April, July and October. The first issue appeared in the second semester of 1997 and up to now it has maintained its regularity.

The areas of interest of *Tecnura journal* are focused on all engineering fields such as electronics, telecommunications, electricity, systems, industrial, mechanics, cadastral, civil, environmental, among others. However, it is not restricted to those; it also has room for education and health issues, as long as they are related to engineering. The journal will only publish concerning scientific and technological research, reflection and revision. In consequence, during the initial editorial evaluation, short articles and case reports will be rejected.

Tecnura Journal is addressed for professors, researchers, students and professionals interested in permanent update of their knowledge and follow-up of scientific-technologic processes in the field of engineering. *Tecnura Journal* has as mission

to disseminate results of research projects in the areas of engineering, through the publication of original and unpublished articles, conducted by academics and professionals accredited by public or private national or foreign institutions. Articles submitted to *Tecnura journal* must be unpublished works written in Spanish or English; nevertheless, preference will be given to articles that show innovative concepts of great interest, related to the objective and scope of the journal.

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

Tecnura is a journal arbitrated by a revision process among double blind peers. The schedule of the conformation of its scientific and editorial committee is subject to the publication of articles in internationally indexed journals by their members.

District University Francisco José de Caldas, its directors, the editor, the editorial and scientific committee are not responsible for the opinions and the criteria expressed in the content of the articles

and they are published under the exclusive responsibility of the authors and do not necessarily reflect the ideas of the editorial committee.

In addition to the printed version, *Tecnura* journal also has a digital version available in its web page: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/index>

TYPE OF ARTICLES ACCEPTED

According to the classification of the Scientific and Technological Publications National Index (Publindex-Colciencias), *Tecnura* journal receives nominations of unpublished articles on the following topics:

Scientific and technological research articles:

document that presents, in a detailed manner, the original results of research projects. The generally used structure contains four main parts: introduction, methodology, results and conclusions.

Reflection articles: document that presents research results from an analytic, interpretative or critic perspective from the author, dealing with a specific topic and adopting original sources.

Review article: document that results from a research where the results of published or unpublished research on a science or technology field are analyzed, systematized and integrated, in order to state the advances and tendencies in development. It is characterized for presenting a careful bibliographical review of at least 50 references.

ARTICLE FORMAT

About the appropriate language and style for articles writing

Authors must use simple sentence structures, avoiding those too long or complex.

The vocabulary used must be basic and common. Technical language must be briefly explained; also, the meaning of the acronyms must be given the first time they appear in the text.

The authors are responsible for their work to be conducted in a professional and ethic manner.

About the length of articles

The articles should not exceed 25 pages in letter size and double space, with symmetric margins of 3 cm. Only in the case of review articles, these 25 pages do not include references.

About the presentation format

Submitted articles must be unpublished works written in Spanish or English, and must be typed in Microsoft Word (2003 and beyond), complying with the following indications:

Times New Roman letter, 12 point (except it is required for some sections).

One column, double-spaced.

All the margins 3 cm.

Paragraphs should be justified without spaces between consecutives and without cutting words.

Do not include page breaks or section finals.

If you want to emphasize words or phrases from the text, do not use bold letters but italic.

Decimals should be pointed with comma (,) and not with period (.).

Thousands and millions should be pointed with a fine space.

Avoid footnotes.

Arabic nomenclature must be used only until the third level.

About the article structure

The papers must have the following structure and comply with the following requirements:

Composition of an article

All the articles submitted for evaluation and possible publication by the *Tecnura* Journal must have at least the following components:

Title in Spanish and English.

Information about the authors.

Abstract in Spanish and English.

Key words in Spanish and English.
Introduction.
Conclusions.
Future work (optional).
Acknowledgements (optional).
Bibliographical references.

If the article is related to scientific and technological research must have, in addition to the above, the following components:

Methodology.
Results.
Financing.

Title

The title of the article must be short or divided in title and subtitle, attractive for the potential reader and written in capital letters. It should appear centered between the margins, written in *Times New Roman* letter, in bold, font size 18. The title of the article has to be in Spanish and English separated by double space. Maximum 20 words.

Authors

After the title the complete name(s) of the author(s) must be written, with their basic biographical data: undergraduate degree, graduate degree, occupation or position, institutional affiliation (institution where they work), dependency, city, country and e-mail. The above information must be immediately below the author's name.

Abstract

The scope and purpose of the work must be established giving a clear and concise description of the methodology, results presented and the conclusions obtained. Maximum of 250 words.

Keywords

Between three and ten keywords must be chosen, written in English with *Times New Roman* letter in bold and italic.

Key words must be written in alphabetic order and must be as standard as possible, for which it is suggested the use of international databases according to the area of knowledge. For example, in the area of Electrics and Electronics it is suggested to use the IEEE thesaurus and World Bank thesaurus that can be accessed at the following web pages respectively:

http://www.ieee.org/documents/2009Taxonomy_v101.pdf

<http://multites.net/mtsql/wb/site/default.asp>

Abstract in Spanish

Translation to the Spanish language of the text that appears in the abstract, it must be correct and precise.

Keywords in Spanish

Translation to the English language of the keywords in Spanish, they must be correct and precise.

Keywords must be written in the order of the English version and must be as standard as possible, for which it is suggested the use of international databases according to the area of knowledge. For example, in the area of Electrics and Electronics it is suggested to use the UNESCO thesaurus that can be found at the following web pages:

<http://databases.unesco.org/thessp>

Introduction

The general idea of the work must be described, its context, backgrounds, state of the art of the topic, objectives and possible scope of the work.

Methodology

The writing of this part must allow any specialized professional in the topic to replicate the research.

Results

Explanation and interpretation of the findings. If necessary, a brief discussion focused on the interpretation of the results can be presented.

Conclusions

Implication of the results and their relation to the proposed objective.

Financing

Mention the associated research from which the article was derived and the entity that endorsed and financed the research.

Acknowledgments

They should preferably be brief and include the essential contributions for the development of the paper.

Equations

Equations must appear centered with respect to the main text. They must be referenced with consecutive numbers (written in parenthesis close to the right margin). Equations are cited in the main text employing the word equation, and followed by the number in parenthesis. Equations must be made in an appropriate equation editor and compatible with "InDesign" software, as for example the equation editor of Windows.

Tables

In the case of implementation of tables, it is recommended that these are not inserted as images, considering that in that format they cannot be modified. The title of each table must include the word table (in italic) followed by the corresponding consecutive number and a brief name of the table. The heading must be written in TNR letter, italic and font size 9.

Charts are not presented but tables and they should be automatically raised from the text processor. Tables should be named and referenced in the article, in strict order. Every table must have at the bottom the source from which it was taken, or to mention self-authorship if it is the case.

Figures

All the figures or pictures have to be sent in JPG or PNG format with a minimum resolution of 300 DPI, adapted to gray scale.

The footnote or name of each figure must include the word figure (in italic) followed by the corresponding consecutive number and a brief description of the content of the figure. The footnote of the figure must be written in *Times New Roman* letter, italic and font size 9. Figures must be named and referenced in the article, in strict order. Every figure must have at the bottom the source from which it was taken, or to mention self-authorship if it is the case.

Symbols

The symbols of the constants, variables and functions in Latin or Greek letters –included in the equations- must be in italic; the mathematical symbols and the numbers do not go in italic. The symbols must be identified immediately after the equation. Units, dimensions and symbols of the international system must be used

When using acronyms or abbreviations, the complete equivalence should be written first, followed by the corresponding acronym or abbreviation in parenthesis and from there it is only written the respective acronym or abbreviation.

Bibliographic references

The adopted reference citation style by *Tecnura* journal is APA sixth edition. The cites, bibliographic references and infography are included in the last part of the article. The bibliographic references must be alphabetically ordered according to the author's first surname, without numbering.

There should only appear the cited references in the main body of the work, in tables or in figures. It means, in the list there should not appear other references although they have been consulted by the authors for the work preparation. We suggest using tools such as: Cites and bibliography from Microsoft Word (for APA sixth edition version 2013 or superior), Zotero, Mendeley, among others.

The call for a bibliographic reference is inserted in the text, at the pertinent point, under certain characteristics:

If the sentence includes the author's surname, it should only be written the date into a parenthesis, for instance:

Cuando Vasco (2012), analizó el problema de presentado en

When the author is not included in the sentence, surname and date must be into a parenthesis.

La investigación de materiales dio una visión en el área (Martínez, 2012).

If the document or work has more than two authors, the first cite must include all the surnames.

1990. (Fernández Morales, Villa Krieg & Caro de Villa, 2008)

In the following mentions, it must only be written the author's first surname, followed by "et al."

En cuanto al estudio de las aguas, Fernández Morales et al. (2008) encontraron que ...

When the document or work has more than six authors, it must be used from the first mention "et al."

Next it is described a series of examples of the more used references, according to the reference style adopted by *Tecnura* journal:

Periodical Publications:

Basic Form

Surnames, A. A., Surnames, B. B. & Surnames, C. C. (Date). Article's title. *Title of the publication*, volume (number), pp. xx-xx. doi: xx.xxxxxx

Basic article

Guevara López, P., Valdez Martínez, J., Agudelo González, J., & Delgado Reyes, G. (2014). Aproximación numérica del modelo epidemiológico SI para la propagación de gusanos informáticos, simulación y análisis de su error. *Revista Tecnura*, 18(42), 12 -23. doi:http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.4.a01

Web article

Rodríguez Páez, S., Fajardo Jaimes, A., & Páez Rueda, C. (2014). Híbrido rat-race miniaturizado para la banda ISM 2,4 GHZ. *Revista Tecnura*, 18(42),

38-52. Recuperado de <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/article/view/8059/9675>

Books:

Basic Form

Surnames, A. A. (Year). *Title*. City: Editorial.

Surnames, A. A. (Year). *Title*. Recovered from <http://www.xxxxxx.xxx>

Surnames, A. A. (Year). *Title*. doi: xx.xxxxxxxx

Surnames, A. A. (Ed.). (Year). *Title*. City: Editorial.

Book with author

Goleman, D. (2000). *La inteligencia emocional: Por qué es más importante que el cociente intelectual*. México: Ediciones B.

Book with editor:

Castillo Ortiz, A. M. (Ed.). (2000). *Administración educativa: Técnicas, estrategias y prácticas gerenciales*. San Juan: Publicaciones Puertorriqueñas

Book electronic version:

Montero, M. & Sonn, C. C. (Eds.). (2009). *Psychology of Liberation: Theory and applications*. [Versión de Springer]. doi: 10.1007/ 978-0-387-85784-8

Technical report:

Basic Form

Surnames, A. A. (Year). *Title*. (Report No. xxx). City: Editorial

Report with authors

Weaver, P. L., & Schwagerl, J. J. (2009). *U. S. Fish and Wildlife Service refuges and other nearby reserves in Southwestern Puerto Rico*. (General Technical Report IITF-40). San Juan: International Institute of Tropical Forestry.

Report from a Government agency

Federal Interagency Forum on Child and Family Statistics. *America's Children: Key National Indicators of Well-Being, 2009*. Washington, DC: U.S. Government Printing Office. Recuperado de <http://www.childstats.gov/pubs/index.asp>

Thesis

Basic form

Surnames, A. A. (Year). Title. (Unpublished master or doctorate thesis). Institution name, Location.

Unpublished thesis, printed

Muñoz Castillo, L. (2004). *Determinación del conocimiento sobre inteligencia emocional que poseen los maestros y la importancia que le adscriben al concepto en el aprovechamiento de los estudiantes*. (Tesis inédita de maestría). Universidad Metropolitana, San Juan, PR.

Commercial database thesis

Santini Rivera, M. (1998). *The effects of various types of verbal feedback on the performance of selected motor development skills of adolescent males with Down syndrome*. (Tesis doctoral). Disponible en la base de datos ProQuest Dissertations and Theses. (AAT 9832765).

Web thesis

Aquino Ríos, A. (2008). *Análisis en el desarrollo de los temas transversales en los currículos de español, matemáticas, ciencias y estudios sociales del Departamento de Educación*. (Tesis de maestría, Universidad Metropolitana). Recuperado de http://suagm.edu/umet/biblioteca/UMTESIS/Tesis_Educacion/ARAquinoRios1512.pdf

Standards or patents

Basic form

Surnames, A. A. Title of the patent. Country and number of the patente. Classification of the patent, date of official license. Number and date of patent request, pagination.

Hernández Suárez, C. A., Gómez Saavedra, V. A., & Peña Lote, R. A. Equipo medidor de indicadores de calidad del servicio de energía eléctrica para usuario residencial. Colombia., 655. G4F 10/0, 15 de Marzo 2013. 27 de Octubre 2011, 147

ARTICLE SUBMISSION

Authors must submit their articles through the application Open Journal System in digital format, attaching the cover letter and the article-authors format.

Cover letter

The article must be submitted with a cover letter addressed to the director and editor of the journal, Engineer Cesar Augusto Garcia Ubaque, including:

Specific request to consider your article to be published in Tecnura journal.

Full title of the article.

Full names of all the authors of the paper.

Certification of the originality and unpublished character of the paper.

Exclusivity of submission to Tecnura journal.

Authoring confirmation with signature of all the authors.

This letter must be signed by all the authors, scanned and sent with the remaining requested documents.

Article-authors information format

The article has to be submitted with an information format about the article and its authors which can be downloaded from the web page of Tecnura journal <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/index>, in the section "Forms and Documents". It is important to complete all the fields of information requested, some of them have comments to clarify better what is being requested. The format must not be scanned.

Article

Article in digital format (Word 2003 and later editions) that complies with all the presentation rules described in chapter three, "Article structure", of this guide of instructions for authors.

PUBLICATION PROCEDURE

The procedure to be followed by Tecnura journal for the evaluation and possible publication of the papers sent by the authors is the following in chronological order:

- Delivery of the article with the cover letter and the information format by the authors.
- Notification to the author about the reception of the article.
- Verification of the presentation rules by the monitor of the journal.
- Notification to the author about the evaluation of the presentation rules.
- Submission of corrections made by the authors related to the evaluation of presentation rules.
- Submission of the articles to the selected arbitrators.
- Notification of the beginning of the arbitration process of the article.
- Notification to the authors about the decision made by the editorial committee, and about the evaluations made by the arbitrators.
- Delivery of the corrections made by the authors with respect to the evaluations made by the arbitrators.
- Study of the final version of the article and the evaluations of the arbitrators by the editorial committee.
- Delivery by the authors of the letter that surrenders right to the editor of the journal.
- Submission of the version with style corrections and diagrammed to the authors.
- Verification of errors and final approval of the version with style corrections and diagrammed by the authors.
- Publication of the article in the corresponding number of Tecnura journal.
- Notification to the authors of the number of interest.
- Delivery of a copy of the journal to each one of the authors of the published article.

ARTICLE ARBITRATION PROCESS

Considering the quarterly periodicity of the journal, the Editorial Committee makes four calls every year for the submission of articles, approximately in the months of February, May, August and November. The articles will be received until the date established in the call.

Once received the articles, the monitor of the journal will make an initial form evaluation to verify the completion of the elements mentioned in this guide of instructions to authors. After receiving again the article with the requested corrections by the journal's monitor, the paper will be submitted to evaluation by three academic peers (through time it is expected to include more external peers to participate in the process).

Each article sent to Tecnura journal is checked by two expert academic peers external to the institution of the authors, by a process of "Peer-review" of double blind, guaranteeing the anonymity of authors and evaluators; every paper sent is considered confidential and so it is demanded to evaluators.

Possible conclusions of the result of the evaluation by the judges are only three: publish the article without modifications, publish the article with modifications and not publish the article.

Subsequently, the Editorial Committee takes the decision to publish or not the articles, based on the results of the evaluations made by the assigned arbitrators. In case of contradictions in the evaluations with respect to the publication of an article, the editorial committee will send the article to a third peer and will be inclined for the two evaluations that have the same concept with respect to the publication of the article.

In each call the main author must suggest at least four possible external arbitrators to his work institution evaluators, who must be specialists in the specific topic of the article sent and must have at least Masters level, and at least two must be international. Potential evaluators can belong to a university or industry, public or private; their

complete names must be provided, highest academic formation, institutional affiliation and e-mail. The editorial committee will analyze these four potential evaluators in order to enrich the database of arbitrators of *Tecnura* journal.

The Editorial Committee of *Tecnura* journal reserves the right to print, reproduce total or partially the article, as the right to accept or reject it. In the same way, it has the right to make any editorial modification that considers necessary; in this case the author will receive written recommendations from the evaluators. If accepted, authors must deliver the article with the suggested adjustments within the dates given by the journal to guarantee its publication in the programmed number.

CONTACT

For any additional information request, please send an e-mail to *Tecnura* journal tecnura@udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com or by mail to Cesar Augusto Garcia Ubaque, Director and Publisher of *Tecnura* Journal, to the following address:

Tecnura Journal
Journals Room, Block 5, Office 305.
Faculty of Technology
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Transversal 70 B N. 73 a 35 sur
Phone: 571-3239300 Extension: 5003
Mobile: 57-3153614852
Bogotá D.C., Colombia
Email:
tecnura.ud@correo.udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com
Web page:
<https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/index>