

EDITORIAL

CÉSAR AUGUSTO GARCÍA UBAQUE
DIRECTOR

INVESTIGACIÓN

Cognición imitativa para un robot mediante una comunidad de replicadores neuro-meméticos

Imitative cognition for a robot through a community of neuro-memetic replicators (CNMR)

DANTE GIOVANNI STERPIN BUITRAGO

Cinemática inversa de robot serial utilizando algoritmo genético basado en MCDS

Inverse kinematics of a serial robot using SDKM- based genetic algorithm

JUAN JAIRO VACA GONZÁLEZ, CRISTHIAN ANDRÉS PEÑA CARO, HAROLD VACCA GONZÁLEZ

PCA/DFT como herramienta de pronóstico para series temporales de absorbancia registradas mediante captosres UV-Vis en sistemas de saneamiento urbano

PCA/DFT as forecasting tools for absorbance time series received by UV-Vis probes in urban sewer systems

LEONARDO PLAZAS-NOSSA, ANDRÉS TORRES

Viabilidad de uso del polvo de vidrio como fundente en la elaboración de baldosas de gres porcelánico

Feasibility of using glass powder as flux in porcelain stoneware tile manufacturing

SILVIO DELVASTO ARJONA, ÁLVARO GUZMÁN APONTE, JOHN ALEXANDER TORRES LEÓN, MARTHA LORENA CEDAÑO VENTÉ, DAVID FELIPE ACOSTA GUARÍN

Data driven fault detection and isolation: a wind turbine scenario

Detección y aislamiento de fallas guiadas por datos: escenario turbina de viento

RUBÉN FRANCISCO MANRIQUE PIRAMANRIQUE, JORGE SOFRONY ESMERAL

Análisis estocástico de señales vibratorias de motores de inducción para la detección de fallas usando descomposición de modo empírico

Vibration signals stochastic analysis of induction motors for fault detection using empirical mode decomposition

ALEJANDRO RIVERA ROLDÁN, MIGUEL ALBERTO BECERRA BOTERO, JAIME ALBERTO GUZMÁN LUNA

Optimization of a vehicular routing using simple genetic chu-beasley algorithm

Optimización de un ruteo vehicular usando algoritmo genético simple chu-beasley

GUILLERMO ROBERTO SOLARTE MARTÍNEZ, ANDRÉS GASPAS CASTILLO SANZ, GUILLERMO RODRÍGUEZ GAHONA

Extracción de reglas de clasificación sobre repositorio de incidentes de seguridad informática mediante programación genética

Extracting classification rules from an informatic security incidents repository by genetic programming

CARLOS JAVIER CARVAJAL MONTEALEGRE

Metamodels composition strategy for the model driven engineering context

Estrategia de composición de metamodelos para el contexto de ingeniería basada en modelos

HÉCTOR ARTURO FLÓREZ FERNÁNDEZ

Productividad en una celda de manufactura flexible simulada en promodel utilizando path networks type crane

Productivity in a flexible manufacturing cell simulated in promodel using path networks type crane

MARÍA ELENA BERNAL LOAIZA, GERMAN COCK SARMIENTO, JORGE HERNÁN RESTREPO CORREA

REVISIÓN

Theoretic similitude of the aerobic biological growth kinetics for the stabilization of organic matter in wastewaters treatment

Similitud teórica de la cinética de crecimiento biológico aeróbico para la estabilización de materia orgánica en el tratamiento de aguas residuales

JUAN PABLO RODRÍGUEZ MIRANDA, CESAR AUGUSTO GARCÍA UBAQUE, MARÍA CAMILA GARCÍA VACA

Los residuos de la construcción y demolición en la ciudad de Cali: un análisis hacia su gestión, manejo y aprovechamiento

Construction and demolition wastes: analysis of its management and reuse in Cali

RAFAEL ANDRES ROBAYO SALAZAR, PEDRO ENRIQUE MATTEY CENTENO, YIMMY FERNANDO SILVA URREGO, DIANA MARCELA BURGOS GALINDO, SILVIO DELVASTO ARJONA

Obtención de modelos de carga compuestos en sistemas de potencia para análisis dinámico: revisión y aplicación

Composite load models in power systems for dynamical analysis: review and application

SANDRA MILENA PÉREZ LONDOÑO, LUIS FERNANDO RODRÍGUEZ GARCÍA, JUAN JOSÉ MORA FLÓREZ

ESTUDIO DE CASO

Formulations to overcome the divergence of iterative method of fixed-point in nonlinear equations solution

Formulaciones para superar la divergencia del método de iteración de punto fijo en la solución de ecuaciones no lineales

WILSON RODRÍGUEZ CALDERÓN, MYRIAM ROCÍO PALLARES-MUÑOZ

REFLEXIÓN

La ética en la formación del ingeniero de minas: representaciones sociales de actores educativos

Ethics in the formation of the mining engineer: social representations of educational actors

RAIMUNDO ALONSO PÉREZ GÓMEZ, AUDIN ALOISO GAMBOA SUÁREZ, CÉSAR AUGUSTO HERNÁNDEZ SUÁREZ

Instrucciones para los autores 263

Instructions for authors 271

Suscripción 279

Sign Up 280

Tecnura

ISSN 0123-921X
Vol. 19 No. 44
abril-junio 2015

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad Tecnológica



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Revista Tecnura • Vol. 19 No. 44 • abril-junio 2015
p-ISSN: 0123-921X • e-ISSN: 2248-7638 • Bogotá D.C. Colombia

Tecnura

Tecnología y cultura, afirmando el conocimiento

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad Tecnológica

Cognición imitativa para un robot mediante una comunidad de replicadores neuro-meméticos

PCA/DFT como herramienta de pronóstico para series temporales de absorbancia registradas mediante captosres UV-VIS en sistemas de saneamiento urbano

Data driven fault detection and isolation: a wind turbine scenario

Obtención de modelos de carga compuestos en sistemas de potencia para análisis dinámico: revisión y aplicación

ISSN 0123-921X
9 770123 921001

Tecnura

Tecnología y cultura, afirmando el conocimiento

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad Tecnológica

Vol. 19 No. 44
abril-junio 2015
p-ISSN: 0123-921X
e-ISSN: 2248-7638



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

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

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

EDITOR

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

COMITÉ EDITORIAL

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

COMITÉ CIENTÍFICO

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

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

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

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

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

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

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

EVALUADORES

Ph.D. Andres Tovar
University of Indianapolis, Estados Unidos

Ph.D. Asdrubal Lopez Chau
Universidad Autónoma del Estado de México, México

Ph.D. Carlos Mario Piscal Arevalo
Universidad de la Salle, Colombia

Ph.D. Francisco Santamaría Piedrahita
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Ph.D. Jorge Enrique Rodríguez Páez
Universidad del Cauca, Colombia

Ph.D. Luini Leonardo Hurtado Cortés
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Ph.D. Luis Gerardo Gonzalez Morales
Universidad de los Andes, Venezuela

Ph.D. Orlando Valencia Rodríguez
Universidad Autónoma de Manizales, Colombia

Ph.D. Oscar Jaime Restrepo Baena
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Ph.D. Saulo de Jesús Torres Rengifo
Universidad Tecnológica De Pereira, Colombia

Ph.D. Tomas Izquierdo Rus
Universidad de Murcia, España

Ph.D. Vicente Amigó Borrás
Universidad Politécnica de Valencia, España

M.Sc. Diego Fernando Ordoñez Rosero
Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia

M.Sc. Gilberto Pedraza García
Universidad de los Andes, Colombia

M.Sc. Jaime Antero Arago Marín
Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales,
Colombia

M.Sc. Luis Octavio González Salcedo
Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Colombia

M.Sc. Santiago Sandoval Arenas
National Institute for Applied Sciences, Lyon, Francia

ASISTENTES DE LA REVISTA TECNURA

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

COORDINACIÓN EDITORIAL

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

Tecnura

Vol. 19 No. 44
abril-junio 2015

REVISTA *TECNURA*

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

PERIODICIDAD

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

COBERTURA TEMÁTICA

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

MISIÓN

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

PÚBLICO OBJETIVO

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

INDEXACIÓN

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

FORMA DE ADQUISICIÓN

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

SUSCRIPCIÓN

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

REPRODUCCIÓN

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

DIRECCIÓN POSTAL

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

DISEÑO ORIGINAL

Julián Hernández - Taller de Diseño

CORRECCIÓN DE ESTILO PARA ESPAÑOL

Hernando García Bustos

CORRECCIÓN DE ESTILO PARA INGLES

Francisco Suárez Díaz

DIAGRAMACIÓN ELECTRÓNICA Y DISEÑO DE CUBIERTA

Julián Hernández - Taller de Diseño

IMPRESIÓN

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



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

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

EDITOR

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

EDITORIAL COMMITTEE

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

SCIENTIFIC COMMITTEE

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

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

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

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

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

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

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

EVALUATORS

Ph.D. Andres Tovar
University of Indianapolis, Estados Unidos

Ph.D. Asdrubal Lopez Chau
Universidad Autónoma del Estado de México, México

Ph.D. Carlos Mario Piscal Arevalo
Universidad de la Salle, Colombia

Ph.D. Francisco Santamaría Piedrahita
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Ph.D. Jorge Enrique Rodríguez Páez
Universidad del Cauca, Colombia

Ph.D. Luini Leonardo Hurtado Cortés
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Ph.D. Luis Gerardo Gonzalez Morales
Universidad de los Andes, Venezuela

Ph.D. Orlando Valencia Rodríguez
Universidad Autónoma de Manizales, Colombia

Ph.D. Oscar Jaime Restrepo Baena
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Ph.D. Saulo de Jesús Torres Rengifo
Universidad Tecnológica De Pereira, Colombia

Ph.D. Tomas Izquierdo Rus
Universidad de Murcia, España

Ph.D. Vicente Amigó Borrás
Universidad Politécnica de Valencia, España

M.Sc. Diego Fernando Ordoñez Rosero
Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia

M.Sc. Gilberto Pedraza García
Universidad de los Andes, Colombia

M.Sc. Jaime Antero Arago Marín
Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales,
Colombia

M.Sc. Luis Octavio González Salcedo
Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Colombia

M.Sc. Santiago Sandoval Arenas
National Institute for Applied Sciences, Lyon, Francia

TECNURA JOURNAL ASSISTANTS

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

EDITORIAL COORDINATION

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

Tecnura

Vol 19 No. 44

April-June 2015

TECNURA JOURNAL

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

PERIODICITY

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

THEMATIC COVERAGE

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

MISSION

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

TARGET AUDIENCE

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

INDEXING

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

FORM OF ACQUISITION

Tecnura journal is available through purchase, exchange or subscription.

SIGN UP

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

REPRODUCTION

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

POSTAL ADDRESS

Send to Engr. Cesar Augusto García Ubaque, Ph.D.
Director and Editor Revista Tecnura
Sala de Revistas, Bloque 5, Oficina 305.
Faculty of Technology
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Transversal 70B No. 73A - 35 sur
Telephone Number: 571 - 3238400, extension: 5003
Cell phone Number: 57 - 3153614852
Bogotá D.C., Colombia

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

Tecnura on internet:
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>

ORIGINAL DESIGN

Julián Hernández - Taller de Diseño

STYLE CORRECTION IN SPANISH

Hernando García Bustos

STYLE CORRECTION IN ENGLISH

Francisco Suárez Díaz ELECTRONIC

LAYOUT AND TITLE PAGE DISEGN

Julián Hernández - Taller de Diseño

PRINTED BY

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

DECLARACIÓN DE ÉTICA Y BUENAS PRÁCTICAS

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

Obligaciones y responsabilidades generales del equipo editorial

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

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

Relaciones con los lectores

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

Relaciones con los autores

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

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

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

Relaciones con los evaluadores

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

Proceso de evaluación por pares

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

Reclamaciones

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

Fomento de la integridad académica

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

Protección de datos individuales

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

Seguimiento de malas prácticas

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

Integridad y rigor académico

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

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

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

Relaciones con los propietarios y editores de revistas

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

Conflicto de intereses

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

Quejas/denuncias

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

CODE OF ETHICS AND GOOD PRACTICE

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

General duties and responsibilities of the editorial board

As most responsible for the journal, *Tecnura* committee and the editorial board are committed to:
Joining efforts to meet the readers and authors' needs.

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

Relations with readers

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

Relations with authors

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

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

Relations with evaluators

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

Peer review process

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

Claims

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

Promoting Academic Integrity

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

Protection of individual data

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

Tracking malpractice

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

CÉSAR AUGUSTO GARCÍA UBAQUE
DIRECTOR

13

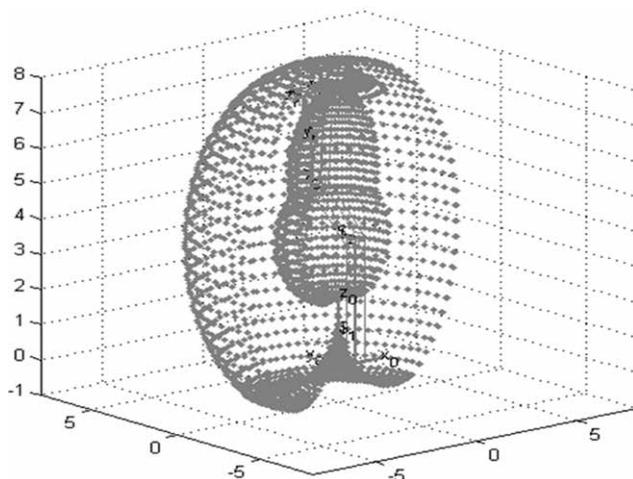
INVESTIGACIÓN

Cognición imitativa para un robot mediante una comunidad de replicadores neuro-meméticos

Imitative cognition for a robot through a community of neuro-memetic replicators (CNMR)

15

DANTE GIOVANNI STERPIN BUITRAGO



Cinemática inversa de robot serial utilizando algoritmo genético basado en MCDS

Inverse kinematics of a serial robot using SDKM- based genetic algorithm

33

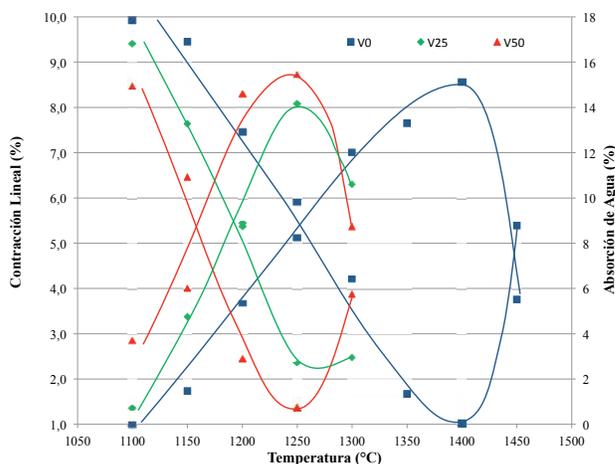
JUAN JAIRO VACA GONZÁLEZ, CRISTHIAN ANDRÉS PEÑA CARO, HAROLD VACCA GONZÁLEZ

PCA/DFT como herramienta de pronóstico para series temporales de absorbancia registradas mediante captadores UV-Vis en sistemas de saneamiento urbano

47

PCA/DFT as forecasting tools for absorbance time series received by UV-Vis probes in urban sewer systems

LEONARDO PLAZAS-NOSSA, ANDRÉS TORRES

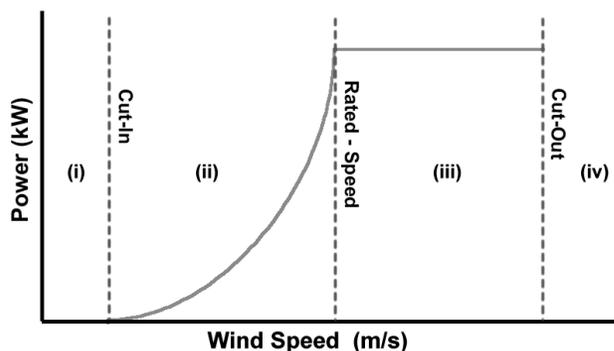


Viabilidad de uso del polvo de vidrio como fundente en la elaboración de baldosas de gres porcelánico

59

Feasibility of using glass powder as flux in porcelain stoneware tile manufacturing

SILVIO DELVASTO ARJONA, ÁLVARO GUZMÁN APONTE, JOHN ALEXANDER TORRES LEÓN, MARTHA LORENA CEDEÑO VENTÉ, DAVID FELIPE ACOSTA GUARÍN



Data driven fault detection and isolation: a wind turbine scenario

71

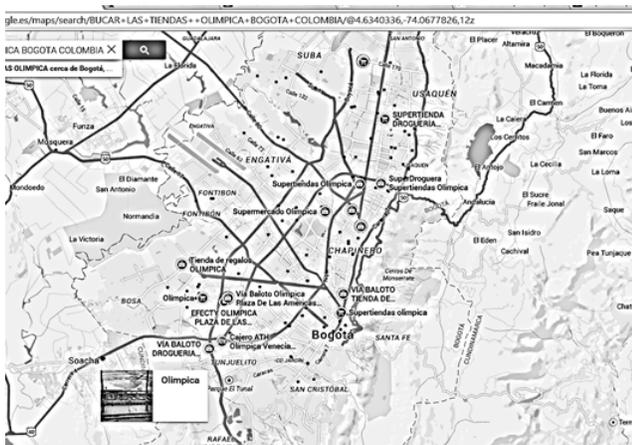
Detección y aislamiento de fallas guiadas por datos: escenario turbina de viento

RUBÉN FRANCISCO MANRIQUE PIRAMANRIQUE, JORGE SOFRONY ESMERAL

Análisis estocástico de señales vibratorias de motores de inducción para la detección de fallas usando descomposición de modo empírico
Vibration signals stochastic analysis of induction motors for fault detection using empirical mode decomposition

ALEJANDRO RIVERA ROLDÁN, MIGUEL ALBERTO BECERRA BOTERO, JAIME ALBERTO GUZMÁN LUNA

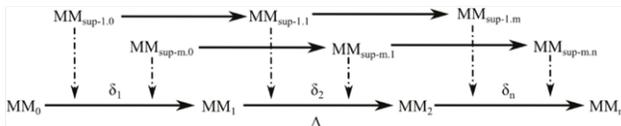
83



Optimization of a vehicular routing using simple genetic chu-beasley algorithm
Optimización de un ruteo vehicular usando algoritmo genético simple chu-beasley

GUILLERMO ROBERTO SOLARTE MARTÍNEZ, ANDRÉS GASPAR CASTILLO SANZ, GUILLERMO RODRÍGUEZ GAHONA

93

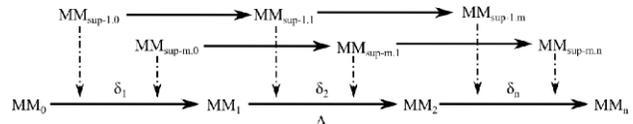


Extracción de reglas de clasificación sobre repositorio de incidentes de seguridad informática mediante programación genética

Extracting classification rules from an informatic security incidents repository by genetic programming

CARLOS JAVIER CARVAJAL MONTEALEGRE

109

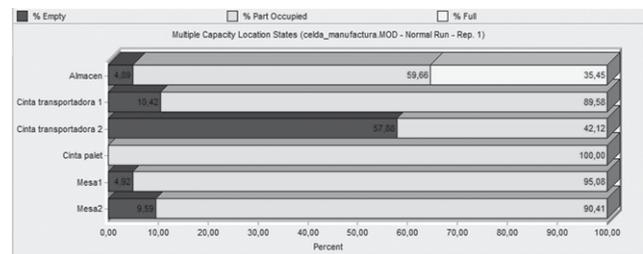


Metamodels composition strategy for the model driven engineering context

Estrategia de composición de metamodelos para el contexto de ingeniería basada en modelos

HÉCTOR ARTURO FLÓREZ FERNÁNDEZ

121



Productividad en una celda de manufactura flexible simulada en promodel utilizando path networks type crane

Productivity in a flexible manufacturing cell simulated in promodel using path networks type crane

MARÍA ELENA BERNAL LOAIZA, GERMAN COCK SARMIENTO, JORGE HERNÁN RESTREPO CORREA

133

REVISIÓN

Theoretic similitude of the aerobic biological growth kinetics for the stabilization of organic matter in wastewaters treatment

Similitud teórica de la cinética de crecimiento biológico aeróbico para la estabilización de materia orgánica en el tratamiento de aguas residuales

JUAN PABLO RODRÍGUEZ MIRANDA, CESAR AUGUSTO GARCÍA UBAQUE, MARÍA CAMILA GARCÍA VACA

145

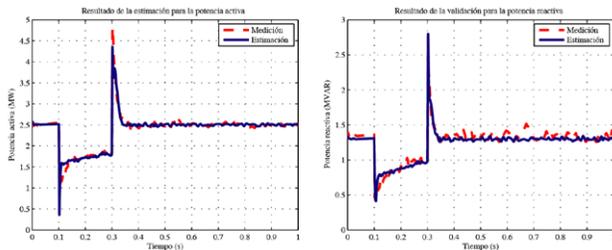


Los residuos de la construcción y demolición en la ciudad de Cali: un análisis hacia su gestión, manejo y aprovechamiento

157

Construction and demolition wastes: analysis of its management and reuse in Cali

RAFAEL ANDRÉS ROBAYO SALAZAR, PEDRO ENRIQUE MATTEY CENTENO, YIMMY FERNANDO SILVA URREGO, DIANA MARCELA BURGOS GALINDO, SILVIO DELVASTO ARJONA



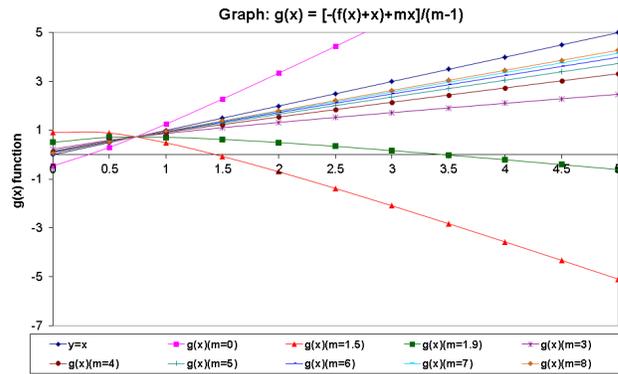
Obtención de modelos de carga compuestos en sistemas de potencia para análisis dinámico: revisión y aplicación

171

Composite load models in power systems for dynamical analysis: review and application

SANDRA MILENA PÉREZ LONDOÑO, LUIS FERNANDO RODRÍGUEZ GARCÍA, JUAN JOSÉ MORA FLÓREZ

ESTUDIO DE CASO



Formulations to overcome the divergence of iterative method of fixed-point in nonlinear equations solution

191

Formulaciones para superar la divergencia del método de iteración de punto fijo en la solución de ecuaciones no lineales

WILSON RODRÍGUEZ CALDERÓN, MYRIAM ROCÍO PALLARES-MUÑOZ

REFLEXIÓN

La ética en la formación del ingeniero de minas: representaciones sociales de actores educativos

201

Ethics in the formation of the mining engineer: social representations of educational actors

RAIMUNDO ALONSO PÉREZ GÓMEZ, AUDIN ALOISO GAMBOA SUÁREZ, CÉSAR AUGUSTO HERNÁNDEZ SUÁREZ

Instrucciones para los autores 209

Instructions for authors 217

Suscripción 225

Sign Up 226

Aunque en Colombia existen revistas científicas desde hace varias décadas, la conformación del sistema de indexación en el país se dio hasta el año 2002 con la expedición del decreto 1279 por parte del Ministerio de Educación Nacional, que delegó en COLCIENCIAS la responsabilidad de indexar las publicaciones especializadas de Ciencia, Tecnología e Innovación CTel en cuatro (4) categorías C, B, A2 y A1. Este hecho dio lugar a la creación del Sistema Nacional de Indexación de Publicaciones Seriadadas de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia, conformado por:

La Base Bibliográfica Nacional–BBN Publindex: o repositorio de información de las revistas científicas del país. Provee fichas bibliográficas para cada uno de los documentos que contiene descriptores temáticos, autores, fechas de publicación, títulos de los artículos y resúmenes. Además, permite la consulta del texto completo y busca hacer visible, útil y apropiable la producción científica.

El Servicio de Indexación de Publicaciones Seriadadas de CTel Nacionales: que mide con criterios científicos editoriales, factores de estabilidad y visibilidad, y calidad de cada una de las revistas científicas nacionales con las que se conforma el Índice Bibliográfico Nacional – IBN Publindex. Asimismo, el sistema cuenta con criterios de permanencia de las revistas que lo constituyen. La noción de indexación de las revistas nacionales está asociada a su clasificación dentro del IBN Publindex.

El Servicio de Homologación de Publicaciones Seriadadas de CTel Extranjeras: que establece el conjunto de revistas científicas extranjeras homologadas a las categorías nacionales, a partir de los niveles de visibilidad e impacto de las publicaciones integradas en los sistemas de indexación y resumen – SIR reconocidos por Colciencias (Documento de sistemas de indexación y resumen utilizados para los procesos de indexación y homologación de publicaciones de ciencia, tecnología e innovación 2012).

La Base Bibliográfica Nacional – BBN Publindex, el Servicio de Indexación de Publicaciones Seriadadas de CTel Nacionales y el Servicio de Homologación de Publicaciones Seriadadas de CTel Extranjeras han venido funcionando desde su creación hasta hoy con base en criterios de excelencia científica, calidad editorial, estabilidad y visibilidad.

Esto ha significado que las revistas nacionales que aspiren a ser incluidas en la base bibliográfica nacional y clasificadas en las categorías que establece el decreto 1295 de 2002, deben contar con una estructura administrativa conformada por un editor y un comité editorial que sean visibles. Deben contar además con un comité científico y un grupo de árbitros, quienes emiten juicios calificados que certifican la calidad científica de la publicación. Por otra parte, los procesos de evaluación de los trabajos que son sometidos para su publicación y el tiempo que toma para decidir sobre su aceptación deben presentarse en las orientaciones dirigidas a los autores. Las revistas también deben mantener y cumplir de manera estricta su periodicidad declarada a lo largo de la ventana de observación y finalmente, deben aparecer registradas en diferentes bases e índices bibliográficos a nivel internacional.

Según COLCIENCIAS, para el año 2002 el índice bibliográfico contaba con 91 revistas de las cuales solamente 1 en categoría A1, 9 en categoría A2, 7 en Categoría B y 74 en categoría C. En la última actualización de 2014, el IBN ya contaba con 542 revistas de las cuales 28 aparecen en categoría A1, 138 en categoría A2, 131 en categoría B y 245 en categoría C, lo que representa un crecimiento de casi seis (6) veces a lo largo de los doce años que han transcurrido desde su inicio.

COLCIENCIAS reporta que al interior del IBN Publindex las temáticas de las publicaciones, distribuidas por las áreas del conocimiento que establece la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), se encuentran distribuidas de la siguiente manera: El 40.9% de las publicaciones corresponden a ciencias sociales, el 15.67% a ciencias médicas y de la salud, el 13.52% a humanidades, el

10.73% a ingeniería y tecnología, el 8.80% a ciencias naturales y exactas, el 4.51% a ciencias agrícolas y el restante 5.87% a revistas de carácter multidisciplinar.

De acuerdo con COLCIENCIAS, a pesar del crecimiento importante de la producción científica nacional, también se evidencia que la mayoría de las publicaciones integradas en el IBN Publindex presentan baja visibilidad e impacto en la comunidad internacional por ser casi en su totalidad de carácter endogámico. Esto se observa en el bajo porcentaje de revistas nacionales integradas en índices de citación que miden el factor de impacto. En la actualidad, solamente cerca del 5.0% (27 revistas) cuentan con algún indicador de factor de impacto y el 45.2% (245) que están en categoría C son de carácter endogámico.

El factor de impacto es un indicador cuantitativo que permite categorizar y comparar las publicaciones científicas en cada una de las disciplinas, de acuerdo con el número de citas recibidas por la revista en un determinado periodo de tiempo. El factor de impacto es calculado por índices de citación como el *Journal Citation Report JCR* de Thomson Reuter, el *Scimago Journal Ranking SJR*, de Elsevier Scopus, el *Scielo Citation Index SCI*, de Scielo Latinoamérica entre otros. Se expresa como la relación entre el número de citas recibidas y el número de artículos publicados dentro de un periodo de tiempo que puede ser para 1, 2 3 o 5 años inclusive. Los resultados de esta relación para cada grupo de revistas por especialidad se dividen en cuatro conjuntos (cuartiles), ordenados de mayor a menor para determinar la posición relativa de cada revista frente a las otras de su misma especialidad.

La discusión sobre la relevancia de las revistas científicas nacionales ha llevado a PUBLINDEX a considerar seriamente la inclusión del Factor de Impacto como el factor principal de clasificación de las revistas científicas nacionales. Dentro de los diferentes escenarios en discusión, se han planteado alternativas que van desde establecer un proceso de transición que permita a las revistas, que así lo determinen, solicitar su inclusión en estos índices bibliográficos con factor de impacto y la simple inclusión de este factor como variable principal para la clasificación de las revistas en las categorías A2 y A1; hasta hacer , junto con las revistas nacionales, un

proceso de homologación, similar o equivalente al que se hace en el *Servicio de Homologación de Publicaciones Seriadadas de CTeI Extranjeras*, que tendría los mismos criterios de homologación y que podría incluso ser contratado con alguna organización externa a COLCIENCIAS, con lo cual se podrían llegar a suprimir las convocatorias de actualización que se hacen semestralmente.

Se espera que en el transcurso del presente año el Departamento Administrativo de Ciencia y Tecnología – COLCIENCIAS – defina cual será el nuevo modelo de clasificación de las revistas científicas colombianas, pero seguramente traerá consigo la inclusión del factor de impacto como variable de clasificación. Este nuevo modelo incorporará un nuevo reto que demandará mayor esfuerzo y recursos para las instituciones responsables de estas publicaciones, y que pretendan mantener sus revistas como parte de su contribución a la divulgación de resultados de investigación entre la comunidad científica y la sociedad en general.

El equipo de trabajo de TECNURA junto con su comité científico y editorial, y con el apoyo del Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico de la Universidad-CIDC -, ha decidido hacer todos los esfuerzos a su alcance para que sea incluida en los principales índices bibliográficos con factor de impacto a nivel internacional, y para ello viene trabajando en los ajustes y cambios que requiere la revista, manteniendo su calidad científica. Dentro de estos ajustes se destacan los cambios en la imagen editorial, la inclusión de la declaración de ética y buenas prácticas, la inclusión del identificador digital de objetos (digital object identifier – doi -) para cada artículo; el rediseño de la página web de la revista con todos sus campos en inglés y en español, así como la migración de la página web a la plataforma OJS institucional y la publicación frecuente de artículos en idioma inglés, entre otros.

El reto que se viene para TECNURA no es ajeno al desafío mayor que afronta la Facultad Tecnológica con la ampliación de su oferta académica a otras áreas del conocimiento, y la consolidación de nuestro modelo de formación por ciclos, alcanzando niveles de excelencia en docencia e investigación.

César Augusto García-Ubaque
Director

EDITORIAL

Although there have been scientific journals in Colombia for decades, the indexing system was created until 2002 with the issuance of Decree 1279 by the Ministry of Education, which delegated COLCIENCIAS to be responsible for indexing the specialized publications in Science, Technology and Innovation (CTel, in Spanish) in four (4) categories: C, B, A2 and A1. This fact caused the creation of the National Indexing System for Serialized Publications in Science, Technology and Innovation from Colombia, comprising:

The National Bibliographic Database–BBN Pubblindex: or information repository of scientific journals from the country. It provides bibliographic records for each one of the documents that contains thematic descriptors, authors, publication dates, titles of articles and summaries. Besides, it allows obtaining complete texts and aims to make visible, useful and accessible the scientific production.

The National Serialized Publications in CTel Indexing Service: which measures with scientific criteria editorials, stability and visibility factors, and quality of each of the national scientific journals that comprise the National Bibliographic Index _ IBN Pubblindex. Likewise, the system has permanence criteria of the journals that constitute it. The notion of national journals indexing is associated with their classification within the IBN Pubblindex.

The Foreign Serialized Publications in CTel Approval Service: which establishes the set of foreign scientific journals approved for the national categories, based on the levels of visibility and impact of the publications integrated to the indexing and abstracting systems–SIR recognized by Colciencias (Document of indexing and abstracting systems used for indexing processes and approval of publications in science, technology and innovation 2012).

The National Bibliographic Database–BBN Pubblindex, the *National Serialized Publications in CTel Indexing Service* and *The Foreign Serialized Publications in CTel Approval Service* have been working since their inception until today based on criteria of scientific excellence, editorial quality, stability and visibility.

This has marked that national journals aspiring to be included in the national bibliographic database and classified in the categories established by Decree 1295 de 2002 must have an administrative structure formed by an editor and an editorial committee that are visible. They must have also a scientific committee and a group of arbitrators, who emit qualified judgments confirming the scientific quality of the publication. Moreover, the evaluation processes of the works submitted for publication and the time it takes to decide on their acceptance must be presented in authors' guidelines. Journals should also maintain and strictly enforce its declared periodicity throughout the observation window and finally, they should appear recorded in different worldwide databases and bibliographic indexes.

According to COLCIENCIAS, in 2002 the bibliographic index had 91 journals from which only 1 in category A1, 9 in category A2, 7 in category B and 74 in Category C. In the latest update of 2014, the IBN already had 542 journals from which 28 appear in category A1, 138 in category A2, 131 in category B and 245 in category C, which represents an increase of almost six (6) times over the twelve years since its inception.

COLCIENCIAS reports that within the IBN Pubblindex the topics of the publications, distributed in knowledge areas established by the Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), are distributed as follows: 40.9% of publications correspond to social sciences, the 15.67% to medical and health sciences, the 13.52% to humanities, 10.73% to engineering and technology, the 8.80%

to natural and exact sciences, 4.51% to agricultural sciences and the remaining 5.87% to multidisciplinary journals.

As reported by COLCIENCIAS, despite the significant growth of the national scientific production, it is also evident that most of the publications in the IBN Publindex have low visibility and impact in the international community for being almost entirely of endogamic character. This is observed in the low percentage of national journals integrated to citation indexes that measure the impact factor. Currently, only about 5.0% (27 journals) have some indicator of impact factor and 45.2% (245) that are in category C have endogamic character.

The impact factor is a quantitative indicator that allows to categorizing and comparing scientific publications in each one of the disciplines, according to the number of citations received by the journal in a certain period of time. The impact factor is calculated by citation indexes like the Thomson Reuter Journal Citation Report JCR, the Elsevier Scopus Scimago Journal Ranking SJR, SciELO Citation Index SCI, from Scielo Latin America, among others. The impact factor is expressed as the ratio between the number of citations and the number of articles published within a time period that may be for 1, 2, 3 to 5 years. The results of this relationship for each journals group by specialty are divided into four groups (quartiles), sorted from highest to lowest to determine the relative position of each journal over the other of the same specialty.

The discussion about the relevance of national scientific journals has led PUBLINDEX to seriously consider the inclusion of the Impact Factor as the main factor for the classification of national scientific journals. Among the different scenarios under discussion, some alternatives ranging from establishing a transition process that enables journals, determining so, to apply for inclusion in these bibliographic indexes with impact factor and the single inclusion of this factor as main variable for journals classification in A2 and A1 categories; or even develop, along with national journals, an approval process, similar or

equivalent to what is done in the Foreign Serialized Publications in CTel Approval Service, which would have the same criteria for approval and could even be contracted by an external organization different from COLCIENCIAS, thereby suppressing the calls for renovation made half-yearly.

It is expected that in the course of this year Administrative Department of Science and Technology–COLCIENCIAS–will define the new classification model for Colombian scientific journals, but it will surely bring along the inclusion of the impact factor as a classification variable. This new model will incorporate new challenges that require more effort and resources from institutions responsible for these publications, seeking to keep their journals as part of their contribution to dissemination of research results to scientific community and society in general.

The Tecnura team along with its scientific and editorial committee, and supported by Centre for Scientific Research and Development–CIDC -, has decided to do all necessary to be included in the main bibliographic indexes with international impact factor, and for that reason it has been working on the required adjustments and changes, maintaining its scientific quality. Among these adjustments we may highlight changes in the publishing image, inclusion of the statement of ethics and good practice, inclusion of the digital object identifier (DOI) for each article; redesigning the journal website with all fields in English and Spanish, as well as migration of the website to institutional OJS platform, and the frequent publication of articles in English, among others.

The challenge for TECNURA is not stranger to the bigger challenge that the Faculty of Technology is facing with the expansion of its academic offer to other areas of knowledge and the consolidation of our cycles formation model, reaching levels of excellence in teaching and research.

César Augusto García-Ubaque
Director



Cognición imitativa para un robot mediante una comunidad de replicadores neuro-meméticos

Imitative cognition for a robot through a community of neuro-memetic replicators (CNMR)

Dante Giovanni Sterpin Buitrago*

Fecha de recepción: 11 de marzo de 2014

Fecha de aceptación: 19 de enero de 2015

Citation / Para citar este artículo: Sterpin Buitrago, D. G. (2015). Cognición imitativa para un robot mediante una comunidad de replicadores neuro-meméticos. *Revista Tecnura*, 19(44), 15-31. doi:<http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.2.a01>

Resumen

Como herramienta de inteligencia artificial, la computación memética emplea modelos de ciertos elementos cerebrales, llamados neuro-memes, hipotéticamente implicados en la simbolización, diseminación y evolución de las características culturales en las sociedades humanas. Con la finalidad de simular el gran potencial evolutivo de los neuro-memes, recientemente se presentó el Perceptrón auto-supervisado (SSP) como replicador neuro-memético artificial, cuya capacidad de aprendizaje imitativo fue verificada al controlar un robot muy sencillo. Con respecto a dicha capacidad se observó una deficiencia aprehensiva cuando el imitador solamente observa la conducta libremente evidenciada por el instructor. Al atender dicha deficiencia se encontró la incapacidad de imitar una conducta con ciertas características. Considerando que el SSP es un modelo orientado al desarrollo de sistemas colectivos, en este artículo se presenta un sistema multi-agente compuesto por varios SSP, con el cual se solucionaron dichas dificultades encontradas en un SSP individual.

Palabras clave: aprendizaje por imitación, mapa auto-organizado de Kohonen, neuro-meme, Perceptrón multicapa, red neuronal artificial, replicación neuro-memética, sistema multi-agente.

Abstract

Memetic computation, as an artificial intelligence tool, uses models of certain cerebral elements, called neuro-memes, hypothetically implicated in symbolization, dissemination and evolution of cultural characteristics in the human societies. In order to simulate the great evolutionary potential of neuro-memes, the Self-supervised perceptron (SSP) was recently presented as an artificial neuro-meme, and its imitative learning capability was verified through the control of a simple robot. Regarding that capability, it was observed an apprehensive deficiency when the imitator looks only the instructor's freely evidenced behavior. When attending that deficiency, it was found the incapability to imitate a behavior with certain characteristics. Whereas the SSP is a model oriented to

* Ingeniero electrónico, especialista en Docencia Universitaria, docente asociado en la Corporación Unificada Nacional de Educación Superior (CUN). Bogotá, Colombia. Contacto: dante_sterpin@cun.edu.co

develop collective systems, this paper presents an SSP-based multi-agent system, by which such difficulties found in a single SSP were solved.

Keywords: Artificial neural network, Imitative learning, Kohonen's self-organized map, Multi-agent system, Multilayer perceptron, Neuro-meme, Neuro-memetic replication.

INTRODUCCIÓN

Una gran cantidad de sistemas naturales demuestran que es preferible resolver problemas en sociedad, y el intelecto humano ha logrado simular tecnológicamente esta estrategia mediante sistemas complejos como las redes neuronales, los algoritmos evolutivos y ciertas sociedades artificiales como los autómatas celulares, los enjambres inteligentes y los sistemas multi-agente. Dichas simulaciones permiten estudiar el comportamiento de los sistemas naturales y sociales de una manera más apropiada (Maldonado & Gómez, 2010), con la ventaja de evaluar estrategias de intervención social como con ningún otro método (González, 2004). Con la finalidad de simular las ventajas intelectuales de un sistema socio-cultural remotamente cercano al humano y, además, apoyar tecnológicamente el abordaje de sus respectivas problemáticas diarias, en la Corporación Unificada Nacional de Educación Superior (CUN) se ha proyectado una investigación fundamentada en la hipótesis del replicador neuronal (Fernando & Szathmáry, 2009) para lograr simular una sociedad con evolución cultural. Al respecto se inició diseñando un replicador neuro-memético artificial, el cual evidenció una dificultad aprehensiva cuya solución, presentada en este artículo, requirió emplear un conjunto de varios replicadores con capacidad de operar como un sistema multi-agente bastante sencillo.

Agentes y sistemas multi-agente

En el contexto de este artículo, un agente es un sistema computacional capaz de percibir cierta información de su entorno para ejecutar decisiones

autónomamente, con la finalidad de lograr satisfactoriamente ciertos objetivos, ya sea en solitario o asociado con otros agentes, mediante la adquisición y utilización de conocimiento sobre las situaciones experimentadas. En cuanto a la capacidad de decisión existen dos arquitecturas básicas: reactiva y deliberativa. Los agentes empleados en este artículo son reactivos, pues son capaces de responder rápidamente ante la situación percibida sin necesidad de modelos explícitos del entorno, mientras que los deliberativos sí requieren dichos modelos para razonar sobre la mejor decisión en cada situación.

Cuando un problema implica considerar diversas instancias se requiere emplear varios agentes para enfrentarlo, pues intentar establecer una estrategia única podría resultar infructuoso. Para comprender y/o solucionar dichos problemas es preferible contar con una sociedad de agentes simples capaces de interactuar a nivel micro, a partir de lo cual podrán emerger estructuras y/o comportamientos complejos a nivel macro, mediante la auto-organización de las partes del sistema como un todo. El modelamiento y la simulación mediante sistemas multi-agente está en la vanguardia investigativa, tanto en contextos tecnológicos (Perozo, 2011) como en contextos sociológicos (González, 2004), por su afinidad con la complejidad del mundo real.

Neuro-memes y evolución cultural

Así como la evolución biológica se basa en la selección, replicación y mutación de genes, la evolución cultural podría basarse en la selección, replicación y variación de neuro-memes, es decir, nodos neuronales capaces de replicar su patrón de

activación estimulando a otros nodos para inducir en alguno de estos últimos un patrón semejante (Aunger, 2004). La existencia de dichos nodos es aún hipotética pero su conceptualización brinda un modelo explicativo para la emergencia de las diversas caracterizaciones culturales en las sociedades humanas, y además permite dilucidar el cerebro individual como un gran proceso de evolución cognitiva.

Con el propósito de simular completamente el enorme potencial del modelo evolutivo basado en neuro-memes, actualmente existen algunos modelos artificiales de replicación neuro-memética (Fernando & Szathmáry, 2009) y (Feng, Ong, Tan, & Chen, 2011), y también algunos modelos de la capacidad cerebral para aprender por imitación (Castillo, 2010) y (Castillo, Escobar, Hermosillo, & Lara, 2013), mediante la cual se propagan neuro-memes con eventuales modificaciones (Aunger, 2004). Comparado con dichos modelos el actualmente desarrollado en la CUN también emplea redes neuronales artificiales, pero está enfocado en demostrar a largo plazo el desarrollo autónomo de emoción y moralidad en una sociedad de agentes con evolución memética, individual y colectiva (Feng, Ong, Tan, & Chen, 2011), asumiendo la inexistencia de un Yo centralizado (González, 2004) y, procurando que su macro-universo social entrelace diversos micro-mundos individuales, para la auto-organización de una cultura artificial, lo cual sería un sistema evolutivo multi-agente con propiedades socio-culturales, elementales y emergentes, potencialmente útil en ingeniería y sociología.

Redes neuronales artificiales

Las neuronas artificiales son sistemas con un valor de conexión sináptica asociado a cada una de sus entradas, con lo cual regulan la estimulación de entrada y simbolizan el conocimiento de cómo activar su salida, a manera de respuesta, con respecto al estado entrante.

Perceptrón multicapa (MLP)

Una de las interconexiones neuronales artificiales más utilizadas consiste en organizar neuronas artificiales en una capa perceptora, una o varias capas intermedias y una capa efectora, de tal modo que mediante un proceso de propagación informática se obtienen las activaciones con las cuales el MLP opera como un agente reactivo frente a la situación percibida. El entrenamiento de esta red neuronal le permite desarrollar patrones reactivos acordes con el comportamiento requerido por un usuario, para lo cual el diseñador especifica un conjunto de ejemplos senso-motores con los cuales se ajustan las conexiones sinápticas, en función de obtener los niveles de activación motriz requeridos para el respectivo caso sensorial en cada ejemplo.

Dicha composición de ejemplos es para un MLP como el *Super-Yo* es para el *Yo* (Lahoz-Beltrá, 2004), y por tanto puede interpretarse como una especie de “supervisor moral” para el MLP, pues de esta manera se le instituyen las normas de un *deber-hacer* que aprende a evidenciar como conducta “moralmente correcta”, al resultar operativamente atraído hacia dicha normativa. Este símil es bastante peculiar en el desarrollo del presente artículo, pero la ética implicada está fuera de su alcance. Al entrenamiento del MLP se le conoce como aprendizaje supervisado y su efectividad depende de la calidad con que se especifique el patrón moral, es decir, el conjunto de ejemplos senso-motores del *deber-hacer*. Durante este proceso de aprendizaje se emplean dos medidas de error: uno de entrenamiento directo y otro de generalización; el primero utiliza un porcentaje alto del patrón moral para evaluar cómo está reaccionando el MLP, con respecto a la forma como *debe-reaccionar*, mientras el segundo utiliza el resto de la moral para testear el comportamiento del MLP en situaciones que no se le enseñan directamente.

Mapa auto-organizado (SOM)

Este modelo neuronal está conformado por una capa de neuronas sensoriales interconectadas

sinápticamente con una estructura 2D o 3D de neuronas cognitivas, y es capaz de asimilar e identificar patrones de semejanza presentes en sus percepciones. El entrenamiento del SOM no requiere patrones predefinidos por el diseñador, por lo cual dicho proceso se conoce como aprendizaje no-supervisado, donde la modificación sináptica depende de ciertos factores cuyo valor disminuye con el tiempo, razón por la cual el SOM está inicialmente “abierto” a los cambios cognitivos y, conforme avanza el tiempo, pierde flexibilidad sináptica hasta “cerrarse” tras suceder cierta cantidad predefinida de iteraciones.

Perceptrón auto-supervisado (SSP)

Al modelo de replicación neuro-memética recientemente diseñado en el programa de ingeniería electrónica de la CUN se le denominó Perceptrón auto-supervisado, pues hibrida un Perceptrón multicapa (MLP) y un Mapa auto-organizado (SOM). Su funcionamiento combina el aprendizaje no-supervisado propio del SOM y el aprendizaje supervisado propio del MLP, con la finalidad de utilizar el conocimiento asimilado por el SOM para auto-entrenar la conducta del MLP y así, el SSP es también un neuro-agente con aprendizaje imitativo, pues el SOM asimila los patrones de una conducta instruida y el MLP los habitúa (Sterpin, 2011).

La capacidad aprehensiva del SSP fue verificada mediante un robot virtual con la necesidad de imitar dos tareas básicas por separado –*evadir obstáculos predominantemente por la izquierda* (EOPI) y *seguir contornos a cierta distancia por la derecha* (SCD), en un ambiente continuo de tipo laberinto. Tras dicha verificación se detalló cierta deficiencia en el conocimiento adquirido por el imitador y al solucionarla se encontró la imposibilidad de imitar cierto tipo de comportamiento instruido. A continuación se describirán estos problemas aprehensivos en un SSP individual y la forma como se logró solucionarlos desarrollando un modelo colectivo con varios SSP.

METODOLOGÍA

El robot empleado simula dos sensores fronto-laterales {A ; B}, cuya información numérica puede variar independientemente entre [-10 ; +10] en correspondencia con la distancia entre el robot y los obstáculos. De esta manera las posibles situaciones sensoriales del robot pueden referenciarse mediante coordenadas ($x_a ; x_b$) en el plano: $\{X_a: [-10 ; +10]\} \times \{X_b: [-10 ; +10]\}$, denominado *espacio de eventualidades sensoriales* (EES). Adicionalmente, el robot simula la tracción diferencial central de dos motores {C ; D}, cuya velocidad puede variar independientemente en el rango [-10 ; +10], por lo cual las posibles actuaciones del robot pueden referenciarse mediante coordenadas ($y_c ; y_d$) en el plano: $\{Y_c: [-10 ; +10]\} \times \{Y_d: [-10 ; +10]\}$, denominado *espacio de manifestaciones motrices* (EMM), mientras las posibles actuaciones definidas en el patrón moral pueden referenciarse mediante coordenadas ($t_c ; t_d$) en el plano: $\{T_c: [-10 ; +10]\} \times \{T_d: [-10 ; +10]\}$, denominado *espacio de necesidades motrices* (ENM).

En la figura 1 se detallan el robot y dos de los laberintos empleados en los experimentos, en donde se demostró que al ser controlado mediante SSP logra imitar las tareas EOPI y SCD. En la figura 2 se muestra el MLP empleado tanto en el instructor como en el aprendiz, el SOM de este último, y la interconexión para el proceso de enseñanza/aprendizaje entre ambos. Dicho vínculo permite que las neuronas sensoriales {A ; B ; C ; D} del SOM aprendiz dispongan de la información presente tanto en las neuronas sensoriales {A ; B} como en las efectoras {C ; D} del MLP instructor, con lo cual el aprendiz puede “observar” exactamente las acciones ejecutadas por el instructor en cada una de las situaciones sensorialmente experimentadas por este último.

El conjunto de casos ($x_a ; x_b$) del patrón moral corresponde a su dominio moral en el EES, y en la figura 3 se detallan los 64 casos, uniformemente distribuidos, del dominio moral propio de

cada instructor. La figura 4 permite detallar el *dominio moral desarrollado* (DMD) por el aprendiz en cada tarea, donde cierta cantidad de muestras situacionales conformaron un perfil irregular en el EES. En cada una de estas tareas la forma particular

de dicha irregularidad circunscribe las situaciones asimiladas por el aprendiz al “observar” la *conducta libremente evidenciada por el instructor* (OCLEI), mientras este último se movía en su respectivo laberinto.

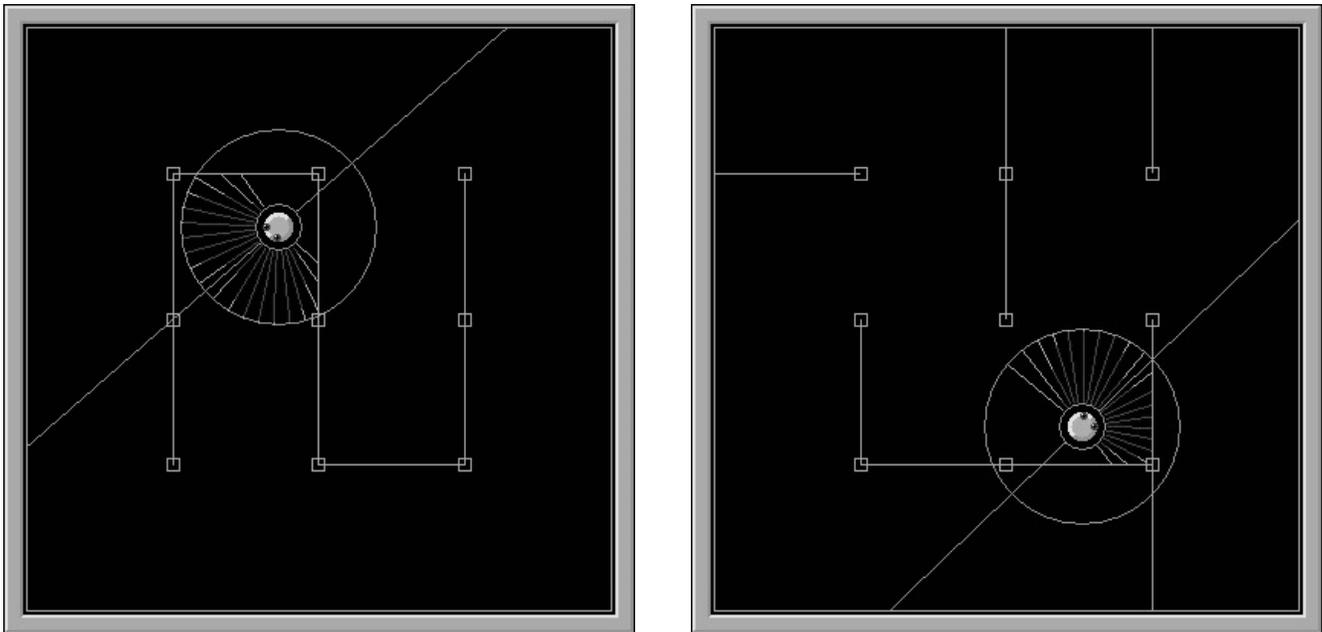


Figura 1. a) Laberinto único para la tarea EOPI. b) Posible laberinto para la tarea SCD.

Fuente: elaboración propia.

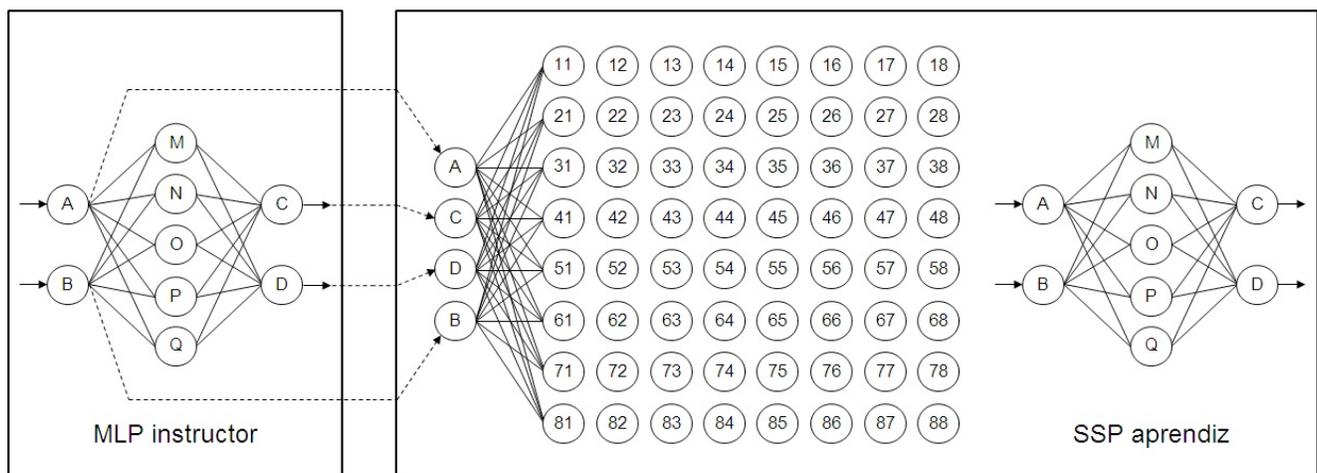


Figura 2. Interconexión para poder “observar” la conducta instruida.

Fuente: elaboración propia.

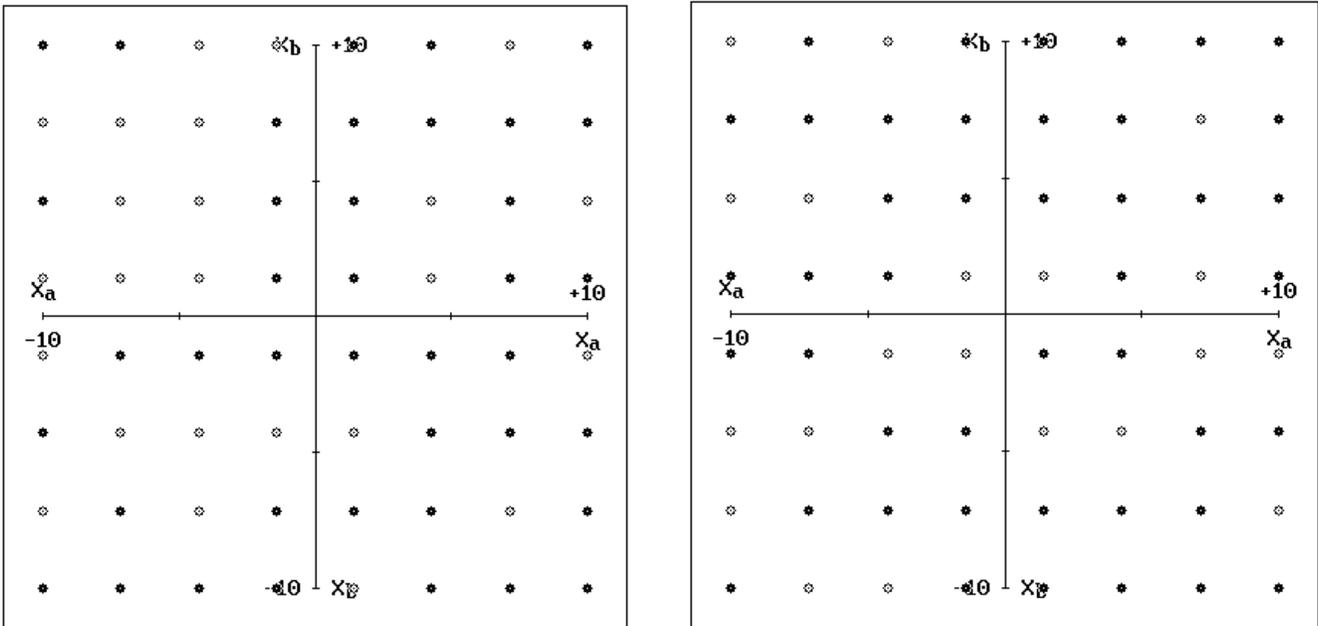


Figura 3. Dominio moral del instructor, a) en la tarea EOPI, y b) en la tarea SCD.

Fuente: elaboración propia.

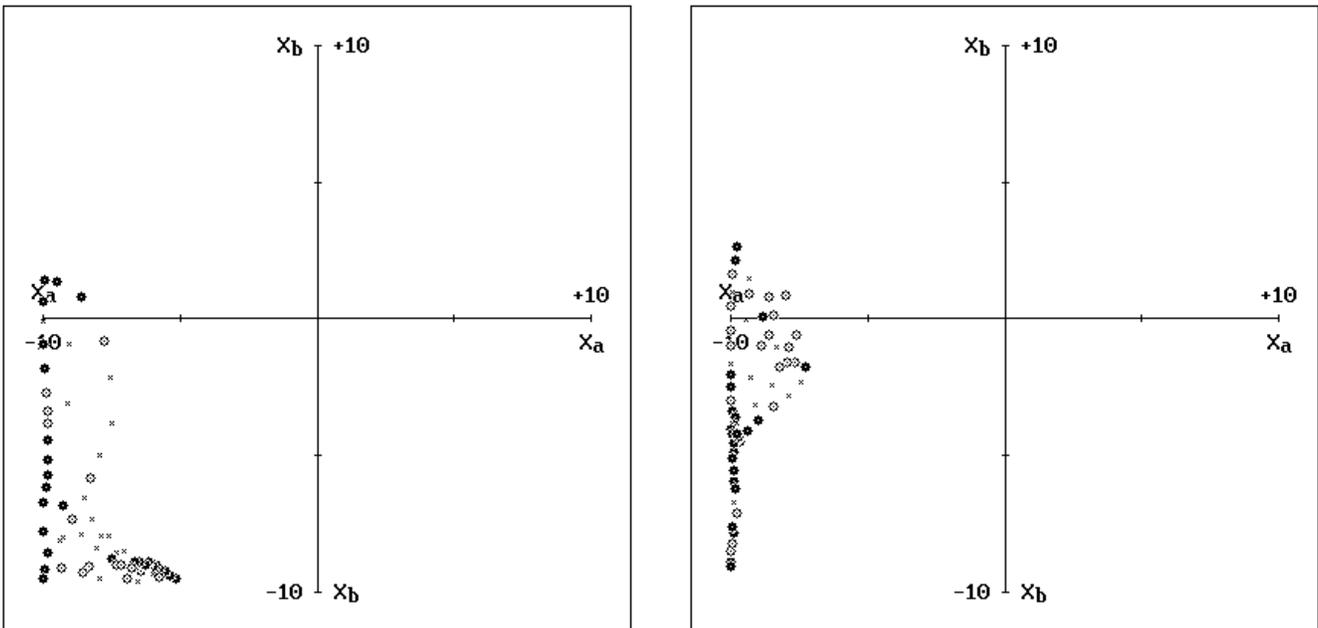


Figura 4. DMD, a) al imitar la tarea EOPI, y b) al imitar la tarea SCD, mediante OCLEI.

Fuente: elaboración propia.

Dichas visualizaciones permitieron notar una marcada deficiencia cognitiva entre instructor y aprendiz, pues este último quedó desprovisto de auto-supervisión moral en gran parte del EES y, por ende, su conducta en las situaciones moralmente desconocidas fue “intuida” a partir del escaso *patrón moral asimilado* (PMA) por el aprendiz en cada tarea. El conjunto de actuaciones ($y_c ; y_d$) del MLP, para los casos ($x_a ; x_b$) del patrón moral, corresponde a su patrón conductual en el EMM, y al comparar las figuras 5a y 6a, así como al comparar las figuras 5b y 6b, puede detallarse la diferencia entre cada conducta instruida y su respectivo *patrón conductual habituado* (PCH). Frente a dicha deficiencia el problema atendido consistió en: ¿cómo dotar a un sistema basado en SSP con la capacidad de imitar completamente la conducta de un MLP instructor?

Ampliación del dominio moral

A pesar de dicha diferencia cada aprendiz logró comportarse como su respectivo instructor, pero

con la finalidad de lograr un DMD más amplio se decidió modificar la dinámica de enseñanza/aprendizaje así: primero se obvió la necesidad de “observar” la socialización conductual del instructor, pues se pretende considerar que juntos, tanto instructor como aprendiz, conforman un único sistema neuronal para controlar un robot individual, con el propósito de simular la replicación neuro-memética en el interior de un cerebro humano individual (Aunger, 2004). Acto seguido se implementó un procedimiento mediante el cual el aprendiz pudiese “observar” el comportamiento del instructor en múltiples situaciones dispersas (OCIMSD), para lo cual se generó una secuencia aleatoria de las posibles situaciones sensoriales: $\{X_a : \text{Random}[-10 ; +10], X_b : \text{Random}[-10 ; +10]\}$, con el fin de estimular el MLP instructor y, al obtener de este los respectivos valores $\{y_c ; y_d\}$, mostrarle al SOM del SSP una mayor diversidad de ejemplos sobre la conducta instruida.

En las figuras 7 y 8 pueden detallarse, respectivamente, el DMD y el PCH del aprendiz en cada tarea. Efectivamente ambos aprendices asimilaron mayor

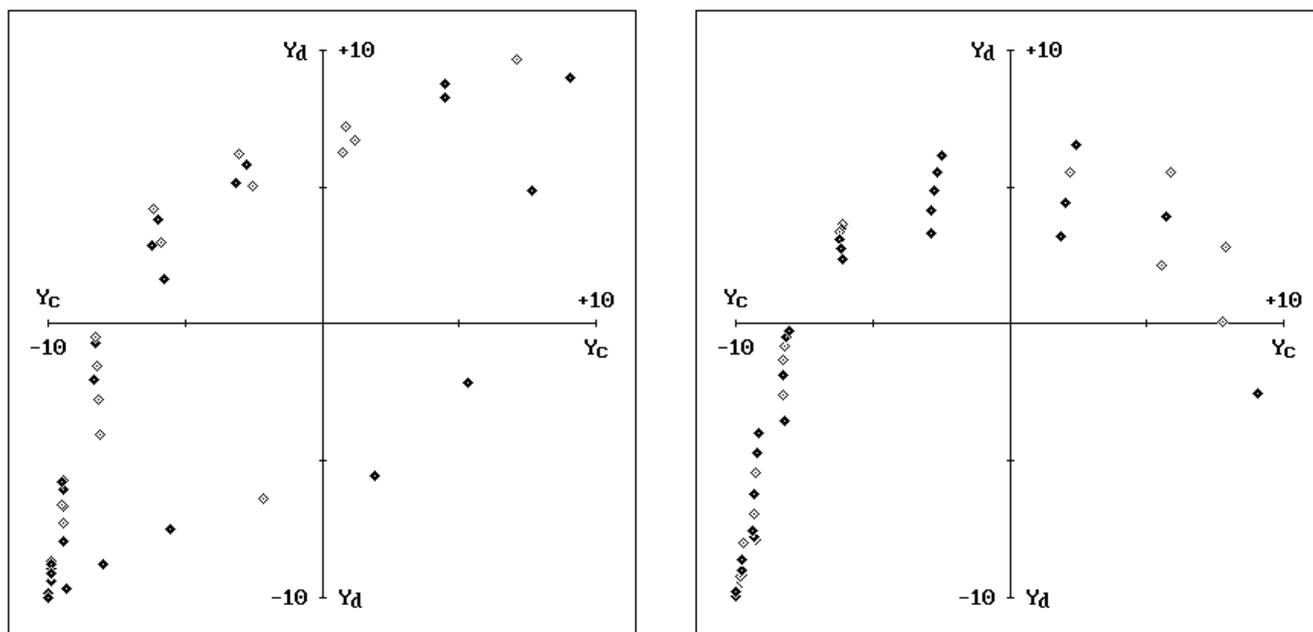


Figura 5. Patrón conductual del instructor, a) en la tarea EOPI, y b) en la tarea SCD.

Fuente: elaboración propia.

conocimiento moral y el aprendizaje de la tarea SCD logró imitarla exitosamente; sin embargo, el aprendizaje de la tarea EOPI no logró comportarse como el instructor, lo cual se evidencia mediante la motricidad faltante entre las figuras 5a y 8a. Esto se debió a la baja frecuencia de ciertos patrones propios de la tarea EOPI, con respecto al carácter estadístico de la función de enlace $[P_{\mu}]$ entre SOM y MLP en el SSP, pues tras el "cierre" del SOM las neuronas cognitivas cuya frecuencia de estimulación supera cierta frecuencia crítica $[f_c]$ son las únicas cuyo conocimiento sináptico influye directamente en el entrenamiento del MLP (Sterpin, 2011). Como dichos patrones son bastante esporádicos no logran superar la frecuencia $[f_c]$, y la función $[P_{\mu}]$ los designa como patrones de generalización muy difíciles para el MLP, lo cual se evidencia al comparar las figuras 8a y 9a, pues esta última muestra las debidas actuaciones $(t_c ; t_d)$ del respectivo PMA en el ENM.

En las gráficas de los patrones morales, tanto del MLP instructor como del SSP aprendiz, los puntos circulares referencian coordenadas $(x_a ; x_b)$ en el EES

o coordenadas $(t_c ; t_d)$ en el ENM. En las gráficas de los patrones conductuales del MLP, bien sea instructor o aprendiz, los puntos romboidales referencian coordenadas $(y_c ; y_d)$ en el EMM. El relleno en dichos puntos permite diferenciar los patrones utilizados para entrenar del respectivo MLP, pues los puntos con-relleno identifican los patrones designados para el entrenamiento directo, mientras los puntos sin-relleno identifican a los patrones empleados para evaluar la capacidad de generalización. Adicionalmente, los puntos con forma de cruz en los patrones morales del SSP aprendiz identifican ejemplos completamente excluidos por la función de enlace $[P_{\mu}]$ entre SOM y MLP en el SSP (Sterpin, 2011).

Considerando la dificultad observada al imitar la tarea EOPI, procurando que el SSP aprendiz desarrollara un amplio dominio moral mediante OCIMSD, el problema por resolver se modificó así: ¿cómo dotar a un sistema basado en SSP con la capacidad de imitar completamente la conducta de un MLP instructor, aun cuando dicha conducta incluya patrones de baja frecuencia estadística?

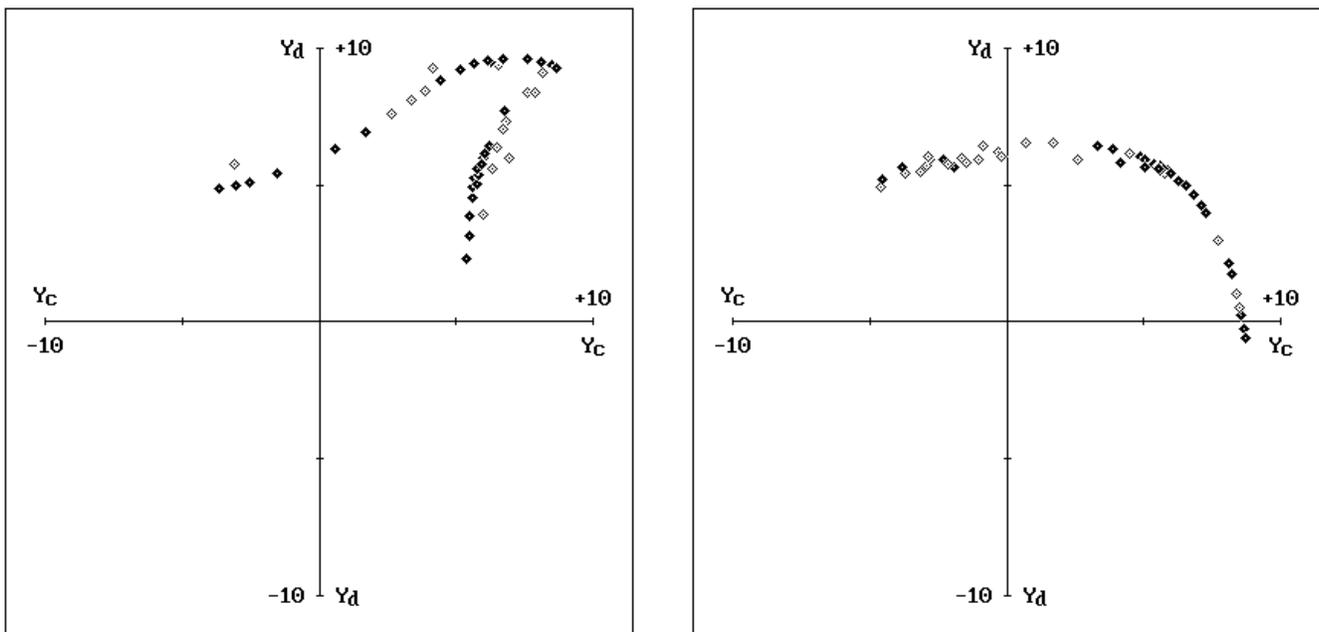


Figura 6. PCH, a) al imitar la tarea EOPI, y b) al imitar la tarea SCD, mediante OCLEI.

Fuente: elaboración propia.

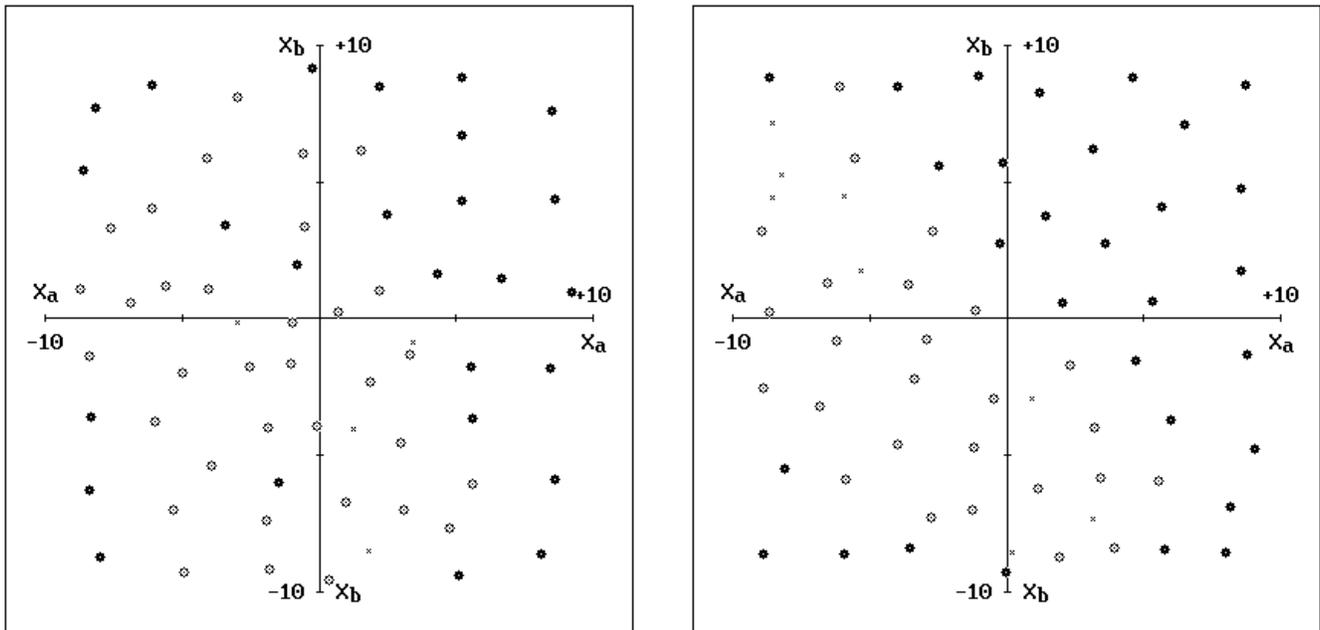


Figura 7. DMD, a) al imitar la tarea EOPI, y b) al imitar la tarea SCD, mediante OCIMSD.

Fuente: elaboración propia.

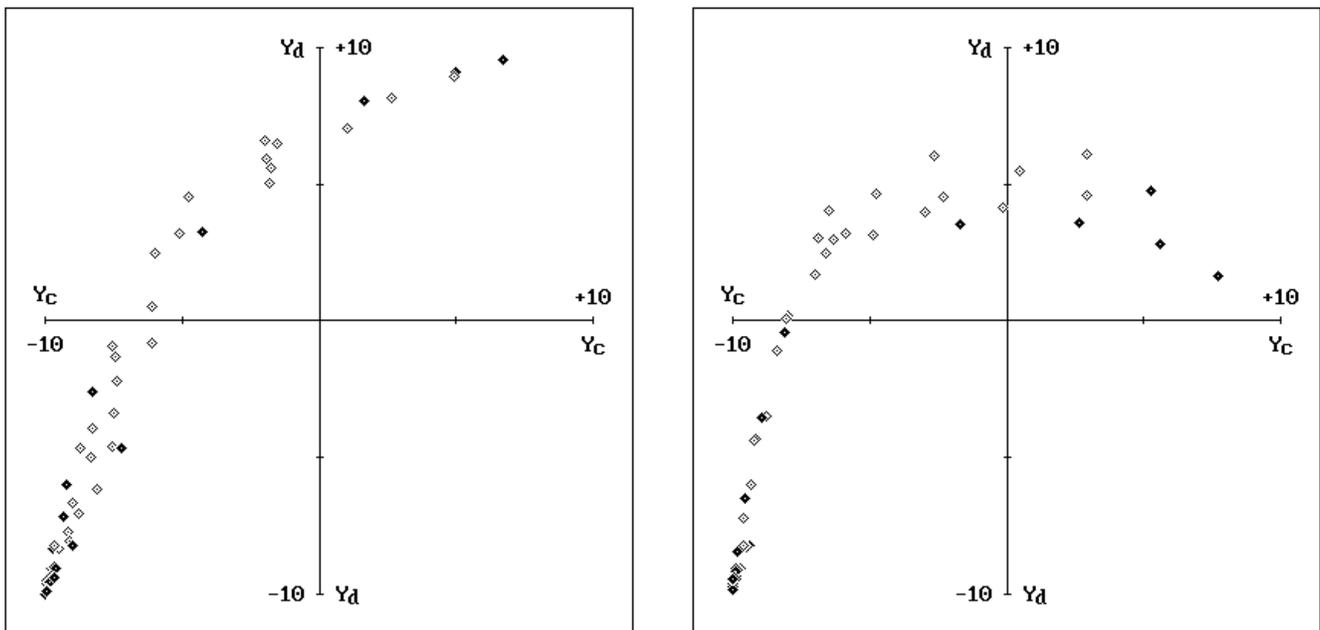


Figura 8. PCH, a) al imitar la tarea EOPI, y b) al imitar la tarea SCD, mediante OCIMSD.

Fuente: elaboración propia.

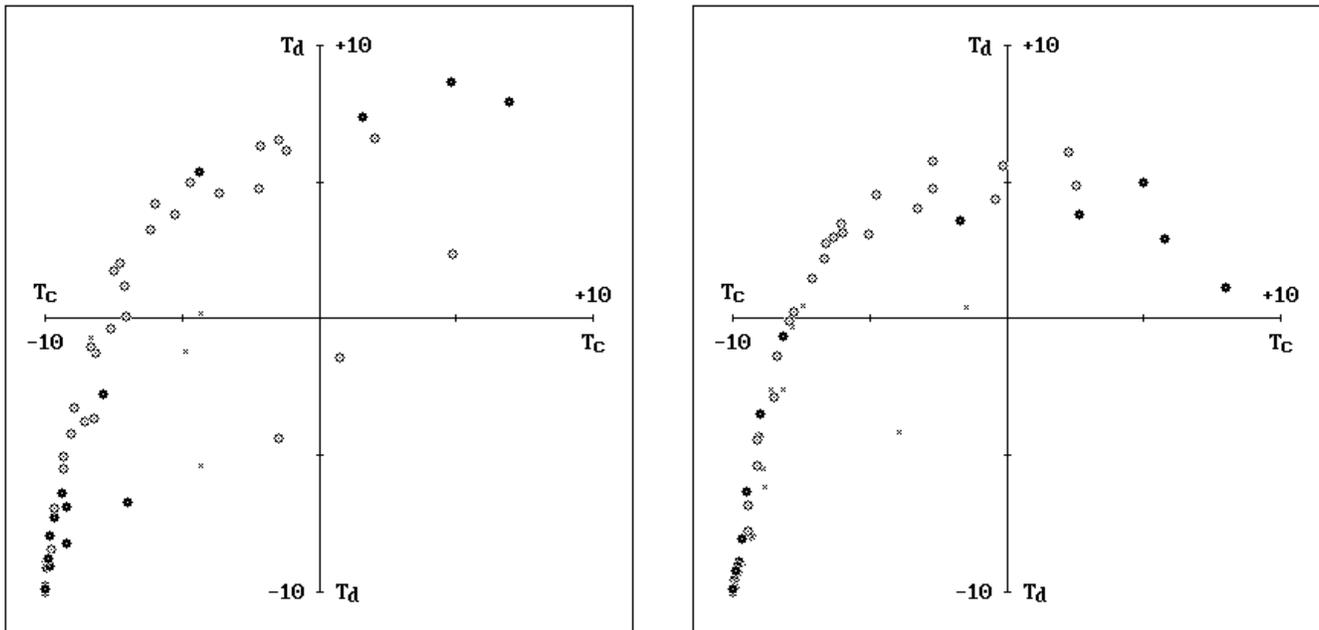


Figura 9. PMA, a) al imitar la tarea EOPI, y b) al imitar la tarea SCD, mediante OCIMSD.

Fuente: elaboración propia.

Desarrollo del modelo colectivo

Considerando la gran ventaja de resolver problemas globalmente mediante la cooperación entre agentes capaces de solucionar localmente fragmentos del problema, se decidió fragmentar el aprendizaje imitativo basado en SSP, empleando un conjunto de dichos replicadores con el fin de imitar una conducta mediante varios neuro-agentes. En función de dicha idea se desarrolló un sistema multi-agente capacitado para controlar el robot en cuestión, asignándole a cada SSP incorporado la responsabilidad de asimilar y habituar la conducta instruida en alguna *región del espacio sensorial* (RES), delimitando dichas regiones mediante planos comprendidos en el EES, así: $\{X_a: [a_{\min}; a_{\max}]\} \times \{X_b: [b_{\min}; b_{\max}]\}$, con $\{-10 \leq [(a_{\min} < a_{\max}) \text{ y } (b_{\min} < b_{\max})] \leq +10\}$. En la figura 10b se detalla una posible forma de especificar dicha fragmentación.

Para esto se asumió que el SSP es un neuro-agente con suficiente autonomía, pues aparte de percibir su situación y reaccionar al respecto,

empleando su propio conocimiento sináptico, es también capaz de asimilar su propio patrón moral y auto-supervisar su propio comportamiento según cierto requerimiento conductual, en este caso instruido mediante el comportamiento de otro agente (Sterpin, 2011). Además, se asumió que el conjunto de los SSP podría lograr la emergencia de cierta cooperación multi-agente, con la cual pudiesen superarse las limitaciones aprehensivas de un solo SSP, al fragmentar el EES para distribuirles la información sensorial del robot y permitiéndole a cada SSP especializarse localmente en su respectiva RES.

La fragmentación del EES se efectuó cuadrículándolo –tal como en la figura 10b, y restringiéndole la OCIMSD al SSP localizado en cada RES, generando secuencias aleatorias según sus posibles situaciones: $\{X_a: \text{Random}[a_{\min}; a_{\max}], X_b: \text{Random}[b_{\min}; b_{\max}]\}$, para obtener del MLP instructor los respectivos valores $\{y_c; y_d\}$. Primero se entrenaron los 16 SOM, empleando: $[A_i=1], [A_i=0,1], [R_i=2], [R_i=1], [\lambda_i=10], [\lambda_i=0], [it_i=10000], [(f_c=f_{AVG}) \text{ para } e_\mu]$ y $[(f_c=0,7*f_{AVG}) \text{ para } g_\mu]$ como parámetros

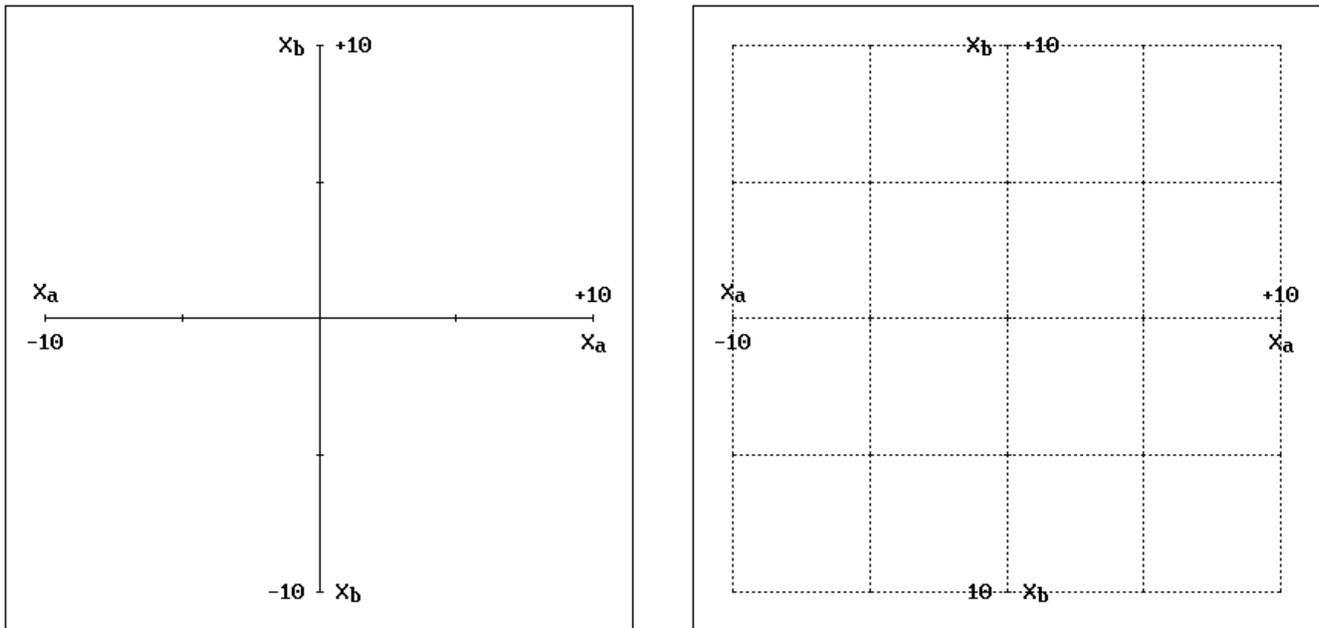


Figura 10. a) EES original, y b) EES fragmentado en 16 RES.

Fuente: elaboración propia.

del aprendizaje imitativo (Sterpin, 2011), y tras un promedio de 50000 iteraciones de entrenamiento para los 16 MLP se evaluó su capacidad cooperativa, confiriéndole el control motor del robot al SSP especializado en cada posible situación que aquél percibiera en el laberinto.

RESULTADOS

En efecto, la conducta del robot controlado mediante el conjunto de 16 SSP permitió evidenciar la imitación completa de las tareas EOPI y SCD. La figura 11 detalla el PMA del SSP empleado en cada una de las 16 RES al imitar la tarea EOPI, mientras la figura 12 detalla los respectivos PMA al imitar la tarea SCD. La figura 13a detalla en una gráfica única el DMD en cada una de las 16 RES al imitar la tarea EOPI, mientras la figura 13b detalla el respectivo DMD total al imitar la tarea SCD.

Recordando que la incapacidad de un SSP individual para imitar completamente la tarea EOPI se evidenció mediante la motricidad faltante entre las

figuras 5a y 8a, las cuatro gráficas inferiores de la figura 11 permiten verificar que en la RES: $\{X_a: [-10; +10]\} \times \{X_b: [-10; -5]\}$ están los cuatro replicadores debido a los cuales resultó posible asimilar los patrones de baja frecuencia estadística –propios de dicha tarea, pues los puntos con-relleno en sus respectivos PMA indican que dichos patrones fueron escogidos por la función $[P_\mu]$ para auto-entrenar directamente los cuatro MLP implicados.

Al entrenar uniformemente los 16 replicadores sucedió que algunos aprendían más lentamente, debido a la dificultad con la cual el MLP habitaba operativamente los deberes morales asimilados por su respectivo SOM. Con respecto a dicha disparidad se distribuyó una probabilidad según la medida individual del *error cuadrático medio* (ECM), con lo cual se proporcionaron prioridades en la medida en que el aprendizaje se dificultaba para ciertos SSP con respecto a los demás. Mediante la distribución de dichas prioridades el ECM total del conjunto de replicadores disminuyó más rápidamente.

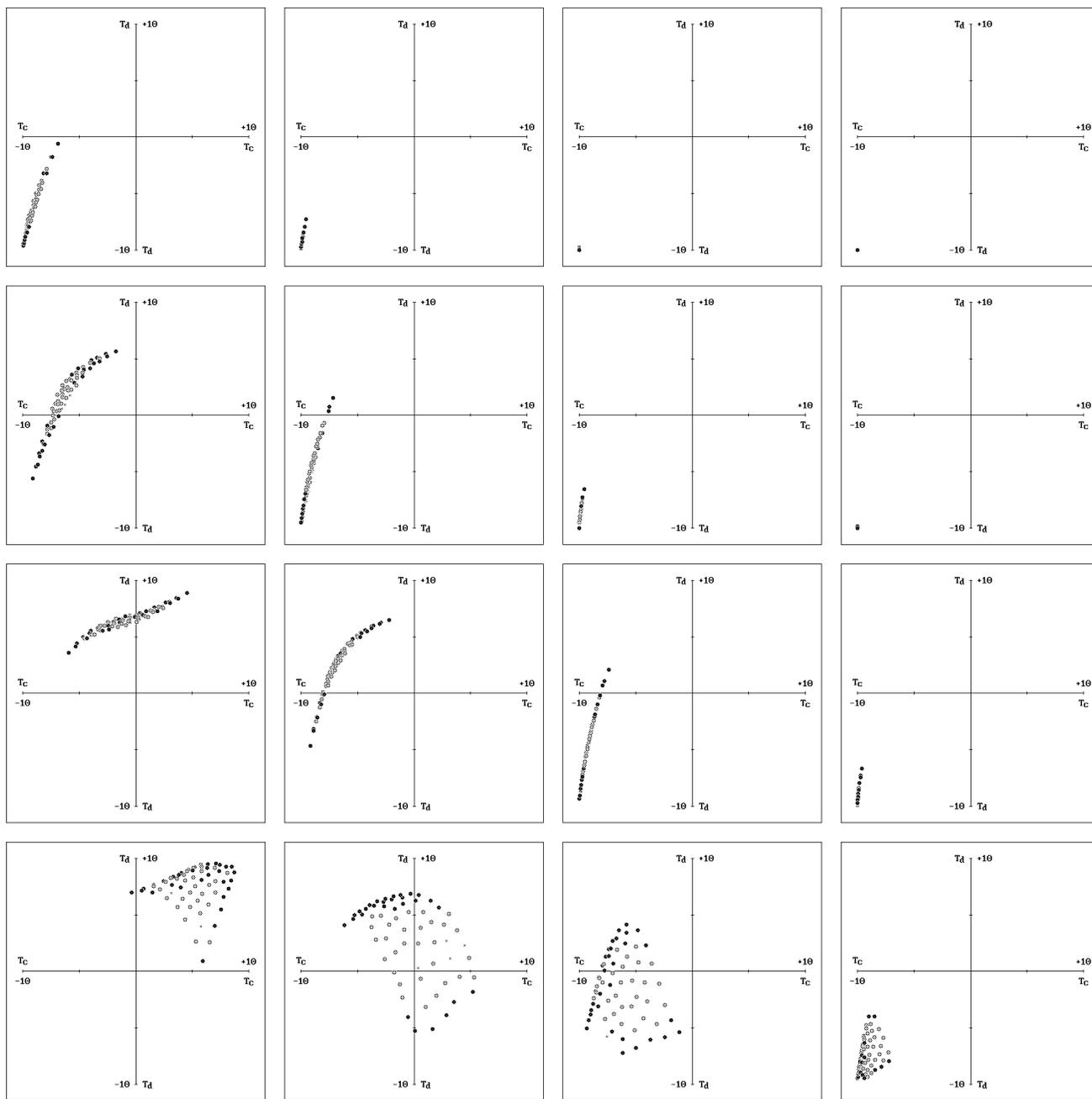


Figura 11. PMA de los 16 SSP empleados para imitar la tarea EOPI mediante OCIMSD.

Fuente: elaboración propia.

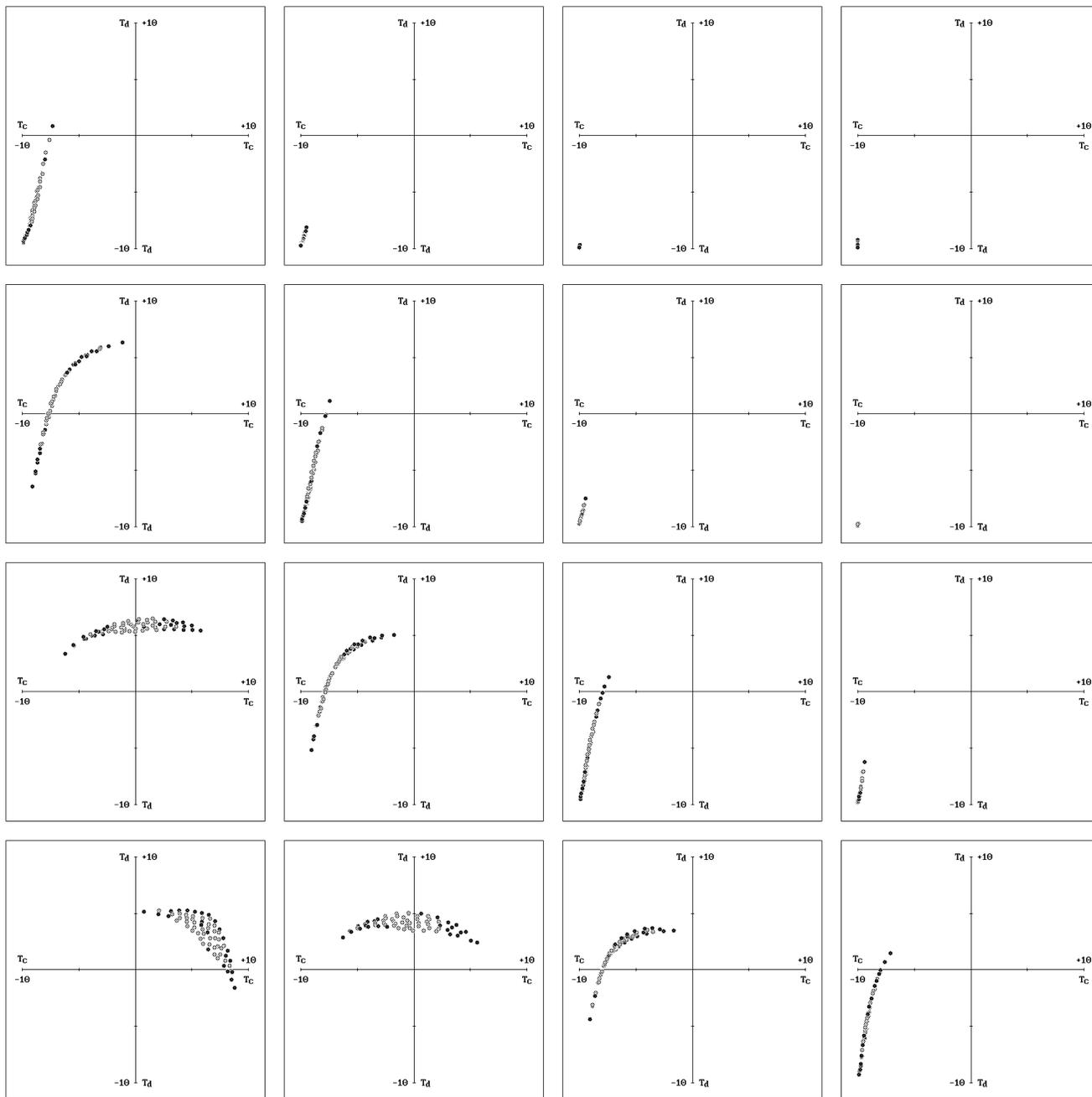


Figura 12. PMA de los 16 SSP empleados para imitar la tarea SCD mediante OCIMSD.

Fuente: elaboración propia.

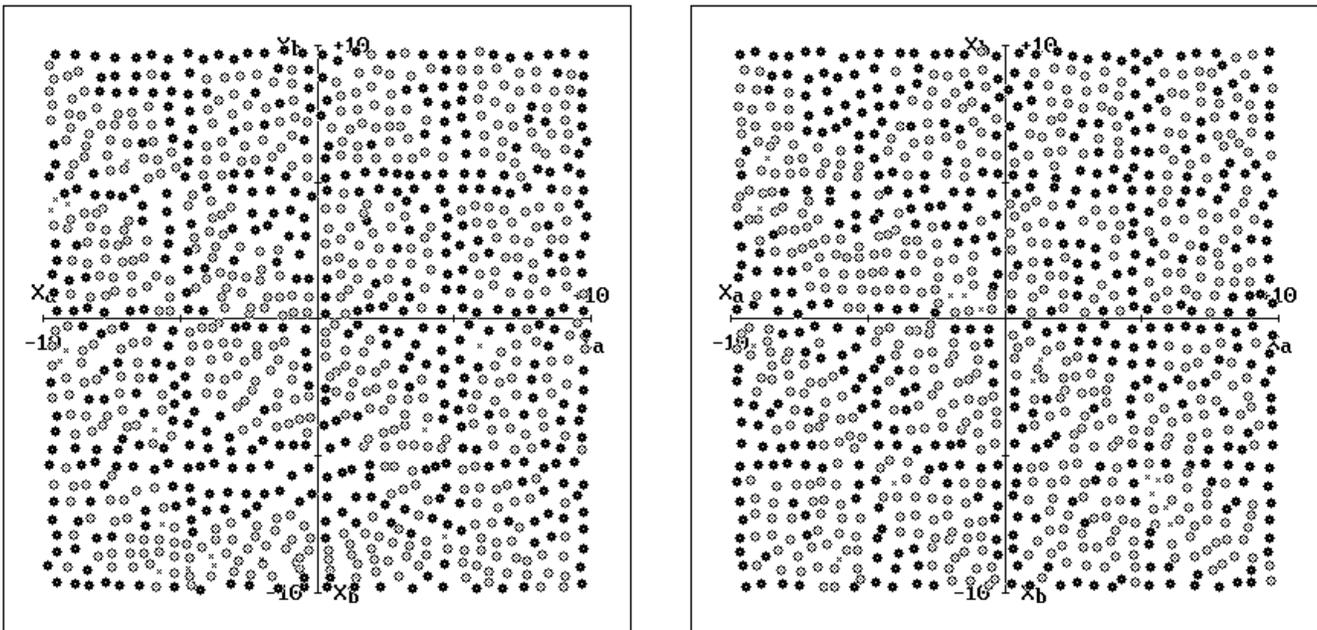


Figura 13. DMD total, a) para la tarea EOPI, y b) para la tarea SCD.

Fuente: elaboración propia.

DISCUSIÓN

Considerando que cada uno de los 16 SSP detallados antes es un neuro-agente con la capacidad de especializarse autónomamente en cierta porción del problema, y considerando que en conjunto le dan solución al problema global, dicha *comunidad de replicadores neuro-meméticos* (CNMR) en efecto funciona como un sistema multi-agente cuyo carácter cooperativo, demostrado mediante la cohesión conductual al controlar el robot virtual, no requirió emplear comunicación directa entre los neuro-agentes, ni interacciones indirectas a través del entorno, pues se obtuvo solamente con la interacción didáctica entre el instructor y los aprendices. Debido a esto, la cohesión conductual propia del MLP instructor fue heredada por la CNMR. Además, al estimar el SSP como un Yo artificial, con su propio *Super-Yo* adquirido, podría estimarse a la CNMR como una asociación descentralizada de varios Yos artificiales, donde cada uno es

capaz de asumir el control en situaciones para las cuales es particularmente experto.

Sobre cierta conformación celular

Con respecto a la figura 10, vale la pena mencionar que no es obligatorio fragmentar el EES en partes iguales ni de forma estrictamente cuadrículada; sin embargo, y con independencia de la manera como se fragmente, al distribuir los SSP para conformar la respectiva CNMR se obtiene una estructura celular en donde cada célula corresponde a un SSP como neuro-agente autónomo, y en donde pueden aplicarse interacciones a nivel de vecindario celular. Este sistema multi-agente es muy simple y, por tanto, puede considerarse como una micro-sociedad potencialmente útil en una macro-sociedad artificial, donde lo complejo pueda emerger a manera de estructuras auto-organizadas basadas en procesos simples (González, 2004) y (Perozo, 2011), lo cual tiene grandes alcances en sistemas evolutivos artificiales, como se ha

visto con respecto al lenguaje (Oudeyer & Kaplan, 2007), y con respecto al altruismo cooperativo (Floreano, Mitri, Perez-Uribe, & Keller, 2008).

Sobre cómo minimizar la complejidad temporal

Una desventaja de la CNMR es el elevado consumo de tiempo con respecto a la duración del aprendizaje imitativo en conjunto, para lo cual se probaron dos alternativas de minimización: en una se redujo la cantidad de RES necesarias para imitar completamente la tarea EOPI, y en la otra se redujo la cantidad de MLP entrenados al compartir el conocimiento asimilado por los SOM en cierto vecindario celular. A continuación se detalla cada una de ellas.

Minimización al optimizar la fragmentación del EES

Para esta forma de reducir la complejidad temporal se determinó emplear un único SSP como remplazo de varios, por lo cual se sustituyeron los 12

replicadores originalmente empleados en la RES: $\{X_a: [-10; +10]\} \times \{X_b: [-5; +10]\}$, con un solo SSP cuyo PMA logra sintetizar los PMA de dichos replicadores, lo cual puede detallarse al comparar la figura 14b con las 12 gráficas superiores de la figura 11.

La efectividad de dicho remplazo se verificó al notar que, con solo cinco SSP, la nueva CNMR logró imitar completamente la tarea EOPI, manteniendo un amplio DMD, tal como puede detallarse en la figura 14a, en comparación con la figura 13a.

Minimización al compartir la moral entre vecinos

A diferencia de los experimentos antes mencionados, –en donde cada MLP fue entrenado de modo individualista con la moral de su respectivo SOM, en esta segunda forma de reducir la complejidad temporal se permitió que los SOM, en cierto vecindario celular, compartieran su conocimiento de auto-supervisión moral para entrenar un único MLP con varios PMA. En este caso se emplearon

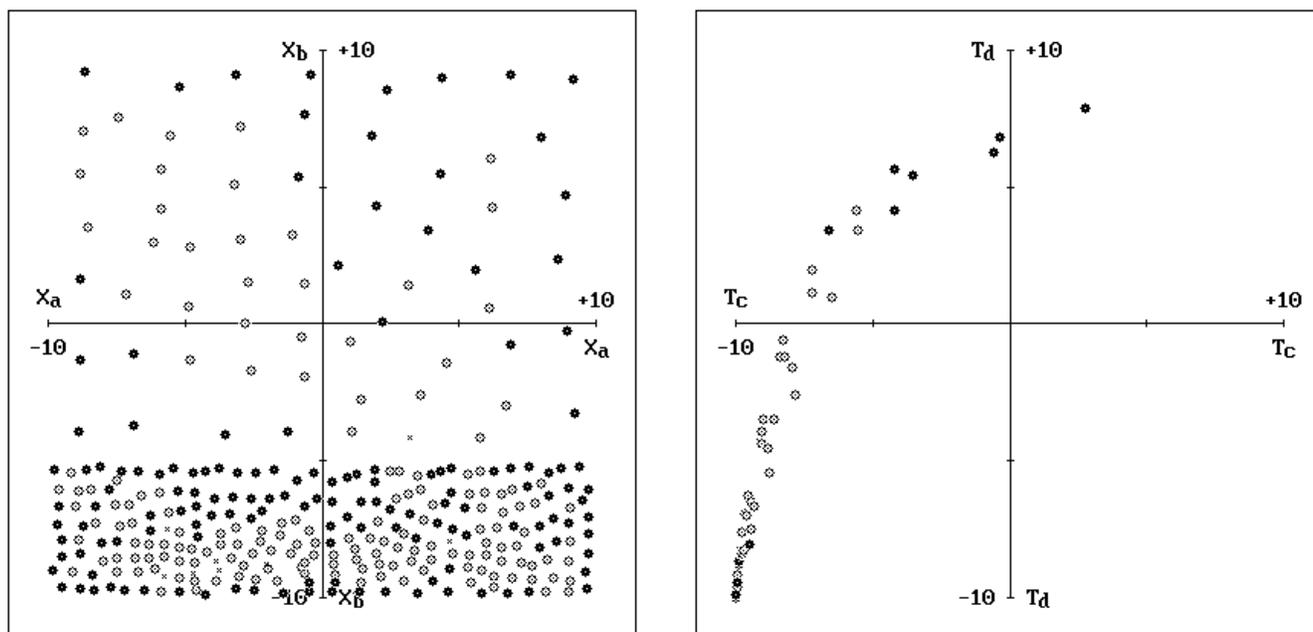


Figura 14. a) DMD total. b) PMA del SSP para: $\{X_a: [-10; +10]\} \times \{X_b: [-5; +10]\}$

Fuente: elaboración propia.

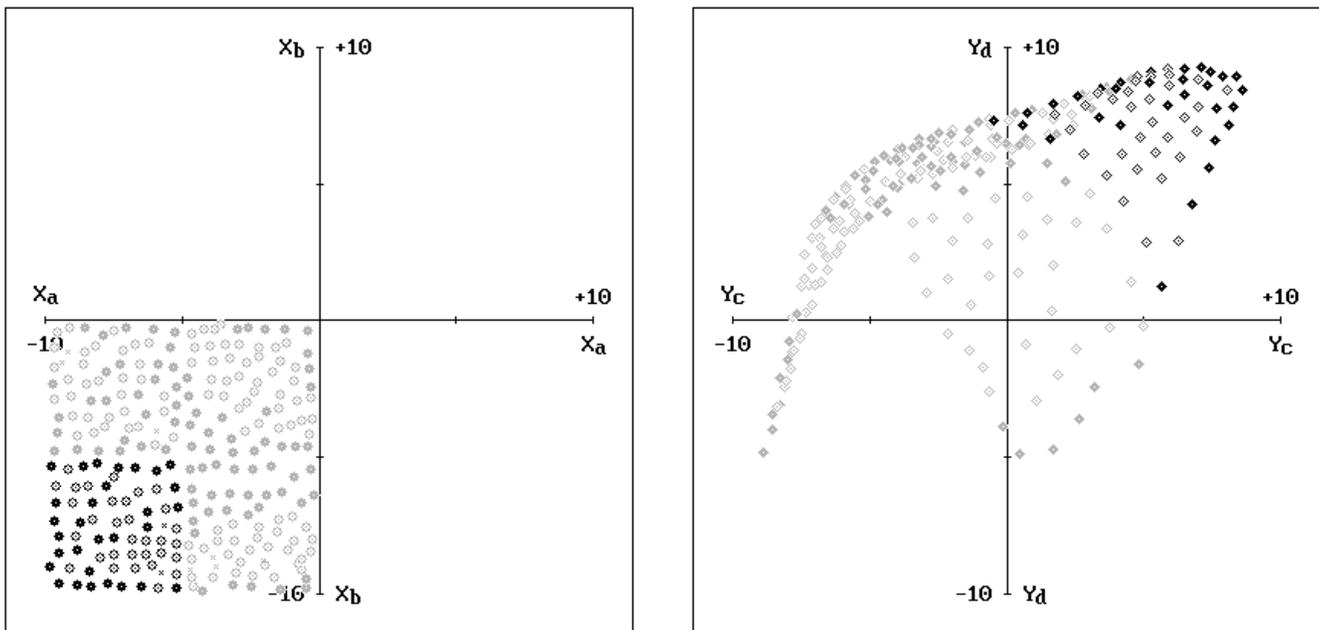


Figura 15. a) DMD de los SOM, y b) PCH del MLP, para: $\{X_a: [-10 ; 0]\} \times \{X_b: [-10 ; 0]\}$

Fuente: elaboración propia.

los 16 PMA de la figura 11 para entrenar solo cuatro MLP, logrando imitar la tarea EOPI completamente, sin reducir el DMD de la CNMR compuesta por 16 SSP, y con una reducción de la complejidad temporal aún más notoria si originalmente los 16 replicadores habrían sido moralmente supervisados por sus respectivos vecinos. En la figura 15 se detallan el DMD y el PCH correspondiente a uno de los cuatro SSP en la CNMR de este experimento.

En las gráficas de esta última figura debe considerarse que los puntos grises corresponden a las RES vecinas de cierta RES central, la cual se caracteriza con puntos negros, y vale la pena mencionar además que la forma y relleno de dichos puntos mantiene el mismo significado detallado previamente.

CONCLUSIÓN

El aporte específico del presente trabajo es un modelo computacional de aprendizaje imitativo comunitario, basado en la replicación neuro-memética de varios SSP, al cual se le denominó

Comunidad de replicadores neuro-meméticos (CNMR). Los resultados experimentales permiten afirmar que la CNMR es un sistema multi-agente mediante el cual se logró mejorar la capacidad aprehensiva de un solo SSP, pues mediante la asociación descentralizada de varios SSP logró imitar completamente una conducta con patrones de baja frecuencia estadística. Además, dicho modelo permite estimar agentes individuales como micro-sociedades de varios Yos artificiales.

Las optimizaciones para reducir su complejidad temporal resultaron satisfactorias; sin embargo, fueron mediadas por el diseñador y en trabajos subsiguientes podrían obtenerse como producto emergente de un sistema evolutivo basado en la selección competitiva, replicación e innovación neuro-memética de varias CNMR, con el propósito de otorgarle autonomía al evaluar y mejorar diversas formas de distribuirle el problema a cierta cantidad de replicadores neuro-meméticos. Además, dicho modelo podría aplicarse en situaciones donde la cooperación debiese emerger mediante

interacciones adicionales al vínculo entre instructor y aprendiz, y más allá del simple acceso público al conocimiento individualmente adquirido.

FINANCIACIÓN

Los resultados presentados en este artículo se obtuvieron durante el desarrollo de la segunda fase del Proyecto Medusa, lo cual fue avalado y financiado por la Corporación Unificada Nacional de Educación Superior (CUN) entre 2012 y 2013.

REFERENCIAS

- Aunger, R. (2004). *El meme eléctrico: Una nueva teoría sobre cómo pensamos*. Barcelona: Paidós.
- Castillo, D.; Escobar, E.; Hermosillo, J., y Lara, B. (2013). Modelado de un sistema de neuronas espejo en un agente autónomo artificial. *Nova Scientia*, 5 (2) (10), 51-72.
- Castillo, M. (2010). Control de motores de C.D. con aprendizaje por imitación basado en redes neuronales. México D.F.
- Feng, L.; Ong, Y.-S.; Tan, A.-H., & Chen, X.-S. (2011). Towards human-like social multi-agents with memetic automaton. En *2011 IEEE Congress on evolutionary computation* (pp. 1092-1099).
- Fernando, C., & Szathmáry, E. (2009). Chemical, neuronal and linguistic replicators. En: *Towards an extended evolutionary synthesis* (pp. 209-249). Cambridge: MIT Press.
- Floreano, D.; Mitri, S.; Perez-Uribe, A., & Keller, L. (2008). Evolution of altruistic robots. En: *Computational intelligence: Research frontiers* (pp. 232-248). Springer-Verlag.
- González, S. (2004). ¿Sociedades artificiales? Una introducción a la simulación social. *Revista internacional de sociología (RIS)*, 62(39), 199-222.
- Lahoz-Beltrá, R. (2004). *Bioinformática: Simulación, vida artificial e inteligencia artificial*. Madrid: Díaz de Santos.
- Maldonado, C., y Gómez, N. (2010). Modelamiento y simulación de sistemas complejos. *Documentos de investigación(66)*. Bogotá, Colombia: Universidad del Rosario.
- Oudeyer, P.-Y., & Kaplan, F. (2007). Language evolution as a Darwinian process: Computational studies. *Cognitive Processing*, 8(1), 21-35.
- Perozo, N. (2011). Modelado multiagente para sistemas emergentes y auto-organizados.
- Sterpin, D. (2011). Perceptrón auto-supervisado: Una red neuronal artificial capaz de replicación memética. *Revista Educación en Ingeniería(12)*, 90-101.





Cinemática inversa de robot serial utilizando algoritmo genético basado en MCDS

Inverse kinematics of a serial robot using SDKM- based genetic algorithm

Juan Jairo Vaca González*
Cristhian Andrés Peña Caro**
Harold Vacca González***

Fecha de recepción: 12 de junio de 2013

Fecha de aceptación: 5 de diciembre de 2014

Citation / Para citar este artículo: Vaca-González, J. J., Peña Caro, C. A., & Vacca-González, H. (2015). Cinemática inversa de robot serial utilizando algoritmo genético basado en MCDS. *Revista Tecnura*, 19(44), 33-45. doi:<http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.2.a02>

Resumen

Los robots manipuladores seriales son herramientas eficaces para realizar tareas repetitivas y de precisión en la industria, siempre que se comprenda la cinemática involucrada en el posicionamiento y orientación del efector final. Este artículo presenta una metodología para resolver el problema cinemático inverso de un robot serial (Melfa RV-2A) utilizando un algoritmo genético (AG) a partir del modelo cinemático directo Screws (MCDS). Para esto, se obtienen los parámetros Screw que modelan el robot, se calcula el espacio de trabajo asociado y se diseña el AG contemplando una función multi-objetivo de alcance de posición y orientación en que se sitúa el efector final, con respecto a una coordenada y orientación de un punto objetivo establecido. La validación del AG se realiza según la aptitud, el tiempo de convergencia y la cantidad de generaciones usadas por la función para alcanzar el objetivo. Por tanto, la implementación de un AG basado en un MCDS es una herramienta que podría

utilizarse para calcular la cinemática inversa de robots seriales. Esta implementación permite establecer por primera vez la exposición matricial de un sistema cinemático directo para obtener la solución cinemática inversa de un robot serial. En consecuencia, se demuestra que esta es una metodología factible y eficiente para solucionar la cinemática inversa de cualquier tipo de robot manipulador.

Palabras clave: algoritmo genético, cinemática directa, cinemática inversa, espacio de trabajo, robot serial, Screws.

Abstract

Serial robotic manipulators are efficient tools to carry out repetitive and precision tasks in industry, as long as there is understanding of the involved kinematics in the positioning and orientation of the final effector. This article presents a methodology to the solution of an inverse kinematic serial robot (Melfa RV-2A) problem through genetic algorithm (GA) implementation using the Screws direct kinematic model (SDKM). In

* Ingeniero de Diseño y Automatización Electrónica, especialista en Diseño Mecatrónico PLM; magíster en Ingeniería Biomédica, estudiante de doctorado en Ingeniería – Ciencia y Tecnología de los Materiales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Contacto: jvacag@unal.edu.co

** Ingeniero de Diseño y Automatización Electrónica, especialista en Diseño Mecatrónico PLM, estudiante de maestría en Ingeniería Mecánica en la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Contacto: crapenaca@unal.edu.co

*** Licenciado en matemáticas, magíster en Matemáticas Aplicadas, docente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Contacto: hvacca@udistrital.edu.co

order to do this, the Screws parameters that model the main four robot joints are obtained, the related workspace is calculated and the GA is designed considering a multi objective function of position and orientation located in the final effector, with respect to a coordinate and orientation of an established target point. The GA validation is carried out according to aptitude, convergence time and number of generations used in order to reach the main objective. Therefore, the implementation of a SDKM-based AG is

a tool that could be used to calculate the inverse kinematic of serial robots. This implementation allows to establishing for the first time the matrix exhibition of a direct kinematic system to obtain the inverse kinematic solution of a serial robot. In consequence, it is demonstrated that this methodology is feasible and efficient to solve the inverse kinematic of any manipulator robot.

Keywords: direct kinematic, genetic algorithm, inverse kinematic, screws, serial robot, workspace.

INTRODUCCIÓN

El creciente uso de robots manipuladores seriales en la industria, como herramienta para tareas repetitivas y de precisión, hace necesario comprender la cinemática involucrada en torno al posicionamiento y orientación del efector final. Cuando esto se tiene, es posible realizar el control y programación de trayectorias para tareas como soldadura, pintura, ensamblaje, entre otras. Así mismo, el estudio del movimiento permite seleccionar la clase de robot manipulador según el tipo y la cantidad de eslabones necesarios para efectuar una tarea específica.

Un robot serial puede ser modelado como una cadena abierta de elementos (eslabones) unidos por ejes de revolución o traslación (articulaciones), en donde cada par eje-eslabón tiene asociada una matriz homogénea con componentes de rotación, traslación, perspectiva y escalamiento (Barrientos, Peñín, Balaguer, & Santoja, 2007). El posicionamiento y orientación del efector final resulta del movimiento relativo de cada eslabón respecto a un sistema de referencia fijo en la base del robot. A partir de un arreglo de parámetros articulares de traslación y/o rotación (cantidad definida por el número de articulaciones), el robot efectúa movimientos que determinan la solución cinemática directa, la cual se puede interpretar como una transformación lineal de vectores en el espacio que se desplazan desde el sistema de referencia origen,

superponiéndose hasta alcanzar el sistema de referencia del efector final. A partir de este análisis se implementan métodos matriciales, como el propuesto por Denavit & Hartenberg en 1955, para identificar los diferentes ejes articulares de cada eslabón del robot. El método de desplazamientos sucesivos Screw, en tanto, establece una solución paramétrica al problema cinemático directo a partir del teorema Chasles y la fórmula de Rodrigues (Murray, Li, & Sastry, 1994); allí se determinan ejes de movimiento, relacionados únicamente con el sistema de referencia base, que una vez acoplados producen los movimientos articulares de donde se deducen la ubicación y orientación del efector final; el método tiene como ventaja poder aplicar el análisis tanto en robots seriales como paralelos (Tsai, 1999).

Por otra parte, la cinemática inversa consiste en obtener las variables articulares necesarias para alcanzar una combinación de posición y orientación deseadas del efector final. La solución ha sido abordada analíticamente por métodos basados en sistemas matriciales 4X4 (Pieper, 1968), o por solución geométrica (Lee & Ziegler, 1984). Es conocido, además, que para robots seriales que sobrepasan una cadena abierta de más de 3 eslabones se pueden obtener sistemas de ecuaciones hasta el orden 32 (Duffy & Crane, 1980), en los cuales existen al menos 16 soluciones complejas (Primrose, 1986). Así mismo, se han presentado métodos de solución iterativos basados en redes

neuronales (Carvalho & Gaspar, 1991; Guez & Ahmad, 1988; Oyama, Chong, Agah, Maeda, & Tachi, 2001); algoritmos evolutivos para un manipulador de puntos individuales (Gibbs, 1996; Khwaja, Rahman, & Wagner, 1998; Parker, Khoo-gar, & Goldberg, 1989); y algoritmos genéticos (Siciliano, Sciavicco, Villani, & Oriolo, 2009), en los cuales se plantean soluciones a variables específicas de cinemática inversa; más recientemente Giraldo, Delgado, & Castellanos, 2006, han aplicado algoritmos genéticos en un brazo robot Scorbot VR plus. Por otro lado, con el objeto de dar solución a las ecuaciones no lineales derivadas del cálculo de la cinemática inversa de robots seriales, la implementación de algoritmos neuro-genéticos ha evidenciado ser una herramienta prometedora (Kalra & Prakash, 2003).

El uso de algoritmos genéticos para la solución de la cinemática inversa de robots seriales se ha enfocado en mejorar la precisión del efector final para alcanzar un punto dado en el espacio. Por ejemplo Köker, en 2013, implementó un algoritmo genético en combinación con una red neuronal para minimizar el error del efector final. Los resultados obtenidos muestran que el modelo implementado mejora la posición del efector final, obteniendo una precisión de micrómetros. Dado que los eslabones de un robot serial pueden tener diferentes orientaciones para llegar al objetivo final, la solución analítica de este problema no lineal se dificulta. En este sentido, el uso de algoritmos genéticos puede tener en cuenta todas las posibles combinaciones y soluciones que hacen que el robot guíe el efector final para alcanzar un punto dado (Tabandeh, Clark, & Melek, 2006; Aguilar & Huegel, 2011; Albert, Koh, Chen, Tiong, & Edwin, 2011).

Como se mencionó antes, se han implementado diferentes algoritmos genéticos para desarrollar la cinemática inversa de robots seriales; sin embargo, los trabajos han basado el análisis del algoritmo genético a partir de sistemas matriciales y geometría tradicional para calcular la orientación del efector final. El presente artículo presenta

la implementación de un algoritmo genético para calcular la cinemática inversa de robots seriales utilizando el modelo cinemático directo Screws (MCDS). Esta novedad permite establecer, por primera vez, la implementación matricial de un sistema cinemático directo para obtener la solución cinemática inversa de un robot serial. Utilizando esta metodología se obtiene de manera más eficiente la solución del problema cinemático inverso de un robot serial (Melfa RV-2A), teniendo en cuenta el alcance y la orientación del efector final. Para llevarla a cabo se analizan cuatro de las seis articulaciones que realizan la tarea establecida y que cumplen con las dimensiones y estructura del robot, descartando las articulaciones que causan redundancia cinemática (Zomaya, 1994), con el objetivo de limitar la cantidad de soluciones posibles (Khalil & Dombre, 2004).

La estructura del artículo se dispone así: MCDS y espacio de trabajo; Materiales y Métodos: Implementación de AG; Pruebas y Resultados de validación del algoritmo; Conclusiones y recomendaciones.

MODELAMIENTO CINEMÁTICO DIRECTO SCREW (MCDS) Y ESPACIO DE TRABAJO

Los fabricantes de robots industriales proveen en sus catálogos las dimensiones y características necesarias para su modelado cinemático o, en su defecto, estas pueden obtenerse a través de medición directa sobre el robot. Si se requiere un grado importante de precisión en los parámetros cinemáticos, estos pueden estimarse mediante técnicas de calibración de robots, tema suficientemente abordado por González & Iglesias, 2002, y Jamshidi, S., Krohling, & Fleming, 2005, entre otros. En el caso que nos ocupa, a partir de las dimensiones del robot dadas por el fabricante (figura 1a), se modela una estructura a escala que representa las distancias entre las diferentes articulaciones. De este modo, se igualan los valores asociados a las dimensiones, rangos de operación y las cuatro

articulaciones rotativas, que permiten alcanzar las coordenadas objetivo de acuerdo con el área de trabajo del robot (figura 1b) para los cuatro eslabones que deben cumplir con la tarea principal establecida (posicionarse y orientarse en una coordenada establecida). En consecuencia, los parámetros obtenidos del modelo del robot permiten representarlo matemáticamente mediante matrices homogéneas, como indica la ecuación (1).

$$T = \begin{bmatrix} {}^A R_B & {}^A q \\ s & K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Rotación} & \text{Traslación} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

La matriz homogénea reúne dos componentes: primero la rotación del sistema de referencia ligado a un eslabón B respecto al sistema anterior A, siendo ${}^A R_B$ una matriz 3X3; y segundo, la coordenada de origen de un sistema de referencia respecto al anterior A (traslación), siendo ${}^A q$ un vector 3X1; los demás componentes: el vector de perspectiva s y constante de escalamiento K , no se utilizan en el modelo, por lo que se asignan los valores arbitrarios señalados en la ecuación (1).

Luego de la anterior modelación, puede ilustrarse que el método de desplazamientos sucesivos de Screw está basado en dos resultados: el teorema de

Chasles y la fórmula de Rodrigues. El primero establece que sin importar cómo el cuerpo rígido sea desplazado de un punto a otro, tal desplazamiento puede considerarse como la suma de una rotación y una traslación alrededor y a lo largo de un eje. El segundo establece que para el desplazamiento general de un cuerpo rígido, dados un ángulo de rotación, una coordenada de traslación y un eje de desplazamiento, es posible encontrar el vector resultante. Esta fórmula se representa matricialmente mediante un vector desplazado ${}^A p$ que resulta de la suma entre la rotación ${}^A R_B$ de un vector ${}^B p$ y una traslación ${}^A q$, como indica la ecuación (2).

$${}^A p = {}^A R_B {}^B p + {}^A q \quad (2)$$

Esta expresión describe la transformación homogénea $A p = A B p$ donde A es una matriz de transformación 4X4.

Cada elemento de esta matriz es derivado de la fórmula de Rodrigues y requiere cuatro parámetros para describir un Screw (parámetros Screw): un vector de posición de origen S_{or} , un vector unitario de dirección S_r , una variable de ángulo de rotación θ y una magnitud variable de desplazamiento t . De este

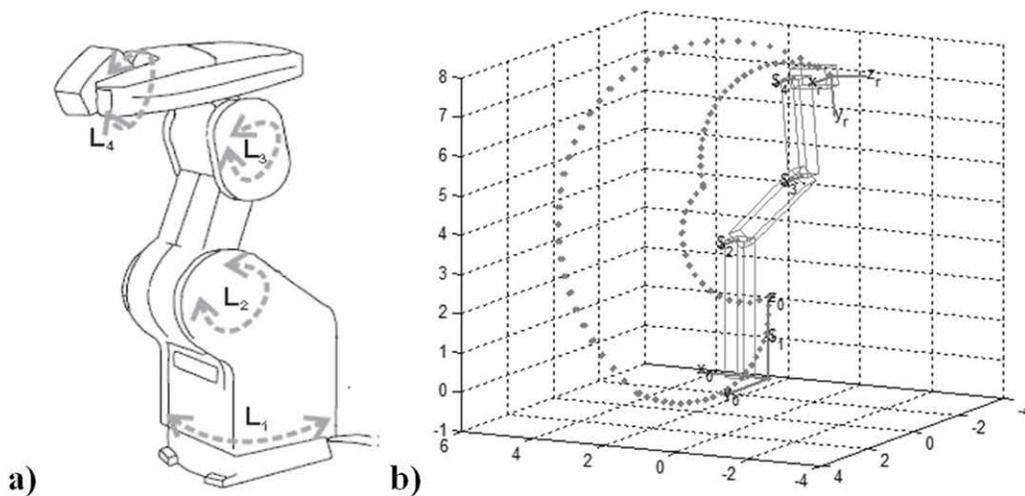


Figura 1. Modelo de la estructura del robot Melfa RV-2A.

Fuente: elaboración propia.

modo, un Screw se describe de acuerdo con la teoría espacial de desplazamiento de un vector (figura 2).

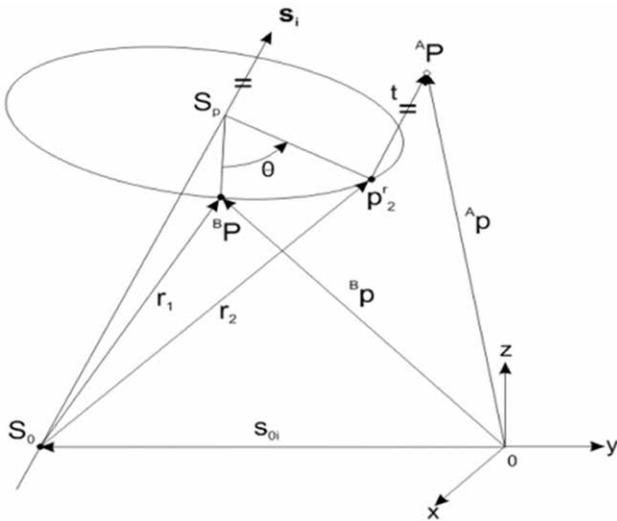


Figura 2. Diagrama del desplazamiento espacial de un vector.

Fuente: Tsai, 1999.

La cinemática directa del brazo robot analiza parte de encontrar los parámetros Screw (tabla 1) asociados a cada uno de los eslabones L_i desde una posición de referencia inicial (Home) del robot (figura 3); estos parámetros involucran la desviación d_i entre la base y la segunda articulación del robot. La magnitud t para todos los eslabones es cero, debido a que no hay articulaciones prismáticas.

Tabla 1. Posición de los ejes Screw y sistema de referencia (Ef) del robot Melfa RV-2A.

| Eslabón | S_i | S_{oi} |
|-------------------|-----------|-----------------------------------|
| 1 | (0, 0, 1) | (0, 0, 0) |
| 2 | (0, 1, 0) | (d_1 , 0, L_1) |
| 3 | (0, 1, 0) | (d_1+L_2 , 0, L_1) |
| 4 | (0, 1, 0) | ($d_1+L_2+L_3$, 0, L_1) |
| Efecto final (Ef) | (0, 0, 0) | ($d_1+L_2+L_3+L_3'$, 0, L_1) |

Fuente: elaboración propia.

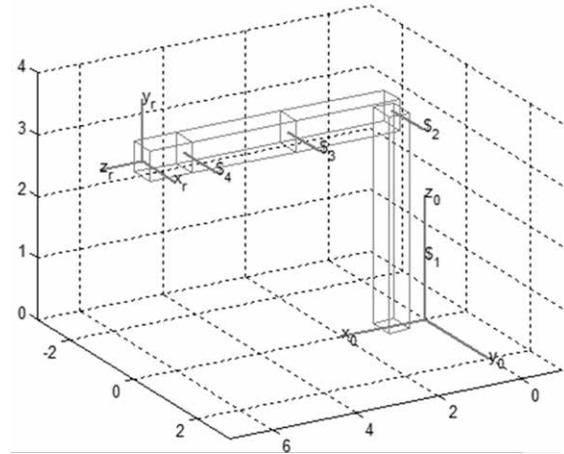


Figura 3. Posición de referencia del robot Melfa RV-2A.

Fuente: elaboración propia.

Los parámetros Screw para el Ef especifican únicamente la coordenada de posición en la que este se situará con respecto al sistema de referencia origen. Para conocer la posición del centro del efecto final P_{Ef} se considera la ecuación (3).

$$P_{Ef} = A_1 A_2 A_3 A_4 [P_0; 1] \quad (3)$$

Las matrices A^1, \dots, A^4 son matrices homogéneas Screw asociadas a cada uno de los eslabones, con parámetros ($S_i, S_{oi}, t_i, \theta_i$). El vector P_0 corresponde a la posición Home (P_{ox}, P_{oy}, P_{oz}) del centro del Ef. De este modo los tres primeros elementos de P_{Ef} indican la coordenada (P_x, P_y, P_z) en la que se ubica el centro del Ef después de un desplazamiento. Para obtener la orientación O_{Ef} del efecto final, se considera la ecuación (4).

$$O_{Ef} = R_1 R_2 R_3 R_4 (-R_0^T) \quad (4)$$

Las matrices R_1, \dots, R_4 corresponden a las matrices de rotación Screw de los eslabones tomadas de las matrices homogéneas A_i . $-R_0^T$ corresponde a la inversa de la matriz de rotación asociada al sistema de referencia del Ef en la posición Home. Con base en los rangos de operación (tabla 2), dados por el fabricante del robot, se obtienen las

posibles posiciones (P_x, P_y, P_z) que puede tomar el E_f , generando de este modo el arreglo de coordenadas que forman el espacio de trabajo (figura 4).

Tabla 2. Rangos de operación en grados para el robot Melfa RV-2A.

| L_1 | L_2 | L_3 | L_4 |
|---------------|--------------|--------------|---------------|
| 320 | 180 | 120 | 240 |
| (-160 a +160) | (-45 a +145) | (+50 a +170) | (-120 a +120) |

Fuente: elaboración propia.

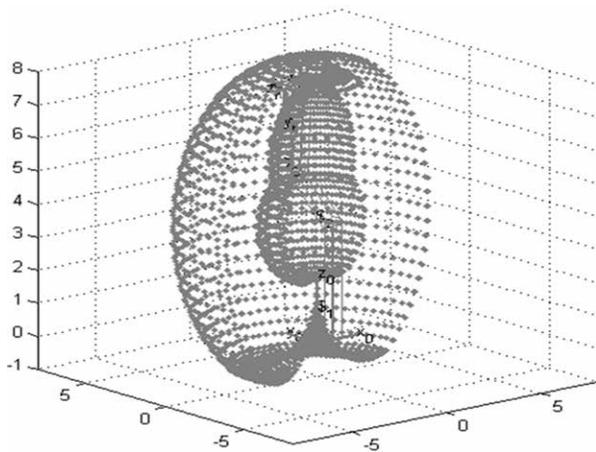


Figura 4. Espacio de trabajo (corte a 160°).

Fuente: elaboración propia.

MATERIALES Y MÉTODOS: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL AG

Un AG es un método de optimización basado en los principios de selección natural y modificación genética, con una estructura que consta de: una población inicial de individuos, una función de aptitud y operadores genéticos (selección, cruce y mutación) (Araujo & Cervigon, 2009). La estructura del AG implementado (figura 5) evidencia el flujo de trabajo seguido para conseguir una solución al problema cinemático inverso a partir de los parámetros de cinemática directa (P_{ef} y O_{ef}) que serán las condiciones de la función de aptitud.

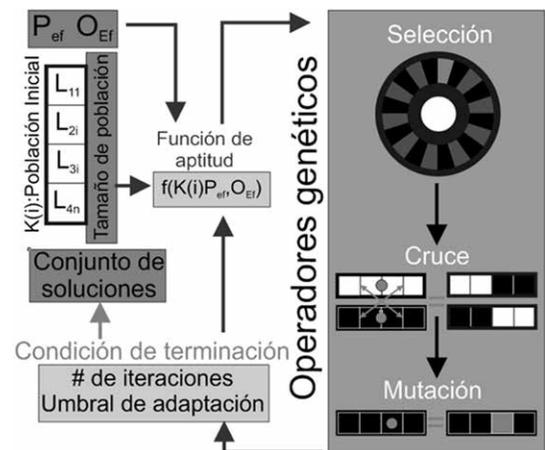


Figura 5. Esquema del AG implementado.

Fuente: elaboración propia.

A continuación se especifica cada uno de los componentes del esquema para el AG implementado.

Población inicial (representación de los individuos)

Cada uno de los arreglos de variables articulares desde L_1 a L_4 son los individuos $K(i)$ de la población inicial, los cuales se definen, en este caso, como una cadena de números enteros que se representan literalmente dentro de los rangos de operación (tabla 2) para cada eslabón. Usualmente se toma una cadena binaria que representa el genotipo del problema, pero debido a que el espacio de búsqueda es equivalente al espacio de trabajo que contiene un número infinito de posibles coordenadas (fenotipo), se selecciona esta representación de individuos, brindando suficiente variedad y precisión para poder explorar todas las zonas del espacio de búsqueda (Araujo y Cervigón, 2009). El tamaño de la población fija se establece de 200 individuos, el cual es un tamaño pequeño que cubre de manera objetiva el espacio de búsqueda.

Función de evaluación

La función de aptitud multi-objetivo debe encontrar un conjunto de respuestas que alcancen

condiciones óptimas de posición y orientación del Ef. Inicialmente se obtienen las variables de cinemática directa (P_{Ef} y O_{Ef}) para cada uno de los individuos $K(i)$ de la población en curso para ser evaluadas de acuerdo con la posición y orientación objetivo ($P_{Ef}(ob)$ y $O_{Ef}(ob)$) dados del Ef. La aptitud de un individuo i según la componente de posición (A_{PEf}), se calcula a partir de la distancia euclidiana (ecuación (5)) entre la posición del Ef de un individuo $P_{Ef}(K_i)$ y $P_{Ef}(ob)$.

$$d(P_{Ef}(K_i), P_{Ef}(ob)) = \sqrt{(p_{x(i)} - p_{x(ob)})^2 + (p_{y(i)} - p_{y(ob)})^2 + (p_{z(i)} - p_{z(ob)})^2} \quad (5)$$

Entonces A_{PEf} para un individuo i se describe en la ecuación (6).

$$A_{PEf}(i) = \frac{d_{max} - d(P_{Ef}(K_i), P_{Ef}(ob))}{d_{max}} \quad (6)$$

Donde d_{max} será la distancia máxima posible entre dos puntos dentro del espacio de trabajo y corresponde a $2(L_2+L_3+L_3)$ que es el diámetro máximo del espacio de trabajo. De este modo A_{PEf} se define como una función de maximización en el rango $0 < A_{PEf} < 1$, donde 0 representa el individuo menos apto (punto más lejano de $P_{Ef}(ob)$) y 1 el más apto (punto más cercano de $P_{Ef}(ob)$).

La aptitud de un individuo según su orientación A_{OEF} se obtiene a partir de la comparación entre la orientación del i -ésimo individuo de la población en curso $O_{Ef}(K_i)$ y $O_{Ef}(ob)$. Entonces A_{OEF} se define a partir de las matrices de orientación asociadas a cada individuo (ecuación (7)).

$$O_{Ef}(K_i) = \begin{bmatrix} \hat{u}_{x(i)} & \hat{v}_{x(i)} & \hat{w}_{x(i)} \\ \hat{u}_{y(i)} & \hat{v}_{y(i)} & \hat{w}_{y(i)} \\ \hat{u}_{z(i)} & \hat{v}_{z(i)} & \hat{w}_{z(i)} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$O_{Ef}(ob) = \begin{bmatrix} \hat{u}_{x(ob)} & \hat{v}_{x(ob)} & \hat{w}_{x(ob)} \\ \hat{u}_{y(ob)} & \hat{v}_{y(ob)} & \hat{w}_{y(ob)} \\ \hat{u}_{z(ob)} & \hat{v}_{z(ob)} & \hat{w}_{z(ob)} \end{bmatrix}$$

Para $O_{Ef}(K_i)$ se obtiene a partir de la ecuación (8).

$$\hat{v}(K_i) = \hat{u}_{(i)} + \hat{v}_{(i)} + \hat{w}_{(i)} \quad (8)$$

Para $O_{Ef}(ob)$ se obtiene a partir de la ecuación (9).

$$\hat{v}(ob) = \hat{u}_{(ob)} + \hat{v}_{(ob)} + \hat{w}_{(ob)} \quad (9)$$

A partir de la suma vectorial de las componentes de las matrices de rotación \hat{u} , \hat{v} y \hat{w} según las ecuaciones (8) y (9), se obtiene A_{OEF} para un individuo i -ésimo según la ecuación (10).

$$A_{OEF}(i) = \frac{(\hat{v}(K_i) \cdot \hat{v}(ob)) + 1}{2} \quad (10)$$

De este modo, la función de A_{OEF} se define como una función de maximización en el rango $0 < A_{OEF}(i) < 1$, donde 0 representa el individuo menos apto ($\hat{v}(K_i)$ paralelo opuesto a $\hat{v}(ob)$) y 1 el mejor individuo apto ($\hat{v}(K_i)$ colineal a $\hat{v}(ob)$) pasando por la condición de ortogonalidad cuando $A_{OEF} = 0.5$.

Por último, la función de aptitud total A_T se define usando las ecuaciones (6) y (10) y se describe en la ecuación (11).

$$A_T(i) = (\alpha * A_{PEf}(i)) + ((1 - \alpha) * A_{OEF}(i)) \quad (11)$$

Donde α es una variable asignada en el rango $0 < \alpha < 1$, que indica el peso que se asigna al objetivo (posición y orientación) dentro de la función de aptitud multi-objetivo. Adicionalmente, se halla la aptitud relativa, ecuación (12), para emplearla en los operadores genéticos.

$$A_{rel}(i) = \frac{A_T(i)}{\sum_1^{K(i)} A_T(i)} \quad (12)$$

Operadores genéticos

A continuación se describen los operadores genéticos implementados.

La *selección* se compone de los métodos de la ruleta y elitismo donde, a partir de la clasificación

descendente de la de la A_{rel} población en curso, 10% de individuos más aptos siempre pasan a la siguiente generación, los individuos restantes se someten a selección por el método de la ruleta según estos pasos:

- Generación de un número aleatorio p que determina la posición de parada de la ruleta.
- Si $\sum A_{rel}(i) > p$ la ruleta se detiene y el individuo $K(i)$ asociado es seleccionado.

El *cruce* es de tipo mono-punto, realizado a partir de la población seleccionada, y consiste en escoger al azar una posición en la cadena de cada par de individuos padre e intercambiar las partes divididas por dicha posición, de tal modo que los individuos generados tengan propiedades

combinadas, lo que puede llevar a mejorar la aptitud en las generaciones posteriores.

La *mutación* consiste en cambiar el valor de una de las posiciones de cada individuo (K_i) solo si la probabilidad de mutación establecida de 10% (umbral) es superada; este método se ejecuta de manera similar al operador de mutación bit a bit, pero en este caso la posición remplazada depende del rango de operación de la articulación L_i que representa, siendo cada nueva posición un número aleatorio comprendido en el rango de operación de la posición seleccionada para mutar.

PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con el objetivo de evaluar el fenotipo del AG, gráficamente en la figura 6 se evidencia cómo,

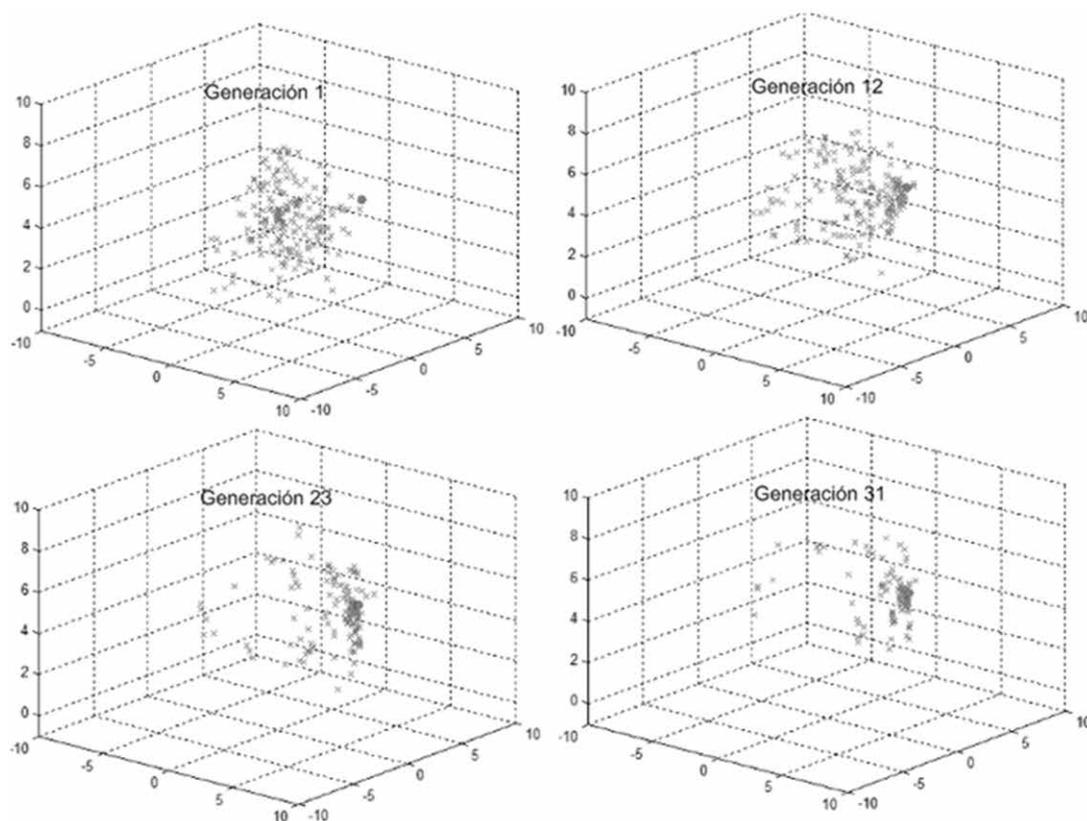


Figura 6. Aproximación a una coordenada objetivo.

Fuente: elaboración propia.

generación tras generación de individuos, el arreglo de coordenadas obtenidas de la implementación del AG (puntos claros) cubre el espacio de búsqueda y confluye en la coordenada objetivo (punto oscuro).

Para comprobar la efectividad del AG implementado, se extrae una muestra de cuarenta coordenadas fijas encerradas dentro del espacio de trabajo, distribuida en dos cortes, como se muestra en la figura 7, de tal modo que se logre cubrir de manera objetiva los rangos de operación del robot. Además, estas coordenadas están ubicadas de modo acorde con una distribución lineal con el objetivo de evaluar la eficiencia del AG.

Como la función de aptitud evalúa paralelamente la orientación de una coordenada para cada individuo, se establece una orientación estándar, según la matriz de rotación de la coordenada objetivo $O_{E_f}(ob)$ para el Ef, que consiste en una rotación en torno al eje X de -125° , de tal modo

que el sistema de coordenadas del efector final sea comparado con el sistema de referencia objetivo basado en $A_{O_{Ef}}(i)$.

Una vez obtenidas las coordenadas y su orientación, cada una se evalúa en el AG para diferentes valores α de peso de la función de aptitud. Las pruebas de aptitud, tiempo de convergencia y resumen de aptitud para la muestra de puntos seleccionados de validación se evalúa para los valores $\alpha = 0, 0.25, 0.5, 0.75$ y 1 . Las condiciones de parada del algoritmo se basan en un umbral de aptitud superior a 95% o cuando se alcance un total de cien iteraciones. En la figura 8 se muestran las gráficas de la aptitud y tiempo de convergencia resultantes de la variación del peso en la función de aptitud. Allí se indican los valores de aptitud máxima, los cuales son la población solución del problema, y la aptitud promedio que indicará la eficiencia de convergencia del AG en cada generación.

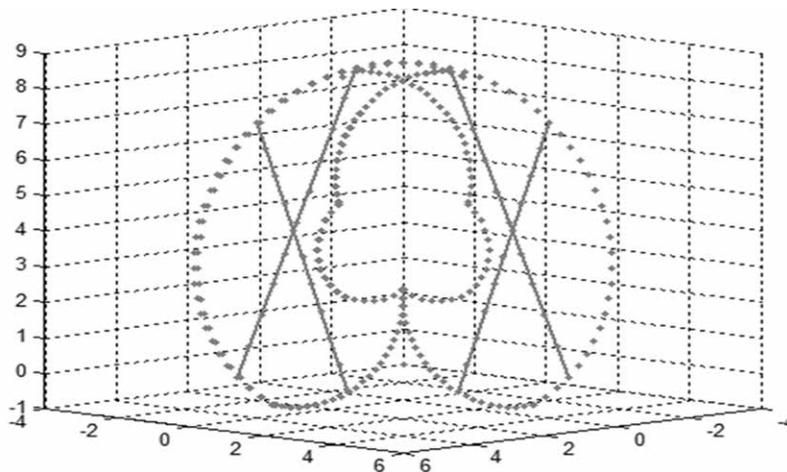


Figura 7. Cortes de prueba 40 puntos de evaluación.

Fuente: elaboración propia.

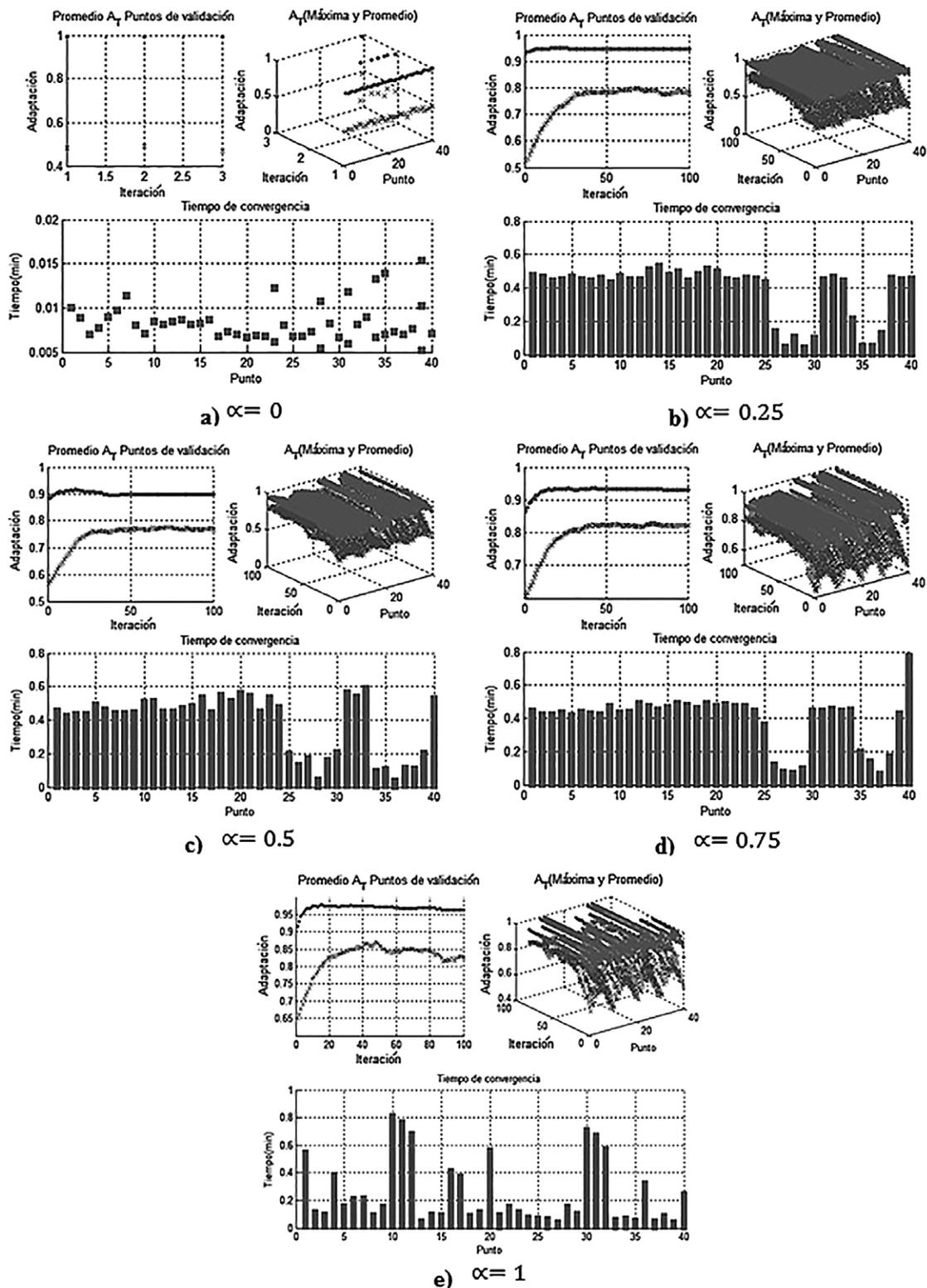


Figura 8. Resultados aptitud y tiempo de convergencia para los valores α establecidos.

Fuente: elaboración propia.

Los resultados demuestran que la evaluación de un solo parámetro (cuando $\alpha = 0$ evalúa solo orientación (figura 8a); y cuando $\alpha = 1$ evalúa solo precisión (figura 8e)); el tiempo de convergencia es, en promedio, el menor de todos los casos debido a que la función de aptitud solo busca un parámetro y el otro parámetro es nulo. Los puntos de mayor dificultad de alcance según el tiempo de convergencia se pueden constatar en la figura 8e. Así mismo al evaluar únicamente la orientación, esta puede hallarse rápidamente, como lo demuestra el tiempo de convergencia en la figura 8a. Se puede concluir que estos valores de α no resuelven el problema conjunto debido a la parcialidad en los resultados, porque al evaluar solo la orientación el Ef puede tomar la orientación objetivo en cualquier coordenada; análogamente, si se evalúa solo el posicionamiento este puede resolverse sin orientar debidamente el Ef. Cuando la función de aptitud tiene un $\alpha = 0.25$ se observa que la componente de orientación aún sigue tomando dominio en la solución, lo que indica que no es un buen equilibrio ponderado para la función de aptitud, porque aunque la tendencia de dicha función es buena, el Ef no alcanzará el correcto posicionamiento del Ef.

En las gráficas de la figura 8c y la figura 8d se evidencia que en el rango $0.5 < \alpha < 0.75$ puede haber un equilibrio justo entre posicionamiento y orientación ya que en los datos relacionados con estas gráficas, el error promedio es inferior a 6%, lo que indica que el AG encuentra mejores soluciones ponderadas para los objetivos planteados. Las gráficas de promedio de aptitud AT de los puntos de validación son la muestra de aptitud máxima y promedio para las coordenadas establecidas, lo que indica la eficiencia del AG. La tendencia de las líneas oscura y clara indica cómo converge el AG, demostrando que se pueden reducir los valores de condición de parada del algoritmo debido a la rapidez en la obtención de una solución viable y establecer nuevas condiciones en torno a la aptitud y el tiempo de convergencia.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Un AG es un método dinámico de optimización para el cual no se han establecido parámetros fijos que garanticen su funcionamiento para cualquier tipo de problema; sus parámetros de entrada y funcionamiento, en efecto, son adaptados de acuerdo con las necesidades de cada problema; en este caso se comprueba que para el problema cinemático inverso, un AG puede resolver de manera eficaz el problema conjunto de precisión y orientación. En comparación con los métodos tradicionales de solución del problema cinemático inverso, un AG, al ser un método iterativo aleatorio, no incrementa su dificultad a medida que aumenta el número de eslabones en serie en el robot manipulador, pudiendo de esta forma resolver rápida y efectivamente el problema cinemático inverso para una cadena abierta de n-eslabones. Así mismo, se puede comprobar la convergencia del AG evaluando varias coordenadas en donde se evidencia que pueden hallarse singularidades de pares posición-orientación, que equivalen a coordenadas alcanzables por el Ef pero que no son plenamente orientables, lo que indica que antes de efectuar una búsqueda conjunta de coordenada-orientación óptimas, se debe conocer la autonomía del robot para determinar de manera efectiva un punto y ser orientado en el mismo. Con la implementación de este AG se puede destacar que se reducen las posibles soluciones a una coordenada específica, ya que el cálculo de la orientación en conjunto con el posicionamiento implica que se reduzcan las posibles combinaciones de variables articulares.

Como trabajo futuro se propone la programación de trayectorias a partir de la interpolación de coordenadas resueltas de cinemática inversa obtenidas de la implementación del AG. Además, se propone establecer un espacio de trabajo que contemple las singularidades resultantes del análisis de autonomía del robot.

Por otra parte, (Bravo, 2012) examina el rendimiento de un algoritmo de búsqueda directa a partir del problema de cinemática inversa de robots manipuladores de diferentes grados de libertad a través de un enfoque evolutivo denominado Differential Evolution. Este trabajo sugiere a futuro insistir en la comparación de resultados obtenidos mediante diferentes métodos de inversión cinemática; así como en la implementación, simulación y comparación de algoritmos de cálculo de la cinemática inversa de robots manipuladores redundantes, móviles, o con mayor número de grados de libertad. Todos caminos válidos a seguir basados en el algoritmo genético aquí presentado.

FINANCIAMIENTO

Grupo de investigación en Ciencias Básicas -SciBas-, de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

REFERENCIAS

- Aguilar, O. A., & Huegel, J. C. (2011). Inverse Kinematics Solution for Robotic Manipulators Using a CUDA-Based Parallel Genetic Algorithm. In I. Batyrshin & G. Sidorov (Eds.), *Advances in Artificial Intelligence* (Vol. 7094, pp. 490-503): Springer Berlin Heidelberg.
- Albert, F. Y. C.; Koh, S. P.; Chen, C. P.; Tiong, S. K., & Edwin, S. Y. S. (2011). *S.Y.S.* Paper presented at the International Conference on Computer Engineering and Applications, Singapore.
- Araujo, L., y Cervigon, C. (2009). *Algoritmos evolutivos: Un enfoque práctico* (Vol. 1). Madrid: Ed. RaMa.
- Barrientos, A.; Peñín, L. F.; Balaguer, C., & Santoja, R. A. (2007). *Fundamentos de robótica* (Vol. 2). Aravaca, Madrid: McGraw-Hill.
- Bravo, S. Á. (2012). *Evaluación de técnicas evolutivas en el cálculo de la cinemática inversa de robots manipuladores*. Ingeniería Técnica en Electrónica, Universidad Carlos III de Madrid.
- Carvalho, L., & Gaspar, E. (1991). *The solution of the inverse kinematic problem of robot arm with neural networks*. Paper presented at the IX Brazilian Congress on Mechanical Engineering, Brasil.
- Denavit, J., & Hartenberg, R. S. (1955). A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices. *Journal of Applied Mechanics*, 22, 215-221.
- Duffy, J., & Crane, C. (1980). A displacement analysis of the general spatial 7-link, 7R mechanism. *Mechanism and Machine Theory*, 15(3), 153-169.
- Gibbs, J. (1996). *Easy inverse kinematics using genetic programming*. Paper presented at the GP-96 Conference.
- Giraldo, L.; Delgado, E., y Castellanos, G. (2006). Cinemática Inversa de un Brazo Robot Utilizando Algoritmos Genéticos. *Revista Avances en Sistemas e Informática*, 3(1), 29-34.
- Gonzálvez, B. A., e Iglesias, J. I. C. (2002). *Identificación de parámetros cinemáticos de un robot industrial mediante un sistema de rastreo láser*. PhD, Universidad Politécnica de Valencia.
- Guez, A., & Ahmad, Z. (1988). *Solution to the inverse kinematics problem in robotics by neural networks*. Paper presented at the International Conference on Neural Networks, San Diego, Ca.
- Jamshidi, M., S., C. d.; Krohling, A. R., & Fleming, J. P. (2005). Robust Control systems with genetic algorithms. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 15(7), 210.
- Kalra, P., & Prakash, N. R. (2003). A Neuro-genetic Algorithm Approach for solving the inverse kinematics of Robotic Manipulators. *Systems, Man and Cybernetics, 2003. IEEE International Conference*, 2, 1979-1984.
- Khalil, W., & Dombre, E. (2004). Chapter 6—Inverse kinematic model of serial robots. In W. Khalil & E. Dombre (Eds.), *Modeling, Identification and Control of Robots* (pp. 117-144). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Khwaja, A. A.; Rahman, M. O., & Wagner, M. G. (1998). Inverse Kinematics of Arbitrary Robotic Manipulators Using Genetic Algorithms. In J. Lenarčič & M. Husty (Eds.), *Advances in Robot Kinematics: Analysis and Control* (pp. 375-382): Springer Netherlands.

- Köker, R. (2013). A genetic algorithm approach to a neural-network-based inverse kinematics solution of robotic manipulators based on error minimization. *Information Sciences*, 222, 528-543.
- Lee, C., & Ziegler, M. (1984). Geometric approach in solving inverse kinematics of puma robots. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 20(5), 1-27.
- Murray, R. M.; Li, Z., & Sastry, S. S. (1994). *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation* (Vol. 2): CRC Press.
- Oyama, E.; Chong, N.; Agah, A.; Maeda, T., & Tachi, S. (2001). *Inverse kinematics learning by modular architecture neural networks with performance prediction networks*. Paper presented at the International Conference on Robotics and Automation.
- Parker, J.; Khoogar, A., & Goldberg, D. (1989). *Inverse kinematics of redundant robots using genetic algorithms*. Paper presented at the International Conference on Robotics and Automation.
- Pieper, L. D. (1968). *The kinematics of manipulators under computer control*. PhD, Stanford University (457).
- Primrose, E. J. F. (1986). On the input-output equation of the general 7R-mechanism. *Mechanism and Machine Theory*, 21(6), 509-510.
- Siciliano, B.; Sciavicco, L.; Villani, L., & Oriolo, G. (2009). *Robotics: Modelling, Planning and Control* (Vol. 1). London: Springer-Verlag.
- Tabandeh, S.; Clark, C., & Melek, W. (2006). *A Genetic Algorithm Approach to solve for Multiple Solutions of Inverse Kinematics using Adaptive Niching and Clustering*. Paper presented at the IEEE Congress on Evolutionary Computation, Sheraton Vancouver Wall Centre Hotel, Vancouver, BC, Canada.
- Tsai, L. W. (1999). *Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators* (Vol. 1). New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Zomaya, A. (1994). Transputer Ensembles for Embedded Robotics Computations. *Transputer Communications*, 2, 151-170.





PCA/DFT como herramienta de pronóstico para series temporales de absorbancia registradas mediante captosres UV-Vis en sistemas de saneamiento urbano

PCA/DFT as forecasting tools for absorbance time series received by UV-Vis probes in urban sewer systems

Leonardo Plazas-Nossa*, Andrés Torres**

Fecha de recepción: 12 de junio de 2014

Fecha de aceptación: 19 de enero de 2015

Citation / Para citar este artículo: Plazas-Nossa, L., & Torres, A. (2015). PCA/DFT como herramienta de pronóstico para series temporales de absorbancia registradas mediante captosres UV-Vis en sistemas de saneamiento urbano. *Revista Tecnura*, 19(44), 47-57. doi:<http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.2.a03>

Resumen

El objetivo de este trabajo es presentar un método de pronóstico para series de tiempo de espectrometría UV-Vis, combinando el análisis de componentes principales PCA (*Principal Component Analysis*), la transformada discreta de Fourier, DFT (*Discrete Fourier Transform*) y la transformada inversa de Fourier, IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*). Se utilizaron las correspondientes series de tiempo de absorbancia para tres diferentes sitios de estudio: (i) Planta de tratamiento de aguas residuales Salitre (PTAR) en Bogotá; (ii) Estación elevadora de Gibraltar en Bogotá; y (iii) Planta de tratamiento de aguas residuales San Fernando (PTAR) en Itagüí (parte sur de Medellín). Cada una de las series de tiempo tiene igual número de muestras (5705). Al reducir la dimensionalidad de las series de tiempo de absorbancia con PCA, se utilizan para cada sitio de estudio 3, 5 y 6 componentes principales, respectivamente; explicando en conjunto más de 97% de la variabilidad. Se utiliza en el procedimiento DFT e IFFT el armónico más

importante y se remueven desde uno hasta la mitad de los valores de la longitud total de las series de tiempo. Por consiguiente, los errores de pronóstico para los tres sitios de estudio y para tres rangos de longitudes de onda propuestos (UV, Vis y UV-Vis) están comprendidos entre 0,01% y 34% para 95% de los casos. Sin embargo, para 100% de los casos los errores son inferiores a 37%, independientemente de la longitud de onda y del tiempo de pronóstico.

Palabras clave: absorbancia, análisis por componentes principales, captor UV-Vis, pronóstico, transformada de Fourier.

Abstract

The purpose of this work is to introduce a forecasting method for UV-Vis spectrometry time series that combines principal component analysis (PCA), the discrete Fourier transform (DFT) and the inverse fast Fourier transform (IFFT). The corresponding absorbance time series were used for three different study sites: (i) Salitre wastewater treatment plant (WWTP)

* Ingeniero electrónico, magíster en Teleinformática, docente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Contacto: lpplazasn@udistrital.edu.co

** Ingeniero civil, especialista en gestión de ingeniería, magíster en Ingeniería Civil, doctor en Ingeniería, docente de la Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Contacto: andres.torres@javeriana.edu.co

in Bogotá; (ii) Gibraltar pumping station in Bogotá; and (iii) San Fernando WWTP in Itagüí (in the southern part of Medellín). Each of these time series had an equal number of samples (5705). By reducing the absorbance time series dimensionality with PCA, 3, 5 and 6 principal components were used for each study site respectively; these altogether explain more than 97% of the variability. It was used the most important harmonic given by the DFT and the IFFT

procedure, which removed from one to half values of the time series length. Therefore, forecast errors between 0,01% and 34% for 95% of the cases were obtained for the three study sites and the wavelength ranges (UV, Vis and UV-Vis). However, for 100% of the cases errors were lower than 37%, independently of the wavelength and the forecasting time.

Keywords: absorbance, forecasting, Fourier transform, principal component analysis, UV-Vis sensor.

INTRODUCCIÓN

Los desarrollos en óptica y electrónica en los últimos años han permitido la mezcla o unión de la espectrometría UV-Vis de espectro completo con instrumentos robustos a pequeña escala, con el fin de monitorizar en línea la calidad del agua (van den Broeke, 2007). Los captosres UV-Vis son sondas que registran la atenuación de la luz (absorbancia) y proporcionan resultados de la calidad del agua en relativo tiempo continuo (del orden de una señal/minuto). En el caso específico de plantas de tratamiento de aguas residuales o combinadas (PTAR), la espectrometría UV-Vis en línea (219 longitudes de onda en el rango de *UV* hasta *Visible*: 200-745 nm, con pasos de 2,5 nm) puede utilizarse para la monitorización y el control en las entradas y salidas de dichas plantas, así como para monitorizar las diferentes etapas del tratamiento, con el propósito de determinar las dinámicas de las cargas y eficiencias de remoción de materiales orgánicos (como DQO y DBO₅), nitratos, nitritos y sólidos suspendidos totales (SST) (Rieger, Langergraber, Thomann, Fleischmann, & Siegrist, 2004) (Gruber, Bertrand-Krajewski, De Beneditis, Hochedlinger, & Lettl, 2006), a escalas temporales adecuadas y eventualmente utilizar esa información en tiempo real. Además de los métodos utilizados para la calibración de los captosres (Torres, Lepot, & Bertrand-Krajewski, 2013) (Salgado, Pinheiro, Ferreira, Saldanha, & Louren, 2013) y el análisis de las series de tiempo de espectros de

absorbancia UV-Vis, se requiere desarrollar métodos de pronóstico con el fin de utilizar la monitorización en línea para el control en tiempo real. Si bien en otros estudios se ha utilizado la FFT como complemento a la lógica difusa para el pronóstico de índices de inversión (*Taiwan Stock Exchange* y *Dow-Jones Industrial Average*) (Chen & Chen, 2014), para combinarlas con la metodología Box-Jenkins y realizar pronósticos al sistema de administración de tráfico aéreo (Di Gravio, Mancini, Patriarca, & Costantino, 2015), o modelos ARI-MA combinados con el análisis de Fourier para efectuar pronósticos al consumo y producción de energía en China (Xiong, Dang, Yao, & Wang, 2014), en conocimiento de los autores del presente artículo, la FFT no se ha utilizado en pronóstico de calidad de aguas. Por otro lado, la utilización de FFT para el pronóstico de series de tiempo UV-Vis implica lidiar con un número importante de variables equivalente al número de longitudes de onda. Por consiguiente, la utilización de análisis por componentes principales podría ser una opción. En efecto, dicho análisis, que se ha empleado en numerosos estudios (ver, por ejemplo (Leonardi & Van De Ville, 2015) (He, Zhao, Zhang, Ogawa, & Haseyama, 2014)), permite reducir la dimensionalidad de un conjunto de variables.

El presente trabajo tiene como objetivo analizar los espectros de las series de tiempo de absorbancia recibidos por los captosres UV-Vis instalados en sistemas de saneamiento urbano, aplicando la metodología PCA para reducir la dimensionalidad del

problema y utilizar dicho análisis como base para el pronóstico por medio de DFT y la IFFT. El análisis propuesto se realizó para tres bases de datos de espectros de absorbanza UV-Vis adquiridos en los siguientes puntos: (i) afluente a la PTAR-Salitre, Bogotá, D.C.; (ii) Estación Elevadora Gibraltar, Bogotá, D.C.; (iii) afluente a la PTAR San Fernando, Itagüí (área metropolitana de Medellín).

MATERIALES Y MÉTODOS

Los captadores UV-Vis utilizados (spectro::lyser™) son sondas sumergibles de aproximadamente 64,7 cm de longitud y 44 mm de diámetro, los cuales registran la atenuación de la luz (absorbanza) en relativo tiempo continuo (del orden de una señal/minuto) a partir de una fuente luminosa proporcionada por una lámpara de xenón. Los valores del espectro se encuentran entre 200 nm y 750 nm de longitud de onda, con intervalos de 2,5 nm (Langergraber,

Fleischmann, Hofstaedter, & Weingartner, 2004). El análisis que se presenta a continuación se realizó para las series de tiempo de espectros de absorbanza compuestas por 5705 registros en cada sitio de muestro (ver la figura 1): (i) para PTAR-Salitre (Bogotá, D.C.) del 29 de junio de 2011 a las 09:03 h al 3 de julio de 2011 a las 17:33 h (una muestra por minuto); (ii) para la Estación Elevadora de Gibraltar (EEG) del 18 de octubre de 2011 a las 11:08 h al 22 de octubre de 2011 a las 15:21 h (una muestra por minuto) y (iii) PTAR San Fernando de 24 de septiembre de 2011 a las 06:04 h a 2 de octubre de 2011 a las 9:16 h (una muestra cada dos minutos). En este trabajo no se hace distinción entre tiempo seco o de lluvia, dado que se propone realizar el pronóstico de los espectros de absorbanza UV-Vis incluyendo las condiciones anteriores en los hidrosistemas urbanos en análisis, además de evaluar los límites del método propuesto para incluir todas las posibles condiciones que se puedan presentar.

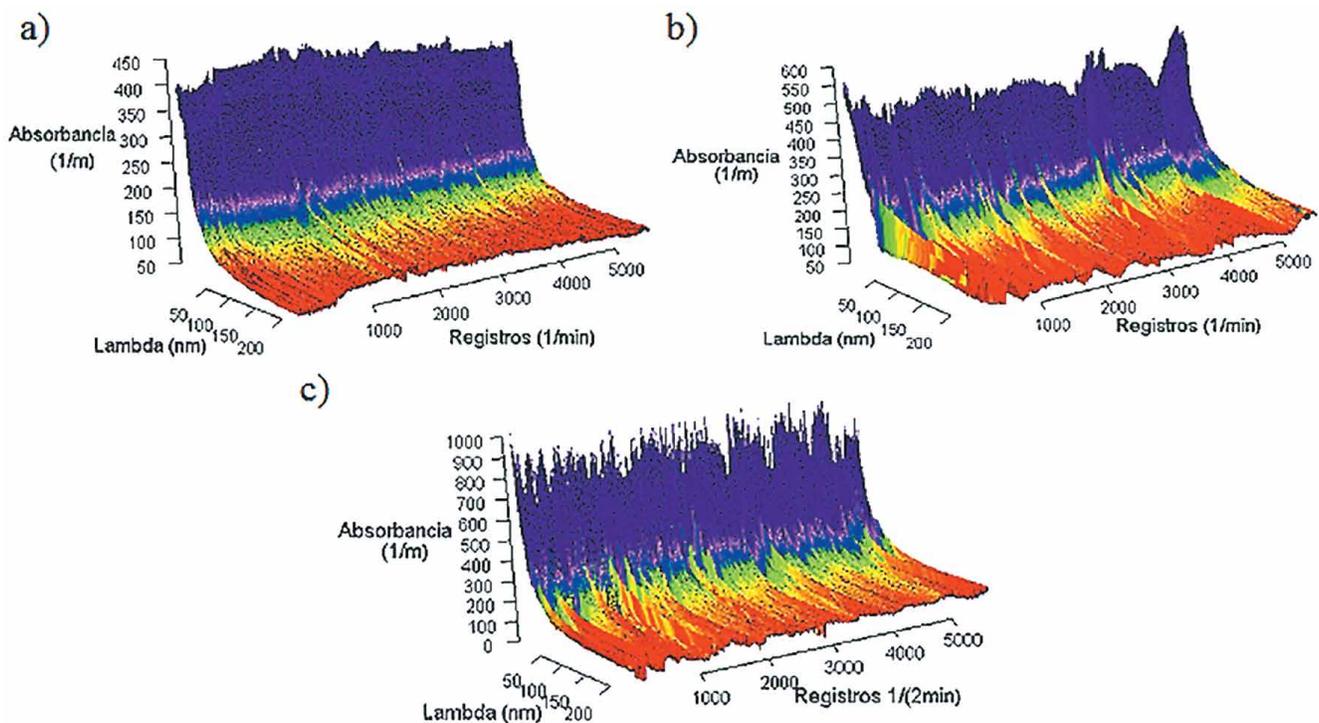


Figura 1. Series de tiempo de absorbanza para PTAR Salitre (a), EEG (b) y PTAR San Fernando (c).

Fuente: elaboración propia.

Análisis por componentes principales (PCA)

El PCA realiza una transformación lineal, encontrando un nuevo sistema de coordenadas a partir del conjunto original de datos. En este nuevo sistema de coordenadas la varianza de mayor valor del conjunto de datos es capturada por el primer eje, llamado primer componente principal; la segunda mayor varianza es capturada por el segundo eje, y así sucesivamente. Para construir esta transformación lineal se debe construir primero la matriz de covarianza o la matriz de coeficientes de correlación (Shlens, 2009). El objetivo es transformar un conjunto dado de datos X con dimensiones $n \times m$, donde n es el número de observaciones y m el número de variables, a otro conjunto de datos de menor dimensión $n \times l$, donde n sigue siendo el número de observaciones y l es el número de componentes principales, siendo menor que m y con la menor pérdida posible de cantidad de información útil. El proceso comienza calculando la matriz de covarianza, ecuación (1).

$$COV(S_{xy}) = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N [(x(n) - \bar{X})(y(n) - \bar{Y})] \quad (1)$$

donde N es el número total de datos y n es cada uno de los valores en la matriz.

Los datos para el análisis deben tener media cero, lo que se obtiene al restar cada dato del promedio de cada columna, como se indica en la ecuación (2).

$$Datos_Ajustados = X_i - \bar{X} \quad i = 1, \dots, n \quad (2)$$

donde i hace referencia al valor de cada columna en la matriz.

Sin embargo, con el fin de estandarizar los datos, se recomienda que los datos estén en valores de auto-escala, los cuales se calculan como se indica en la ecuación (3).

$$Datos_Auto-escala = \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma} \quad i = 1, \dots, n \quad (3)$$

donde i hace referencia al valor de cada columna en la matriz.

Es necesario calcular los autovalores (*eigenvalues*) y autovectores (*eigenvectors*), con el fin de obtener las componentes principales (PC – *Principal Component*), como se indica en la ecuación (4).

$$PC = Eigen_Vectors(Cov(X))^T \cdot Datos_Auto-escala \quad (4)$$

Se aplica el criterio del “codo” con el fin de seleccionar el número de componentes principales a utilizar. Este criterio indica que los valores propios asociados a cada componente principal y superiores a uno se incluirán en el número de componentes principales que capturen la mayor variabilidad de los datos con la menor pérdida de información (Peña, 2002). Como ejemplo de este criterio de selección, la figura 2(a) presenta los valores de valor

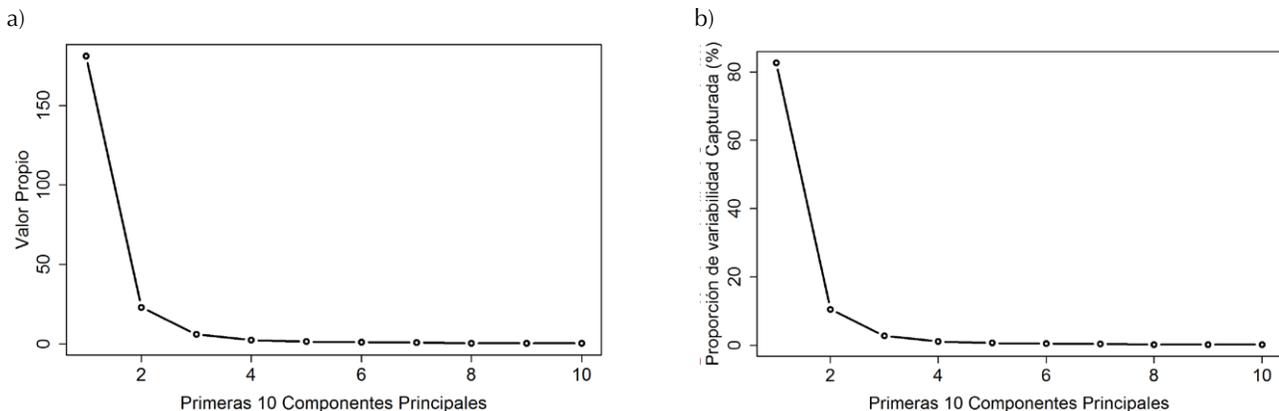


Figura 2. Valores propios (a) y porcentaje de variabilidad capturada (b) para el sitio de estudio EPM.

Fuente: elaboración propia.

propio y en la figura 2(b) se presenta el porcentaje de proporción de variabilidad capturada para el sitio de estudio PTAR San Fernando y en este, por el criterio del codo se utilizan seis componentes principales.

Se requiere reconstruir los datos (en términos de las dimensiones originales) mediante el uso de las componentes principales utilizando la ecuación (5); esta ecuación se aplicará después de haber utilizado el proceso de transformación del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, efectuar el pronóstico, aplicar la transformada inversa del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo (ver Procedimiento DFT).

$$Data_{PC} = \sigma \cdot (Eigen_Vectors^T)^{-1} \cdot PC + promedio \quad (5)$$

Procedimiento DFT

Se emplea el análisis espectral para encontrar las periodicidades presentes en las series de tiempo, utilizando la DFT (Proakis & Manolakis, 2006), con el fin de efectuar la transformación del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. La metodología propuesta consiste en seleccionar los armónicos (señales periódicas) con base en su importancia, evaluada según su amplitud. Después se realiza la eliminación de armónicos de menor a mayor importancia, para finalmente regresar al dominio del tiempo usando IFFT (Proakis &

Manolakis, 2006). Esto se hace para todas las componentes principales obtenidas por el proceso PCA y para todos los armónicos; desde el último armónico que es igual a la mitad de longitud de la serie de tiempo hasta el armónico-cero, que es el promedio de la señal en el dominio de tiempo y es el único componente sistemáticamente tomado en cuenta para todos los análisis.

El procedimiento, siguiendo el diagrama de flujo de la figura 3, comienza retirando para cada componente principal (datos) (partes A-B), desde 1 hasta 2852 valores para obtener el pronóstico de valores calculados mediante los armónicos DFT (parte C, figura 3). De acuerdo con análisis previos efectuados, teniendo en cuenta de uno a diez armónicos importantes, se estableció que es suficiente la utilización del armónico más importante con el fin de realizar el pronóstico. Además esto tiene implicaciones con el fin de reducir tiempos computacionales, lo cual es un factor importante en sistemas de control en tiempo real y enfoque del presente método. Por tanto, se considera el armónico más importante (partes D, E y F, figura 3), retornando al dominio del tiempo utilizando la IFFT (parte G, figura 3).

Procedimiento PCA/DFT

El procedimiento, siguiendo el diagrama de flujo de la figura 4, cargando las series de tiempo (A), se aplica el procedimiento PCA con el fin de obtener

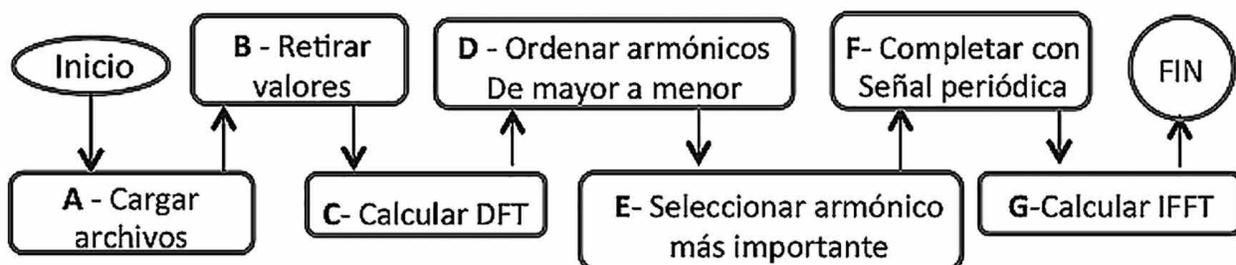


Figura 3. Diagrama de flujo del proceso DFT aplicado a cada componente principal PCA.

Fuente: elaboración propia.

los componentes principales que corresponden a los valores propios de la matriz de covarianza (criterio de codo), PCA/DFT consiste en aplicar el procedimiento DFT antes explicado a los valores obtenidos mediante la ecuación (4) (parte B, figura 4). Se aplica el procedimiento DFT, donde el pronóstico se realiza sobre los componentes principales (PCA) en vez de las series temporales de absorbancia (pasar de series temporales de 219 longitudes de onda a series temporales de algunos componentes principales, por ejemplo 2 o 3). Se hace la extracción desde el primero hasta la mitad de los valores de las series temporales de PCA; para cada serie de tiempo se aplica la DFT, obteniendo una ecuación periódica utilizada para calcular los valores de los elementos retirados en la serie original de PCA. Se procede con el retorno al dominio del tiempo efectuado mediante la IFFT (Proakis & Manolakis, 2006) (parte C, figura 4). Se aplica la transformación inversa PCA, utilizando la ecuación (5), a los valores pronosticados (parte D, figura 4). Finalmente, se debe comparar la serie de tiempo original con la serie de tiempo pronosticada (PCA/DFT) por medio de la desviación de la raíz media cuadrática normalizada (*Normalized Root-Mean-Square deviation*, NRMSD) presentada en la ecuación (6) (Liu, 2015) (O'Donncha, Hartnett, Nash, Ren, & Ragnoli, 2015).

$$NRMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Val_{IFFTi} - Val_{STi})^2}{n}} \cdot 100 \quad (6)$$

En la ecuación (6), Val_{STi} es el valor de absorbancia de la serie de tiempo original para el tiempo i , Val_{IFFTi} es el valor de absorbancia procesado para el i -ésimo tiempo y $Obs_{max} - Obs_{min}$ es el rango de amplitud de la serie de tiempo original (partes E y F, figura 4).

Todos los procedimientos explicados se efectúan para rangos de longitudes de onda en grupos UV (200 nm–380 nm), visible (Vis) (382,5 nm–745 nm) y UV-Vis (200 nm–745 nm) como se registra en la tabla 1 (Thomas & Burgess, 2007).

Tabla 1. Grupos de rangos de longitudes de onda para UV, Vis y UV-Vis y tipo general de contaminantes.

| Espectro | Rangos longitud de onda (nm) | Parámetros |
|----------|------------------------------|--|
| UV | 200-380 | Materia orgánica |
| Vis | 382,5-745 | Sólidos en suspensión |
| UV-Vis | 200-745 | Materia orgánica y sólidos en suspensión |

Fuente: elaboración propia.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tabla 2 muestra el número de componentes principales necesarios para capturar más de 97% de la variabilidad en las tres series de tiempo utilizadas. Esto implica una reducción en el tiempo de análisis y procesamiento de series de tiempo de absorbancia si se requiere aplicar en tiempo real.

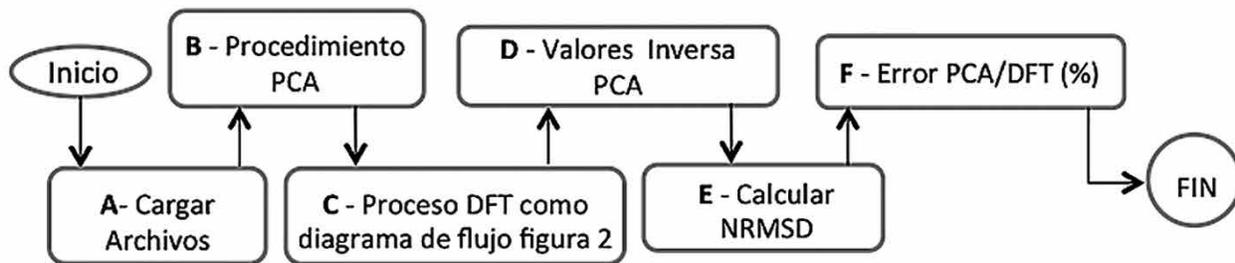


Figura 4. Diagrama de flujo del procedimiento PCA/DFT.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Número de PC (*Principal Component*) por utilizar y porcentaje de variabilidad capturada.

| Sitio de estudio | PC | (%) Variabilidad capturada |
|-------------------|----|----------------------------|
| PTAR Salitre | 3 | 97,7 |
| EEG | 5 | 97,6 |
| PTAR San Fernando | 6 | 97,6 |

Fuente: elaboración propia.

Al utilizar la metodología a cada una de las componentes principales seleccionadas según los valores de la tabla 2, se aplica el proceso DFT y se

pronostican desde uno hasta 2852 valores de absorbancia para cada una de las 219 longitudes de onda y para cada uno de los sitios de estudio. En la figura 5 se ilustra la primera longitud de onda (200 nm) para cada sitio de estudio, la serie de tiempo original (línea negro) y los valores de pronóstico para el máximo rango de tiempo (línea roja) 2852 minutos PTAR-Salitre y EEG y 5704 para PTAR San Fernando, y a partir de las dos curvas (original y pronosticada) se calcula y se obtiene la desviación de la raíz media cuadrática normalizada (NRMSD ecuación (6)). Se efectúa el análisis para cada rango de longitudes de onda propuesto UV, Vis y UV-Vis.

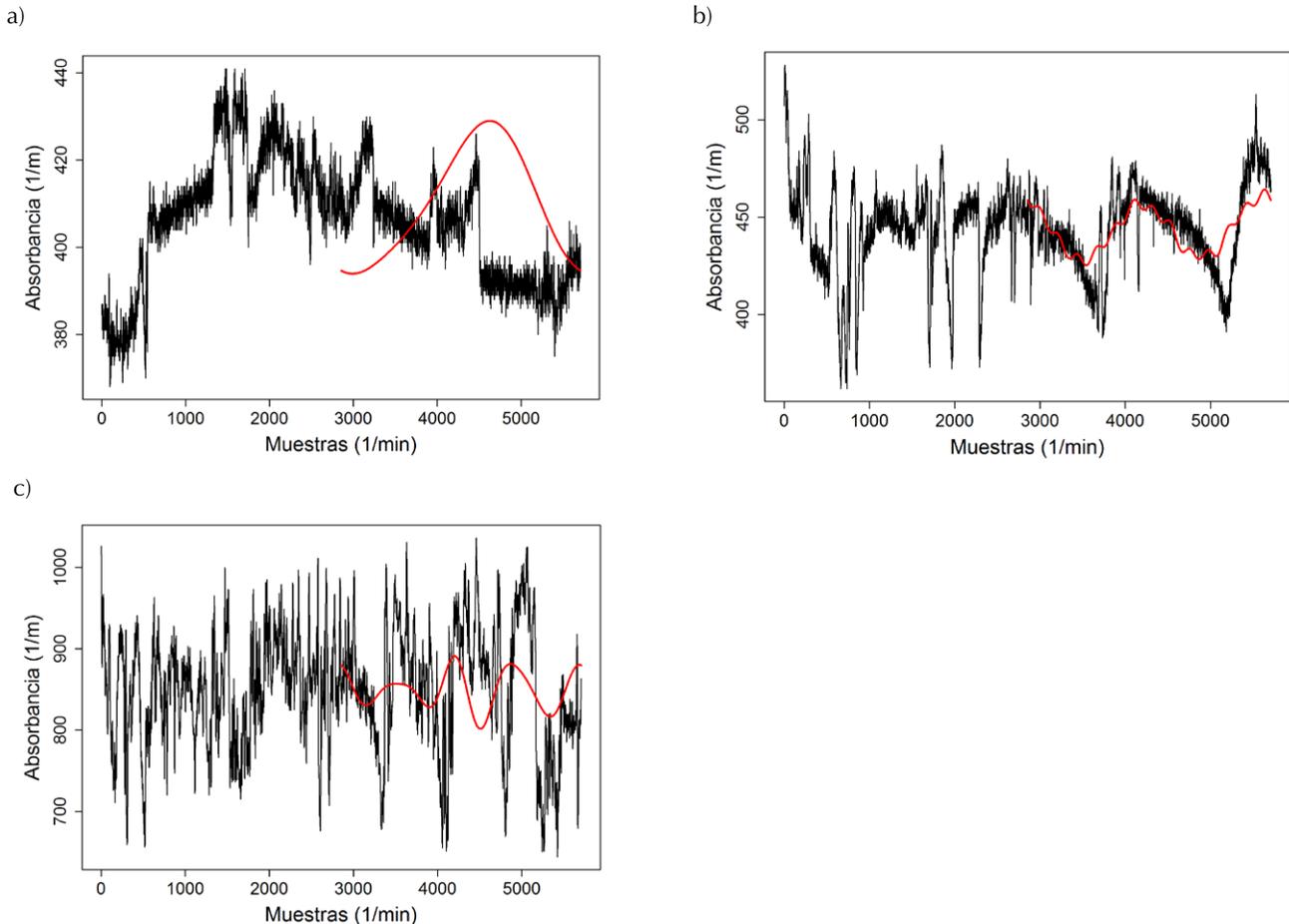


Figura 5. Serie de tiempo original y valores de absorbancia pronosticados para la longitud de onda 200 nm para (a) PTAR-Salitre, (b) EEG y (c) PTAR San Fernando.

Fuente: elaboración propia.

La figura 6 muestra los tres rangos de longitudes de onda analizados, UV, Vis y UV-Vis, para PTAR-Salitre. Similares resultados se obtuvieron para los sitios de estudios EEG y PTAR San Fernando.

En el rango UV (figura 6(a)), se observa que para todo el rango de pronóstico 2852 minutos y para las longitudes de onda entre 200 nm y 230 nm no superan 15% y el rango desde 232,5 nm hasta 380 nm y para 240 minutos (4 h) de pronóstico los errores no superan 10%. En el rango Vis (figura 6(b)), se observa que para todo el rango de longitudes de onda y para 300 minutos (5 h) de pronóstico los errores no superan 10%, desde 300 minutos (5 h) hasta 500 minutos (8h, 20 min) de pronóstico los errores no superan 15% y desde 500 minutos hasta 1000 minutos (16h, 40 min) de pronóstico los errores no superan 20%. En el espectro completo

UV-Vis (figura 6(c)), se observa que para todo el rango y para 300 minutos (5 h) de pronóstico los errores no superan 10%, desde 300 minutos (5 h) hasta 500 minutos (8h, 20 min) de pronóstico los errores no superan 15% y desde 500 minutos hasta 1200 minutos (20 h) de pronóstico los errores no superan 20%.

En el sitio de estudio EEG, los resultados obtenidos para todo el período de pronóstico, 2852 minutos, en el rango UV y específicamente desde la longitud de onda de 200 nm hasta 225 nm los errores no superan 20%, y para las longitudes de onda desde 227,5 nm hasta 380 nm los errores no superan 31%. Para todo el rango Vis y hasta el tiempo de pronóstico 500 minutos (8h, 20 min) los errores no superan 23% y desde 500 minutos hasta 800 minutos (13h, 20 min) de pronóstico, los errores no superan 37%. Para el rango UV-Vis

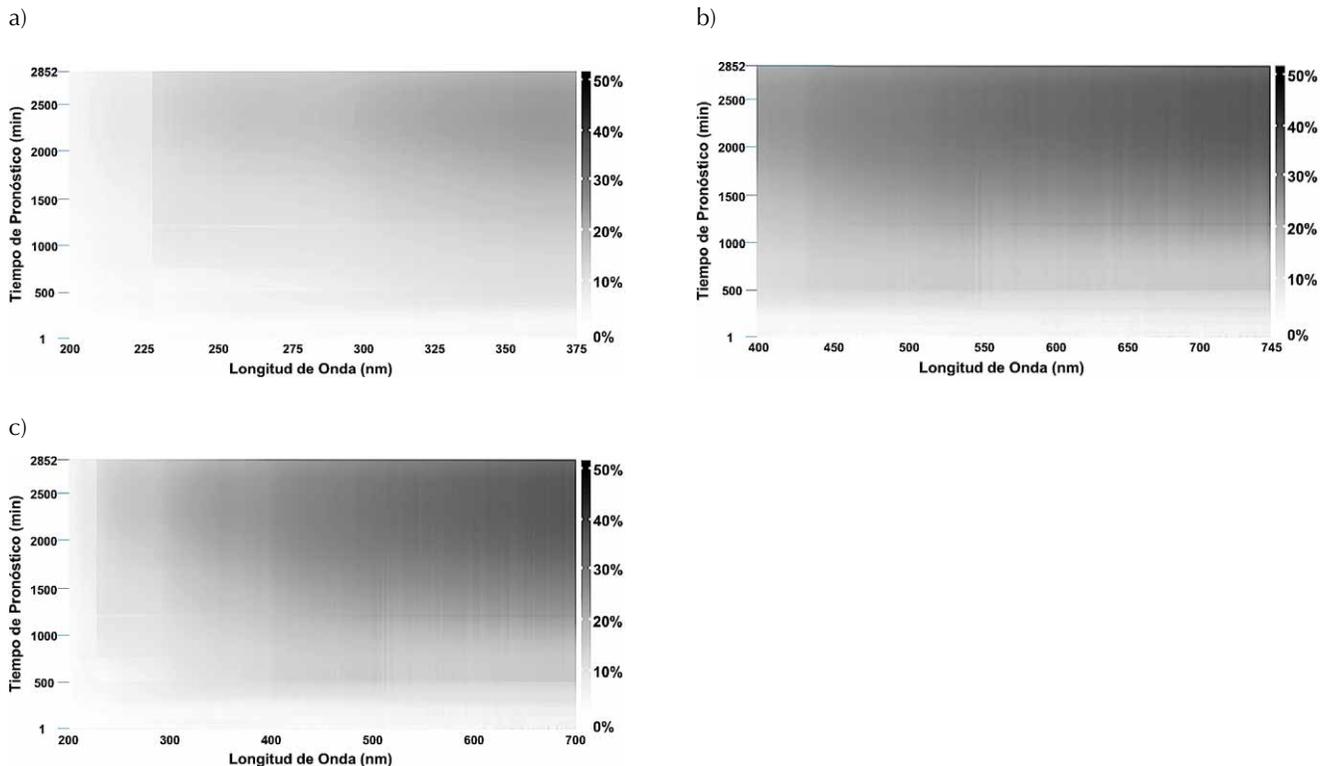


Figura 6. Errores NRMSD para 2852 tiempos de pronóstico, para PTAR-Salitre y rangos (a) UV, (b) Vis y (c) UV-Vis.

Fuente: elaboración propia.

desde la longitud de onda 200 nm hasta 225 nm y para todo el período de pronóstico 2852 minutos (47h, 30 min) los errores no superan 20%, y para el rango desde la longitud de onda 227.5 nm hasta 400 nm, hasta el tiempo de 800 minutos (13h, 30 min) de pronóstico, los errores no superan 30% y para el rango desde la longitud de onda 402.5 nm hasta 745 nm, hasta el tiempo de 490 minutos (8h, 10 min) de pronóstico, los errores no superan 20%.

En el sitio de estudio PTAR San Fernando, para todo el período de pronóstico, 5704 minutos, en el rango UV y específicamente desde la longitud de onda de 200 nm hasta 225 nm los errores no superan 20%, desde la longitud 250 nm hasta 380 nm y hasta 1500 minutos (25h) de pronóstico los errores no superan 24%. Para todo el rango Vis y hasta el tiempo de pronóstico 1488 minutos (24 h, 48 min) los errores no superan 21%. Para el rango UV-Vis y específicamente desde la longitud de onda de 200 nm hasta 270 nm y para todo el período de pronóstico 5704 minutos, los errores no superan 30%, y para la longitud de onda desde 272,5 nm hasta 745 nm y hasta 1500 minutos (25 h) de pronóstico los errores no superan 21%.

Con los resultados obtenidos para cada sitio y según (van den Broeke, 2007) y (Thomas &

Burgess, 2007), para el espectro UV y específicamente para el rango de longitudes de onda desde 200 nm hasta 250 nm se puede aspirar a pronosticar, en todos los sitios de estudio, concentraciones de contaminantes como nitritos (NO_2), nitratos (NO_3) y detergentes (formas bencénicas a 225 nm) con el fin de monitorizar la calidad del agua presente en cada hidrosistema. Se podría hacer el análisis de los rangos de los espectros UV y Vis por separado.

En la tabla 3 se resumen los resultados para los tres sitios de estudio y los tres rangos propuestos (UV, Vis y UV-Vis).

Los resultados obtenidos en este trabajo son comparables con los obtenidos por (Plazas-Nossa & Torres, 2013). Se analizan los mismos sitios de estudio (PTAR Salitre, EEG y PTAR San Fernando), pero se utiliza menor longitud en las series de tiempo de absorbancia con 1051 muestras (17h, 30 min), utilizando solo la DFT y la IFFT e involucrando de uno a diez armónicos importantes. En ese trabajo se pronostican valores retirando valores de uno hasta la mitad de la longitud de las series de tiempo. Se presentan valores de errores mínimos para los sitios en el rango UV hasta 17% y los errores mínimos en el rango visible hasta 27%.

Tabla 3. Valores de rangos de longitud de onda para tiempos de pronóstico y valores de porcentaje de error para los sitios de estudio y los rangos UV, Vis y UV-Vis.

| Sitio de estudio | UV | | | Vis | | | UV-Vis | | |
|-------------------|---------------------------------|--------------------------------|-----------|---------------------------------|--------------------------------|-----------|---------------------------------|--------------------------------|-----------|
| | Longitud de onda λ (nm) | Tiempo de pronóstico (minutos) | Error (%) | Longitud de onda λ (nm) | Tiempo de pronóstico (minutos) | Error (%) | Longitud de onda λ (nm) | Tiempo de pronóstico (minutos) | Error (%) |
| PTAR-Salitre | 200 – 230 | 2852 | < 15 | 382,5 – 745 | 300 | < 10 | 200 -745 | 300 | < 10 |
| | 232,5 – 380 | 240 | < 10 | 382,5 – 745 | 300-500 | < 15 | 200 -745 | 300 – 500 | < 15 |
| | | | | 382,5 – 745 | 500-1000 | < 20 | 200 -745 | 500 – 1200 | < 20 |
| EEG | 200-225 | 2852 | < 20 | 382,5 – 745 | 500 | < 23 | 200-225 | 2852 | < 20 |
| | 227,5-380 | 2852 | < 31 | 382,5 – 745 | 500-800 | < 34 | 227,5-400 | 800 | < 30 |
| | | | | | | | 402,5-745 | 490 | < 20 |
| PTAR San Fernando | 200-225 | 5704 | < 20 | 382,5 – 745 | 1488 | < 21 | 200-270 | 5704 | < 30 |
| | 250-380 | 1500 | < 24 | | | | 272,5-745 | 1500 | < 21 |

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

Al aplicar el procedimiento PCA a las series de tiempo de absorbancia para reducir la dimensionalidad, se utilizan 3 componentes principales para PTAR-Salitre, 5 componentes principales para EEG y 6 componentes principales para PTAR San Fernando. Por tanto, al utilizar las componentes principales, estas explican en conjunto más de 97% de la variabilidad para todos los sitios de estudio. Esto implica una reducción en el tiempo en el análisis y procesamiento de series de tiempo de absorbancia en tiempo real.

Para el análisis del armónico más importante, al remover de uno a 2852 registros, los errores de pronóstico para los tres sitios de estudio y para los tres rangos de longitudes de onda propuestos (UV, Vis y UV-Vis) están comprendidos entre 0,01% y 34% para 95% de los casos y para 100% de los casos e independientemente de la longitud de onda y del tiempo de pronóstico, errores inferiores a 37%.

Se observa además que para los tres sitios de estudio y para el rango de longitudes de onda de 200 nm a 225 nm en el espectro UV, se obtienen errores inferiores a 20% en todo el período de pronóstico indicando que las concentraciones de nitritos (NO_2), nitratos (NO_3) y detergentes (formas bencénicas a 225 nm), podrían ser mejor pronosticados mediante la metodología propuesta. Para el resto del rango UV de 230 nm a 380 nm los tiempos de pronóstico se reducen debido al porcentaje de error que se incrementa, lo cual aplica para otros contaminantes orgánicos como fenoles.

Para el rango de longitudes de onda en el espectro visible (Vis) y para todos los sitios de estudio, los errores no superan 10% hasta 300 minutos (PTAR-Salitre y EEG) y 600 minutos (PTAR San Fernando). Se observa además que los errores no superan 23% hasta 500 minutos (PTAR-Salitre y EEG) y 1000 minutos (PTAR San Fernando). Esto implica que se pueden obtener errores inferiores a 10% hasta 5 horas para SST. En las plantas de tratamiento de aguas residuales, los resultados se pueden aplicar en los procesos de gestión en tiempo real,

modificando el modo de operación de la planta en el afluente y según los datos de pronóstico abrir o cerrar compuertas; como también en el control de materia particulada en el espectro Vis, procesos de coagulación y floculación; aportando a una mejor eficiencia en la remoción.

De acuerdo con los resultados observados durante este estudio, se recomienda realizar el análisis de los rangos de los espectros UV y Vis por separado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, EAAB (Contrato Administrativo No. 9-0725100-0763-2010) y a Empresas Públicas de Medellín, EPM) por proveer la información utilizada en esta investigación.

REFERENCIAS

- Chen, M.-Y., & Chen, B.-T. (2014). Online fuzzy time series analysis based on entropy discretization and Fast Fourier Transform. *Applied Soft Computing*, 156-166.
- Di Gravio, G.; Mancini, M.; Patriarca, R., & Costantino, F. (2015). Overall safety performance of Air Traffic Management system: Forecasting and monitoring. *Safety Science*(72), 351-362.
- Gruber, G.; Bertrand-Krajewski, J.-L.; De Benedittis, J.; Hochedlinger, M., & Lettl, W. (2006). Practical aspects, experiences and strategies by using UVVIS sensors for long-term sewer monitoring. *Water Practice & Technology*, 1-8.
- He, Z.; Zhao, X.; Zhang, S.; Ogawa, T., & Haseyama, M. (2014). Random combination for information extraction in compressed sensing and sparse representation-based pattern recognition. *Neurocomputing*(145), 160-173.
- Langergraber, G.; Fleischmann, N.; Hofstaedter, F., & Weingartner, A. (2004). Monitoring of a paper mill wastewater treatment plant using UV/VIS spectroscopy. *IWA Water Science and Technology*, 49(1), 9-14.

- Leonardi, N., & Van De Ville, D. (2015). On spurious and real fluctuations of dynamic functional connectivity. (104), 430-436.
- Liu, Z. (2015). Comparison of precipitation estimates between Version 7 3-hourly TRMM Multi-Satellite Precipitation Analysis (TMPA) near-real-time and research products. *Atmospheric Research*(153), 119-133.
- O'Donncha, F.; Hartnett, M.; Nash, S.; Ren, L., & Ragnoli, E. (2015). Characterizing observed circulation patterns within a bay using HF radar and numerical model simulations. *Journal of Marine Systems*(142), 96-110.
- Peña, D. (2002). *Análisis de Datos Multivariantes*. Madrid: McGraw-Hill/Interamericana.
- Plazas-Nossa, L., & Torres, A. (2013). Fourier analysis as a Forecasting tool for absorbance time series received by UV-Vis probes installed on urban sewer systems. *8th International Conference on Planning & technologies for sustainable urban water management Novatech-2013* (pp. 1-8). Lyon: 8th International Conference on Planning & technologies for sustainable urban water management Novatech-2013.
- Proakis, J., & Manolakis, D. (2006). *Digital signal processing principles, algorithms, and applications* (4th ed.) New Jersey, New Jersey, USA: Pearson Prentice Hall.
- Rieger, L.; Langergraber, G.; Thomann, M.; Fleischmann, N., & Siegrist, H. (2004). Spectral in-situ analysis of NO₂, NO₃, COD, DOC and TSS in the effluent of a WWTP. *AutMoNet – 2nd IWA Conference on Automation in Water Quality Monitoring* (pp. 29-36). Vienna: IWA Conference on Automation in Water Quality Monitoring.
- Salgado, R.; Pinheiro, H. M.; Ferreira, F.; Saldanha, J., & Louren, N. (2013). In situ UV-Vis spectroscopy to estimate COD and TSS in wastewater drainage systems. *Urban Water Journal*, 1-12.
- Shlens, J. (2009, 12 10). A Tutorial on Principal Component Analysis. *A Tutorial on Principal Component Analysis*. La Jolla, California, USA: Salk Institute for Biological Studies.
- Thomas, O., & Burgess, C. (2007). *UV-Visible Spectrophotometry of Water and Wastewater* (1st ed.) Amsterdam: Elsevier B.V.
- Torres, A.; Lepot, M., & Bertrand-Krajewski, J.-L. (2013). Local calibration for a UV/Vis spectrometer: PLS vs. SVM. A case study in a WWTP. *7th International Conference on Sewer Processes & Networks* (pp. 1-8). Sheffield: 7th International Conference on Sewer Processes & Networks.
- van den Broeke, J. (2007). Online and In-situ UVVis Spectroscopy Real time multi parameter measurements with a single instrument. *AWE International*, 55-59.
- Xiong, P.-p.; Dang, Y.-g.; Yao, T.-x., & Wang, Z.-x. (2014). Optimal modeling and forecasting of the energy consumption and. *Energy*(77), 623-634.





Viabilidad de uso del polvo de vidrio como fundente en la elaboración de baldosas de gres porcelánico

Feasibility of using glass powder as flux in porcelain stoneware tile manufacturing

Silvio Delvasto Arjona*, Álvaro Guzmán Aponte**, John Alexander Torres León***, Martha Lorena Cedeño Venté****, David Felipe Acosta Guarín*****

Fecha de recepción: 29 de noviembre de 2013

Fecha de aceptación: 5 de diciembre de 2014

Citation / Para citar este artículo: Delvasto Arjona, S., Guzmán Aponte, Á., Torres León, J. A., Cedeño Venté, M. L., & Acosta Guarín, D. F. (2015). Viabilidad de uso del polvo de vidrio como fundente en la elaboración de baldosas de gres porcelánico. *Revista Tecnura*, 19(44), 59-70. doi:<http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.2.a04>

Resumen

En este artículo se presentan los resultados de una investigación sobre el uso del polvo de vidrio como remplazo del feldespato en la fabricación de gres porcelánico. Se prepararon mezclas en donde el polvo de vidrio sustituyó al feldespato en dos volúmenes distintos (25% y 50%). Especímenes de las pastas obtenidas fueron moldeados, secados y cocidos. Las propiedades físicas (densidad aparente, porosidad, absorción, entre otras) y mecánicas (resistencia a flexión) de los especímenes cocidos estándar (V0) se compararon con las de especímenes cocidos en donde el material fundente fue sustituido en la formulación por polvo de vidrio en porcentajes de 25% y 50% (V25 y V50). Se encontró que la adición de polvo de vidrio en las formulaciones ocasionaba disminución en la resistencia a la flexión e

incremento en los valores de absorción de agua. Sin embargo, la acción fundente del polvo de vidrio disminuyó la temperatura de sinterización respecto a la mezcla estándar en 150 °C para remplazos de 50% y 25%, respectivamente. Mediante MEB se evidenció en la microestructura de las piezas cocidas (V0, V25 y V50) la presencia de cristales de mullita primaria, adyacentes a cristales de mullita secundaria (agujas elongadas).

Palabras clave: feldespato, gres porcelánico, polvo de vidrio, vidrio.

Abstract

This article presents the results of a research on the use of glass powder as substitute of feldspar for manufacturing stoneware tiles. Mixtures were prepared in which glass powder substituted feldspar in two

* Ingeniero químico, Master of Science en Materiales de Ingeniería Civil y Manejo de Materiales, doctor en Ingeniería de Nuevos Materiales y sus Tecnologías de Fabricación. Docente de la Universidad del Valle. Cali, Colombia. Contacto: silvio.delvasto@correounivalle.edu.co

** Ingeniero de Materiales, doctor en Ingeniería, Área de Énfasis en Ingeniería de Materiales, docente de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Gravito, Bogotá, Colombia. Contacto: alvaro.guzman@escuelaing.edu.co

*** Ingeniero de Materiales, estudiante de maestría en Ingeniería Física en curso, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia. Contacto: johntl@unicauca.edu.co

**** Ingeniera de Materiales, estudiante de maestría en Metalurgia y Ciencia de los Materiales, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia. Contacto: martha.cedeno@uptc.edu.co

***** Estudiante de Ingeniería de Materiales, Universidad del Valle, Cali, Colombia. guacos12@gmail.com

different percentages (25 wt% and 50 wt%). Specimens of the obtained mixtures were molded, dried and sintered. Physical (apparent density, porosity, absorption, among others) and mechanical properties (flexion resistance) of standard sintered bodies (V0) were compared to the sintered bodies in which the melting material was substituted in the formulation by glass powder in percentages of 25% and 50% (V25 and V50). It was found that the glass powder addition in the formulations caused

decrease in flexion resistance and increase in water absorption values. However, the melting action of glass powder reduced the sintering temperature in regards with the standard mixture in 150 °C for substitutions of 50% and 25%, respectively. By using Scanning Electron Microscopy (SEM) needles of primary mullite and secondary mullite (elongated needles) in a vitreous phase were identified.

Keywords: feldspar, glass, glass powder, porcelain stoneware tile.

INTRODUCCIÓN

El gres porcelánico es un producto cerámico caracterizado por una baja absorción de agua $\leq 0,5\%$ y una resistencia mecánica a flexión > 35 MPa acorde con la norma ISO 13006. La baldosa de gres porcelánico es una baldosa cerámica totalmente vitrificada, impermeable, esmaltada o no, cuyo soporte en cocido es blanco o coloreado artificialmente; compuesta de una mezcla triaxial que contiene caolín (o arcillas caoliníticas), cuarzo y feldespato (Cuéllar Lozano, 2000); (Sánchez, 2002).

Los recubrimientos cerámicos han experimentado un notable crecimiento en los últimos años, debido a sus excelentes propiedades mecánicas y decorativas. A nivel mundial, la mayor demanda se dirige hacia lo que se denomina baldosa de gres porcelánico, la cual ha experimentado un crecimiento en la producción y las ventas, en comparación con otros materiales cerámicos de construcción; esto se atribuye a sus altas propiedades tecnológicas, especialmente lo que se refiere a la absorción de agua, resistencia química y resistencia al hielo y a las propiedades mecánicas como la resistencia a la flexión y a la abrasión (Sánchez *et al.*, 2006); (Márquez, Rincón, & Romero, 2008); (De Noni Jr., Hotza, Cantavella, & Sánchez, 2008); (Márquez, De la Torre, Aranda, Rincón, & Romero, 2009); (Ríos R, 2009);

(Márquez, Rincón, & Romero, 2010a); (Zanelli, Raimondo, Guarini, & Dondi, 2011). Pese a esto, el costo de este material puede superar considerablemente al de la cerámica tradicional, ya que su obtención requiere riguroso control microestructural, materias primas de alta calidad y un proceso de fabricación altamente tecnificado (Sánchez, 2003). Por esta razón, en la actualidad se trabaja, por ejemplo, en la implementación de materias primas alternativas a las convencionales que permitan disminuir los costos de producción y mantener o mejorar las propiedades tanto físicas como mecánicas. Teniendo en mente este interés, el proceso de reutilización y reciclaje de materiales sería interesante de estudiar ya que podría permitir obtener productos a menores costos, además de ayudar a proteger el medio ambiente.

La industria cerámica ha utilizado con este objetivo distintos materiales como cenizas de carbón, de cascarilla de arroz, residuos de vidrios, entre otros, que se consideran "desechos". En mezclas de cerámica blanca, por ejemplo, en donde el feldespato actúa como fundente, Guzmán, Delvasto, Sánchez & Amigó (2013) encontraron que la ceniza de tamo de arroz (CTA) puede reemplazar parcialmente al feldespato utilizado para la elaboración de pastas de loza.

Otros investigadores como Matteucci, Dondi, & Guarini (2002); Braganca & Bergmann (2004);

Tucci, Esposito, Rastelli, Palmonari, & Rambaldi (2004); Luz & Ribeiro (2007); Rambaldi, Carty, Tucci, & Esposito (2007); Raimondo, y otros (2007); Andreola, Barbieri, Karamanova, Lancellotti, & Pelino (2008) han hecho uso de diferentes desechos de vidrio (tubos de rayos catódicos (CRT (Panel Cathode Ray Tube)), sílice-soda-cal (soda-lime-silica, SLS, glass), entre otros), como remplazo del material fundente en la producción de lozas, cerámica tradicional y gres porcelánico, y encontraron algunos resultados interesantes (acelera el proceso de densificación, disminución en la temperatura óptima de cocción, entre otros). Sin embargo, otros autores como Andreola, Barbieri, Corradi, & Lancellotti (2007) mencionan que el uso de vidrio CRT en la industria cerámica aún no es conveniente, debido a carencias y limitaciones en el reciclaje de sus residuos, ya que estos residuos poseen elementos peligrosos como Pb, Cd, P, etc., con efecto negativo para el reciclador y el ambiente.

En esta investigación, el material fundente (feldespato sódico-potásico) de una composición de gres porcelánico fue sustituido por polvo de vidrio de ventana (sódico-cálcico). La razón de esta selección fue sustentada en el hecho de que el polvo de vidrio se encuentra compuesto por óxidos alcalinos K_2O y Na_2O , además de óxidos alcalinotérreos como CaO y MgO , elementos eficientes para promover la fundición y formación de fase líquida. A partir de ello, el propósito de este trabajo fue estudiar la posibilidad de usar el polvo de vidrio como remplazo del material fundente tradicional empleado en la producción de gres porcelánico, a través de experimentos de laboratorio y basados en el comportamiento a cocción del producto en verde y las propiedades físico-mecánicas del material sinterizado. En resumen, en este trabajo se estudió el uso de un "residuo" que podría generar beneficio económico y reducción del impacto sobre el medio ambiente.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

El vidrio empleado en esta investigación es vidrio de ventana. Las demás materias primas utilizadas para la elaboración de las pastas cerámicas triaxiales fueron cuarzo, feldespato, arcilla y caolín, que se comercializan en Colombia por la empresa Quimex Industriales S.A. El vidrio fue acondicionado a través de un proceso de lavado y molturación en molino de discos a 10 pasadas y en molino de bolas por un tiempo de 1 hora. Los diámetros medios de partícula del vidrio molido, arcilla, caolín, feldespato y cuarzo fueron $35,69 \mu m$, $12,86 \mu m$, $27,88 \mu m$, $20,68 \mu m$ y $20,43 \mu m$, respectivamente, valores que se determinaron empleando un equipo de Granulometría Láser Mastersizer 2000, versión 5.22. El tamaño de partícula del cuarzo se encontró en el rango de $[15 - 30 \mu m]$, rango recomendado por la literatura para la máxima resistencia de la porcelana (Mattyasovszky-Zsolnay, 1957); (Carty & Senapati, 1998); (Stathis, Ekonomakou, Stournaras, & Ftikos, 2004); (Braganca, Bergmann, & Hubner, 2006). Las composiciones química y mineralógica de las materias primas se identificaron mediante las técnicas de fluorescencia de rayos X (FRX) y difracción de rayos X (DRX) (ver la tabla 1 y la tabla 2), empleando un espectrómetro de fluorescencia de rayos X, MagixPro PW – 2440 Philips y un difractómetro BRUKER Theta-Theta modelo D8 Advance, respectivamente.

Procesamiento del gres porcelánico estándar y adicionado con polvo de vidrio

Se empleó una formulación estándar (V0) constituida por 25% de arcilla, 15% de caolín, 15% de cuarzo y 45% de feldespato. Con base en esta se prepararon dos formulaciones adicionales, en las cuales la proporción de feldespato fue remplazada en 25% y 50% por polvo de vidrio (V25 y V50). La

Tabla 1. Composición química de las materias primas.

| Compuesto y/o elemento | Materia prima (% peso total) | | | | |
|--------------------------------|------------------------------|------------|--------|---------|-----------------|
| | Caolín | Feldespato | Cuarzo | Arcilla | Polvo de vidrio |
| SiO ₂ | 70,22 | 77,33 | 96,88 | 46,36 | 77,24 |
| Al ₂ O ₃ | 19,65 | 12,52 | 1,93 | 36,94 | 1,65 |
| Fe ₂ O ₃ | 1,22 | 0,23 | 0,18 | 1,05 | 0,00 |
| CaO | 0,00 | 0,42 | 0,00 | 0,15 | 5,34 |
| MgO | 0,38 | 0,00 | 0,10 | 0,20 | 0,08 |
| Na ₂ O | 0,09 | 4,20 | 0,00 | 0,00 | 15,36 |
| K ₂ O | 2,34 | 4,94 | 0,00 | 0,39 | 0,33 |
| TiO ₂ | 0,08 | 0,00 | 0,06 | 0,61 | 0,00 |
| MnO | 0,05 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| P ₂ O ₅ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,00 |
| Cl | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| S | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Zn | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 |
| Rb | 0,01 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Br | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Cu | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Ba | 0,10 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Zr | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 |
| PF | 5,86 | 0,35 | 0,85 | 14,25 | - |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Composición mineralógica de las materias primas.

| Fases mineralógicas (ICDD) | Caolín | Feldespato | Cuarzo | Arcilla |
|----------------------------|---|---|---|---|
| | | Cuarzo (SiO ₂) | Albita (NaAlSi ₃ O ₈) | Fase mayoritaria: Cuarzo (SiO ₂) |
| | Caolinita (Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄) | Feldespato potásico (KAlSi ₃ O ₈) | Fase minoritaria: Caolinita (Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄) | Caolinita (Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄) |
| | Illita/M. Moscovita (KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂) | Cuarzo (SiO ₂) | Trazas: Nefelina ((Na, K)AlSiO ₄) | Illita/M. Moscovita (KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂) |
| | | Illita/M. Moscovita (KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂) | | Gibbsita (Al(OH) ₃) |

Fuente: elaboración propia.

composición química de las mezclas se encuentra reportada en la tabla 3.

Se preparó 1 kg de cada muestra por molienda en seco mediante el uso de un molino de bolas, utilizando como medio de molienda cuerpos moledores de alúmina con geometría cilíndrica, durante un tiempo de 30 minutos. 25 g de cada mezcla semiseca (6% agua) se prensaron uniaxialmente en un molde de acero a 50 MPa

en especímenes prismáticos de 117,0 mm de largo x 27,0 mm de ancho y 4 mm de espesor. Los especímenes se secaron en un horno mufla a 110 °C y posteriormente fueron cocidos en un horno eléctrico de laboratorio (Carbolite RHF 1600) a una rampa de calentamiento de 20 °C/min entre 25 °C y 600 °C y un tiempo de sostenimiento de 6 minutos; y 20 °C/min desde 600 °C a la temperatura máxima de cocción y un tiempo

Tabla 3. Composición química de las mezclas (% en peso total).

| Compuesto y/o elemento | Mezcla (% peso total) | | |
|--------------------------------|-----------------------|-------|-------|
| | V0 | V25 | V50 |
| SiO ₂ | 71,45 | 71,44 | 71,43 |
| Al ₂ O ₃ | 18,11 | 16,88 | 15,66 |
| Fe ₂ O ₃ | 0,58 | 0,55 | 0,52 |
| CaO | 0,23 | 0,78 | 1,33 |
| MgO | 0,12 | 0,13 | 0,14 |
| Na ₂ O | 1,90 | 3,16 | 4,41 |
| K ₂ O | 2,67 | 2,15 | 1,63 |
| TiO ₂ | 0,17 | 0,17 | 0,17 |
| MnO | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| P ₂ O ₅ | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| Cl | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| S | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Zn | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Rb | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| Sr | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Cu | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Ba | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| Zr | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| PF | 4,73 | 4,69 | 4,65 |

Fuente: elaboración propia.

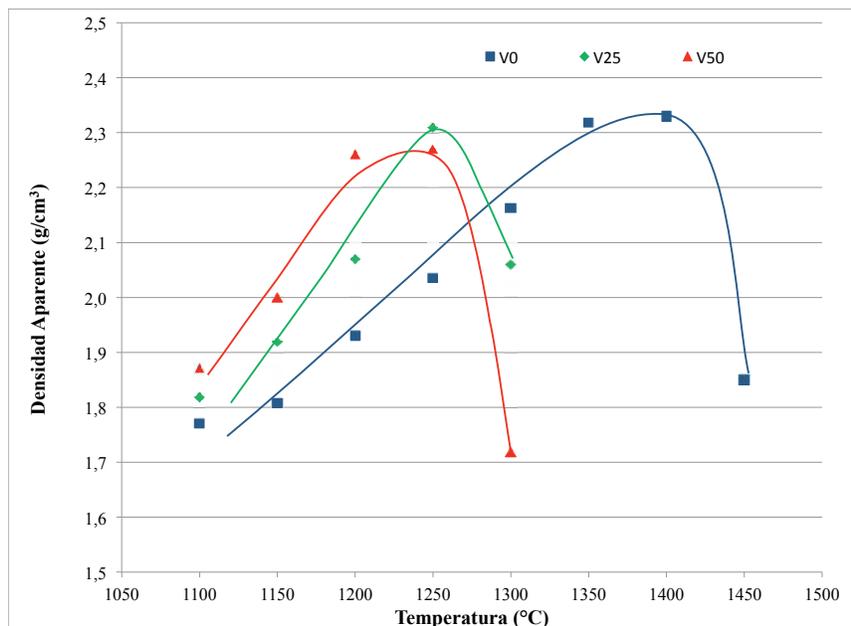


Figura 1. Densidad aparente de las probetas cocidas V0 (■), V25 (◆) y V50 (▲), en función de la temperatura de cocción.

Fuente: elaboración propia.

de sostenimiento de 6 minutos. El enfriamiento de los especímenes cocidos se realizó dentro del horno, con el fin de evitar tensiones residuales macroscópicas (De Noni Jr., Hotza, Cantavella, & Sánchez, 2010). Las temperaturas máximas de cocción se encontraron en el rango de 1100 °C–1450 °C (dependiendo de la composición), a intervalos de 50 °C. La temperatura de máxima densificación fue determinada, para cada mezcla, a partir del gráfico construido densidad aparente en cocido en función de la temperatura máxima de sinterización (ver la figura 1), haciendo uso de las condiciones experimentales descritas previamente.

Las mezclas de polvos cerámicos de gres porcelánico se sometieron a análisis termo-gravimétrico y térmico-diferencial (ATG, ATD) usando para ello un equipo TA Instruments, SDT-Q600; con una rampa de calentamiento de 10 °C/min, hasta una temperatura de 1100 °C, bajo un flujo de gas (nitrógeno) de 100 ml/min.

Se evaluó en las piezas cocidas el grado de vitrificación mediante ensayos de contracción lineal, porosidad, absorción y densidad conforme a los requerimientos de las normas ASTM C326, 2009; ASTM C329, 1988 (2006) y ASTM C373, 1988 (2006). Finalmente, se determinó la resistencia a la flexión considerando lo que señala la norma establecida para tal fin ASTM C674, 1988 (2006), empleando una máquina universal de ensayos INSTRON 3369, mediante un montaje a flexión en tres puntos con una distancia entre apoyos de 98 mm y una velocidad de aplicación de la carga de 1 mm/min. Para tener mayor confiabilidad de los datos obtenidos, se hicieron en promedio tres mediciones. Las características microestructurales de las piezas sinterizadas se observaron mediante microscopía electrónica de barrido (MEB), empleando un equipo Jeol JSM-6490LV; para ello la superficie de fractura de cada muestra fue pulida y atacada con una solución de ácido fluorhídrico (HF) a 5% durante 3 min, posteriormente fue lavada con agua destilada y alcohol etílico y finalmente secada y recubierta con Au-Pd.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Caracterización de las materias primas

Los resultados de la composición química de las materias primas empleadas (ver la tabla 1), permitieron evidenciar como constituyentes principales la sílice (SiO_2) y la alúmina (Al_2O_3). En el caso de la arcilla y el caolín se observó además la presencia de óxido de hierro (Fe_2O_3) en porcentajes de 1,05% y 1,22%, respectivamente. El cuarzo presentó contenidos de Fe_2O_3 de 0,18% y de TiO_2 de 0,06%. Aunque la presencia de este tipo de óxidos genera coloración (cromóforos), algunos investigadores como Biffi, G. (2002) han empleado arcillas con porcentajes de Fe_2O_3 superiores a los de este estudio, obteniendo resultados favorables.

Con respecto al feldespato, se observó presencia de porcentajes similares en los contenidos de óxidos de K_2O y Na_2O (4,94% y 4,20%, respectivamente) y pequeñas concentraciones de CaO (0,42%), motivo por el cual fue clasificado como sódico-potásico, corroborando los resultados obtenidos con DRX (ver la tabla 2). Por otra parte, las altas concentraciones de Na_2O y CaO presentes en el polvo de vidrio confirman su naturaleza sódico-cálcica, ideal para vidrios de ventana.

Evaluación de la aptitud como fundente del polvo de vidrio en la mezcla triaxial

El remplazo del feldespato por polvo de vidrio en la mezcla ocasiona que los contenidos de Al_2O_3 y K_2O disminuyan, mientras los contenidos de Na_2O y CaO incrementan (ver la tabla 3).

Los ensayos de análisis térmico (ATG/ATD) de las mezclas de polvos de composición de gres porcelánico V0, V25% y V50%, mostraron un pico endotérmico en el rango de 0 – 200 °C atribuible a la remoción de agua adsorbida, seguido por la deshidroxilación del caolín (494 °C para V0, 496 °C para V25 y 495 °C para V50) (ver la figura 2).

Se observó un pico endotérmico asociado a la transformación de cuarzo α a β a 569 °C para V0, y

568 °C para V25 y V50. Finalmente, a 988 °C para V0, y 985 °C para V25 y V50, se evidenció un pico exotérmico asociado a la transformación de meta-caolín a espinela o a fase premullita.

A partir de las curvas de máxima densificación de cada una de las mezclas V0, V25 y V50 (ver la figura 1), las temperaturas óptimas de cocción

fueron 1400 °C, 1250 °C y 1250 °C, respectivamente. Los valores óptimos de sinterización indicados anteriormente son coherentes con el rango de vitrificación óptima, el cual se logra cuando la porosidad abierta alcanza el valor mínimo y la contracción lineal es máxima, como se ilustra en las curvas de gresificación (ver la figura 3).

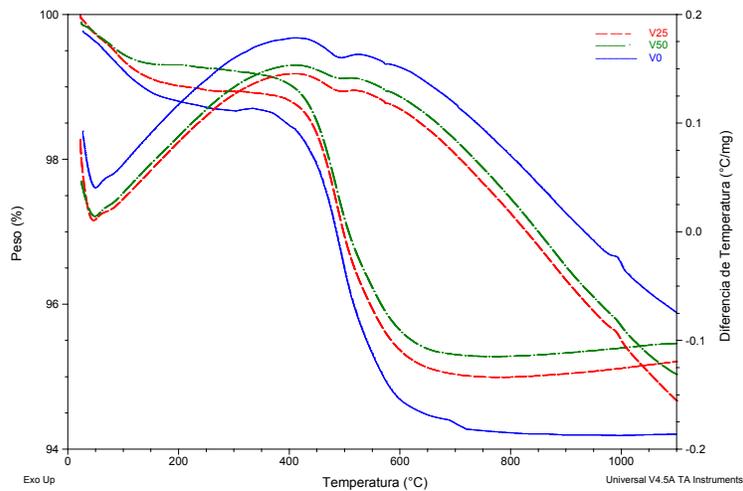


Figura 2. Curvas de ATG/ATD de mezclas de polvos de composición de gres porcelánico cuyas pastas fueron dosificadas con 0% de polvo de vidrio (V0), 25% de polvo de vidrio (V25) y 50% de polvo de vidrio (V50).

Fuente: elaboración propia.

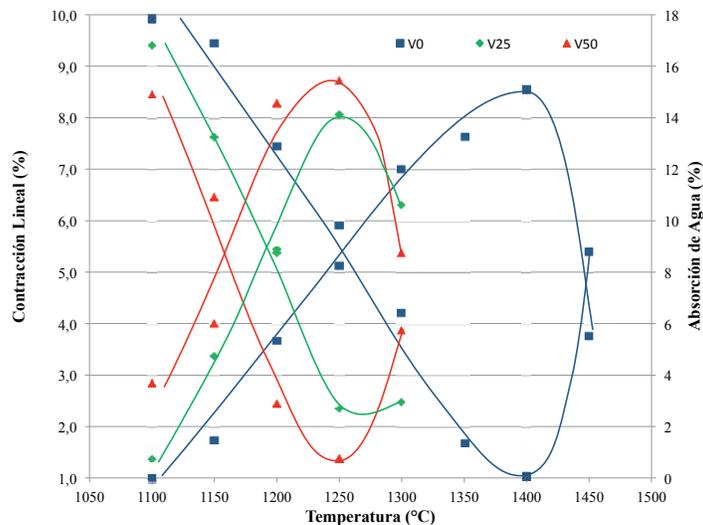


Figura 3. Absorción de agua y contracción lineal de las probetas cocidas V0 (■), V25 (◆) y V50 (▲), en función de la temperatura de cocción (curvas de gresificación).

Fuente: elaboración propia.

A partir de los resultados de las curvas de gresificación se observa que aquellas composiciones con sustitución de feldespato por polvo de vidrio (V25 y V50) presentan un rango de vitrificación óptima ligeramente más estrecho al mostrado por la composición estándar (V0), lo que indica que estas composiciones deben tener un control más riguroso durante su sinterización. La cocción por encima del rango de vitrificación óptima ocasiona un detrimento drástico de las propiedades físicas debido a la expulsión forzosa de los gases atrapados, generando ampollas (*blisters*) e hinchamiento (*bloating*) (Márquez, Rincón, & Romero, 2008). Cabe mencionar que las temperaturas óptimas de cocción encontradas son superiores a las empleadas en la práctica industrial (1180 – 1220 °C) (Raimondo y otros, 2009); (De Noni Jr., Hotza, Cantavella, & Sánchez, 2010), lo cual podría atribuirse al uso de un feldespato sódico-potásico de escasa fundencia. Además, el equipamiento e instalaciones disponibles a nivel industrial generalmente no se encuentran a escala de laboratorio y, por tanto, se necesitan mayores condiciones de cocción (tiempo y temperatura) para alcanzar las propiedades tecnológicas comerciales. A pesar de lo anterior, es evidente que el incremento en los contenidos de CaO y Na₂O en aquellas composiciones con sustitución de feldespato por polvo de vidrio (V25 y V50) favorece la vitrificación temprana de las composiciones cerámicas, permitiendo la producción de piezas

cocidas con máxima densidad a una temperatura más baja que la de la composición estándar (V0) (ver la tabla 4).

Este comportamiento está en concordancia con lo mencionado por investigadores como Das & Dana (2003); Zanelli, Raimondo, Don-di, Guarini, & Tenorio (2004); Dana, Dey, & Das (2005) y Yuruyen & Toplan (2009), quienes indican que las composiciones cerámicas ricas en Na son menos viscosas que aquellas ricas en K, facilitando la máxima densificación de las piezas cocidas. La óptima cocción a una temperatura inferior es una ventaja para las composiciones sustituidas con polvo de vidrio, confirmando el carácter fundente fuerte del mismo; sin embargo, los porcentajes de porosidad abierta y absorción de agua para las piezas cocidas V25 y V50 fueron mayores, comparadas con la mezcla estándar V0 (ver la tabla 4).

Braganca & Bergmann (2004) mencionan que la densidad aparente en cocido es una propiedad que tiene una fuerte influencia sobre el módulo de ruptura de las piezas; por lo que, generalmente, a mayor densidad aparente se presenta mayor módulo de ruptura. En coherencia con lo anterior, los datos indicados en la figura 4 de resistencia a la flexión de las piezas sinterizadas en este trabajo ponen en evidencia una tendencia similar con los resultados obtenidos en la densidad aparente en cocido (ver la tabla 4).

Tabla 4. Propiedades físicas de las piezas en cocido obtenidas a la temperatura óptima de cocción

| Propiedades físicas | V0 | V25 | V50 |
|--|------|------|------|
| Temperatura óptima de cocción (°C) | 1400 | 1250 | 1250 |
| Contracción lineal (%) | 8,6 | 8,1 | 8,7 |
| Densidad aparente en cocido (g/cm ³) | 2,33 | 2,23 | 2,31 |
| Porosidad abierta (%) | 0,1 | 6,3 | 1,8 |
| Porosidad cerrada (%) | 4,6 | 0,6 | 5,9 |
| Porosidad total (%) | 4,9 | 6,8 | 7,7 |
| Absorción de agua (%) | 0,1 | 2,7 | 0,8 |

Fuente: elaboración propia.

Estos resultados, además, están de acuerdo con lo mencionado por Márquez, Rincón, & Romero (2010a), quienes indican que la resistencia a la flexión no depende de la porosidad cerrada pero sí está relacionada con la porosidad abierta, ya que cuando la porosidad abierta disminuye se incrementa la resistencia a la flexión. Otros investigadores como Sánchez *et al.* (2006) también han observado un comportamiento similar.

Con base en los resultados de resistencia a flexión (ver la figura 4) y absorción de agua (ver la tabla 4) y basados en los criterios de la normativa ISO 13006 para la clasificación baldosas cerámicas prensadas en seco, los especímenes cocidos en este trabajo, en donde el feldespato fue sustituido por polvo de vidrio (V25 y V50), se deben considerar como semi-gres perteneciente al grupo BIIa (resistencia a flexión > 22 MPa y absorción de agua 3 – 6%) y gres perteneciente al grupo BIb (resistencia a flexión > 30 MPa y absorción de agua 0,5 – 3%), respectivamente. Mientras aquellos especímenes obtenidos a partir de los componentes tradicionales se consideran como gres porcelánico

perteneciente al grupo BIa (resistencia a flexión > 35 MPa y absorción de agua $\leq 0,5\%$).

Las micrografías de las superficies pulidas tomadas a 100X de MEB, en modo electrones secundarios (ver la figura 5 (a, b y c)), permitieron evidenciar una mayor porosidad cerrada en aquellas piezas cocidas V50 respecto a V0 y V25, corroborando los resultados obtenidos de porosidad cerrada indicados en la tabla 4.

Teniendo en cuenta lo mencionado por Tucci *et al.* (2004) es de esperar que aquellas piezas cocidas con polvo de vidrio, debido a la disminución del contenido de alúmina, se favorezca en menor proporción la formación de mullita. Sin embargo, las micrografías a 10000X de MEB en modo electrones secundarios (ver la figura 5 (d, e y f)), permitieron evidenciar en la microestructura de todas las piezas cocidas (V0, V25 y V50) la presencia de cristales de mullita primaria, adyacentes a cristales de mullita secundaria (agujas elongadas). Lo anterior, en concordancia con lo mencionado por Márquez, Rincón, & Romero (2010b), quienes sugieren que los cristales de mullita primaria

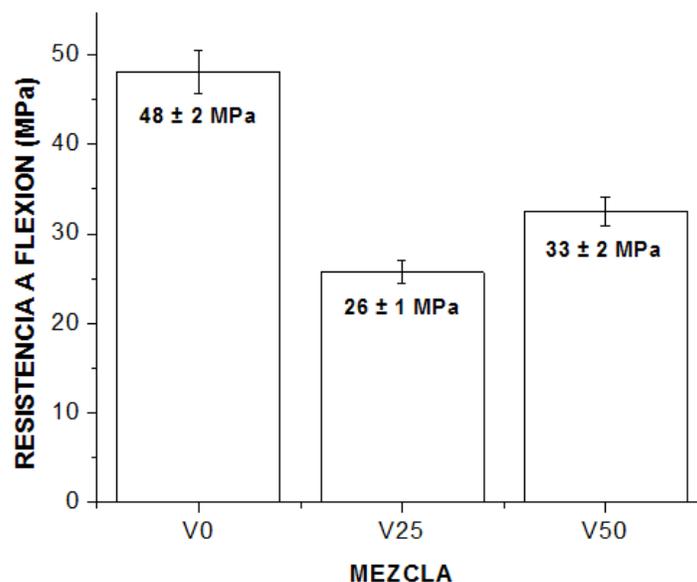


Figura 4. Resistencia a la flexión de las piezas cocidas a la temperatura óptima de cocción.

Fuente: elaboración propia.

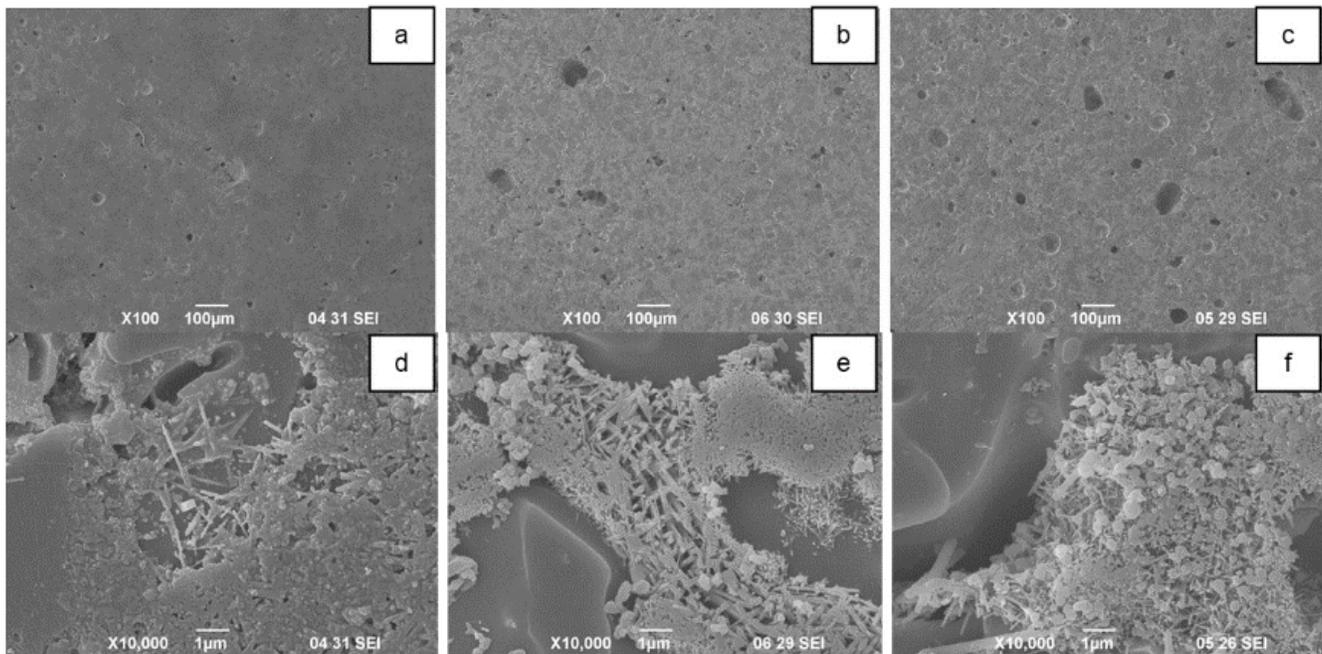


Figura 5. Micrografías MEB en modo SEI de superficies pulidas de probetas cocidas V0 (a), V25 (b) y V50 (c) (100x); y micrografías MEB en modo SEI de superficies pulidas de probetas cocidas V0 (d), V25 (e) y V50 (f) (10000x).

Fuente: elaboración propia.

formados en la superficie externa de los aglomerados de arcilla caolinítica y/o caolín pueden crecer y transformarse en cristales de mullita secundaria, si estos se encuentran cercanos a una matriz de menor viscosidad.

CONCLUSIONES

La incorporación de polvo de vidrio como remplazo del feldespato en mezclas de gres porcelánico contribuye a la disminución de la temperatura de máxima densificación de los especímenes cocidos en 150 °C (V25 y V50), respecto a una composición estándar, comportamiento que se puede atribuir al contenido de óxidos alcalinos (Na_2O) y alcalinotérreos (CaO) presentes en el polvo de vidrio, ocasionando la formación de una fase vítrea de menor viscosidad que debería fluir fácilmente llenando los poros; sin embargo, habría una

incoherencia con lo anterior ya que la densidad aparente en el material sinterizado disminuye.

Aunque el polvo de vidrio mostró ser un fundente fuerte, los especímenes cocidos en composiciones de gres porcelánico, en donde el feldespato fue sustituido por polvo de vidrio en 25% y 50% en peso total (V25 y V50), no permiten obtener gres porcelánico B1a (resistencia a flexión > 35 MPa y absorción de agua < 0,5%) y se clasificarían como semi-gres perteneciente al grupo B1a (resistencia a flexión > 22 MPa y absorción de agua 3 – 6%) y gres perteneciente al grupo B1b (resistencia a flexión > 30 MPa y absorción de agua 0,5 – 3%), respectivamente.

FINANCIAMIENTO

Universidad del Valle (Colombia), y COLCIENCIAS por el apoyo brindado para la financiación y el desarrollo de este estudio, sin lo cual no habría

podido desarrollarse este proyecto. En particular, a la investigación “Cerámicas Triaxiales basadas en Cenizas del Tamo de Arroz” código 110652128358 apoyada por COLCIENCIAS, Convocatoria 521 de 2010, contrato RC. No. 325-2011.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la Universidad del Valle (Colombia), y a COLCIENCIAS por el apoyo brindado para la financiación y el desarrollo de este estudio, sin lo cual no habría podido desarrollarse este proyecto.

REFERENCIAS

- Andreola, F.; Barbieri, L.; Corradi, A., & Lancellotti, I. (2007). CRT glass state of the art: A case study: Recycling in ceramic glazes. *Journal of the European Ceramic Society*, 27(2-3), 1623-1629.
- Andreola, F.; Barbieri, L.; Karamanova, E.; Lancellotti, I., & Pelino, M. (2008). Recycling of CRT panel glass as fluxing agent in the porcelain stoneware tile production. *Ceramics International*, 34(5), 1289-1295.
- Biffi, G. O. (2002). *Gres porcelanato: manual de fabricação e técnicas de emprego*. São Paulo, Brasil: Faenza Editrice do Brasil Ltda.
- Braganca, S., & Bergmann, C. (2004). Traditional and glass powder porcelain: technical and microstructure analysis. *Journal of the European Ceramic Society*, 24(8), 2383-2388.
- Braganca, S.; Bergmann, C., & Hubner, H. (2006). Effect of quartz particle size on the strength of triaxial porcelain. *Journal of the European Ceramic Society*, 26(16), 3761-3768.
- Carty, W., & Senapati, U. (1998). Porcelain—Raw materials, processing, phase evolution and mechanical behavior. *Journal of the American Ceramic Society*, 81(1), 3-20.
- Cuéllar Lozano, J. (2000). Desarrollo y caracterización de un gres porcelánico. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Dana, K.; Dey, J., & Das, S. (2005). Synergistic effect of fly ash and blast furnace slag on the mechanical strength of traditional porcelain tiles. *Ceramics International*, 31(1), 147-152.
- Das, S., & Dana, K. (2003). Differences in densification behaviour of K, Na feldspar containing porcelain bodies. *Thermochimica Acta*, 406(1-2), 199-206.
- De Noni Jr., A.; Hotza, D.; Cantavella, V., & Sánchez, E. (2008). Analysis of the development of microscopic residual stresses on quartz particles in porcelain tile. *Journal of the European Ceramic Society*, 28(14), 2629-2637.
- De Noni Jr., A.; Hotza, D.; Cantavella, V., & Sánchez, E. (2010). Influence of composition on mechanical behaviour of porcelain tile. Part I: Microstructural characterization and developed phases after firing. *Materials Science and Engineering: A*, 527(7-8), 1730-1735.
- Guzmán, A.; Delvasto, S.; Sánchez, E., & Amigó, V. (2013). Cenizas del tamo de arroz como sustituto del feldespato en la fabricación de cerámica blanca. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 52(1), 25-30.
- Luz, A., & Ribeiro, S. (2007). Use of glass waste as a raw material in porcelain stoneware tile mixtures. *Ceramics International*, 33(5), 761-765.
- Márquez, J.; De la Torre, A.; Aranda, M.; Rincón, J., & Romero, M. (2009). Evolution with temperature of crystalline and amorphous phases in porcelain stoneware. *Journal Of the American Ceramic Society*, 92(1), 229-234.
- Márquez, J.; Rincón, J., & Romero, M. (2008). Effect of firing temperature on sintering of porcelain stoneware tiles. *Ceramics International*, 34(8), 1867-1873.
- Márquez, J.; Rincón, J., & Romero, M. (2010a). Effect of microstructure on mechanical properties of porcelain stoneware. *Journal of the European Ceramic Society*, 30(15), 3063-3069.
- Márquez, J.; Rincón, J., & Romero, M. (2010b). Mullite development on firing in porcelain stoneware bodies. *Journal of the European Ceramic Society*, 30(7), 1599-1607.
- Matteucci, F.; Dondi, M., & Guarini, G. (2002). Effect of soda-lime glass on sintering and technological properties of porcelain stoneware tiles. *Ceramics International*, 28(8), 873-880.

- Mattyasovszky-Zsolnay, L. (1957). Mechanical strength of porcelain. *Journal of the American Ceramic Society*, 40(9), 299-306.
- Norma ASTM C326 (2009). Standard Test Method for Drying and Firing Shrinkages of Ceramic Whiteware Clays. American Society for Testing and Materials.
- Norma ASTM C329 (1988 (2006)). Standard Test Method for Specific Gravity of Fired Ceramic Whiteware Materials. American Society for Testing and Materials.
- Norma ASTM C373 (1988 (2006)). Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products. American Society for Testing and Materials.
- Norma ASTM C674 (1988 (2006)). Standard Test Methods for Flexural Properties of Ceramic Whiteware Materials. American Society for Testing and Materials.
- Norma ISO 13006 (1998). Ceramic tiles—Definitions, classification, characteristics and marking. International Organization for Standardization.
- Raimondo, M.; Zanelli, C.; Guarini, G.; Dondi, M.; Fabbroni, R., & Cortesi, T. (2009). Process of pyroplastic shaping for special-purpose porcelain stoneware tiles. *Ceramics International*, 35(5), 1975-1984.
- Raimondo, M.; Zanelli, C.; Matteucci, F.; Guarini, G.; Dondi, M., & Labrincha, J. (2007). Effect of waste glass (TV/PC cathodic tube and screen) on technological properties and sintering behaviour of porcelain stoneware tiles. *Ceramics International*, 33(4), 615-623.
- Rambaldi, E.; Carty, W.; Tucci, A., & Esposito, L. (2007). Using waste glass as a partial flux substitution and pyroplastic deformation of a porcelain stoneware tile body. *Ceramics International*, 33(5), 727-733.
- Ríos R, C. (2009). Uso de materias primas colombianas para el desarrollo de baldosas cerámicas con alto grado de gresificación. Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- Sánchez, E. (2002). Technical considerations on porcelain tile products and their manufacturing process. En M. o. In Qualicer 2002 (ed.), (pp. 57-83). Castellón. Recuperado el 22 de 01 de 2012, de: <http://www.qualicer.org/recopilatorio/ponencias/pdf/0211030s.pdf>
- Sánchez, E. (2003). Considerações Técnicas sobre Produtos de Revestimento Porcelânico e seus Processos de Manufatura. Parte I. *Revista Cerâmica Industrial*, 8(2), 7-16. Recuperado el 18 de 01 de 2011, de: <http://www.ceramicaindustrial.org.br/main.php>
- Sánchez, E.; Ibáñez, M.; García-Ten, J.; Quereda, M.; Hutchings, I., & Xu, Y. (2006). Porcelain tile microstructure: implications for polished tile properties. *Journal of the European Ceramic Society*, 26(13), 2533-2540.
- Sthatis, G.; Ekonomakou, A.; Stournaras, C., & Ftikos, C. (2004). Effect of firing conditions, filler grain size and quartz content on bending strength and physical properties of sanitaryware porcelain. *Journal of the European Ceramic Society*, 24(8), 2357-2366.
- Tucci, A.; Esposito, L.; Rastelli, E.; Palmonari, C., & Rambaldi, E. (2004). Use of soda-lime scrap-glass as a fluxing agent in a porcelain stoneware tile mix. *Journal of the European Ceramic Society*, 24(1), 83-92.
- Yuruyen, S., & Toplan, H. (2009). The sintering kinetics of porcelain bodies made from waste glass and fly ash. *Ceramics International*, 35(6), 2427-2433.
- Zanelli, C.; Raimondo, M.; Dondi, M.; Guarini, G., & Tenorio, P. (2004). Sintering mechanisms of porcelain stoneware tiles. En M. o. Qualicer 2004 (ed.), (pp. 247-259). Castellón. Recuperado el 22 de enero de 2011, de: <http://aulavirtual.camaracastellon.com/qualicerCD/pdf/0413191e.pdf>
- Zanelli, C.; Raimondo, M.; Guarini, G., & Dondi, M. (2011). The vitreous phase of porcelain stoneware: composition, evolution during sintering and physical properties. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 357(16-17), 3251-3260.





Data driven fault detection and isolation: a wind turbine scenario

Detección y aislamiento de fallas guiadas por datos: escenario turbina de viento

Rubén Francisco Manrique Piramanrique*, Jorge Sofrony Esmeral*

Fecha de recepción: 30 de noviembre de 2013

Fecha de aceptación: 5 de diciembre de 2014

Citation / Para citar este artículo: Manrique Piramanrique, R. F., & Sofrony Esmeral, J. (2015). Data driven fault detection and isolation: a wind turbine scenario. *Revista Tecnura*, 19(44), 71-82. doi:<http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.2.a05>

Abstract

One of the greatest drawbacks in wind energy generation is the high maintenance cost associated to mechanical faults. This problem becomes more evident in utility scale wind turbines, where the increased size and nominal capacity comes with additional problems associated with structural vibrations and aeroelastic effects in the blades. Due to the increased operation capability, it is imperative to detect system degradation and faults in an efficient manner, maintaining system integrity, reliability and reducing operation costs. This paper presents a comprehensive comparison of four different Fault Detection and Isolation (FDI) filters based on "Data Driven" (DD) techniques. In order to enhance FDI performance, a multi-level strategy is used where: (i) the first level detects the occurrence of any given fault (detection), while (ii) the second identifies the source of the fault (isolation). Four different DD classification techniques (namely Support Vector Machines, Artificial Neural Networks, K Nearest Neighbors and Gaussian Mixture Models) were studied and compared for each of the proposed classification levels. The best strategy at each level

could be selected to build the final data driven FDI system. The performance of the proposed scheme is evaluated on a benchmark model of a commercial wind turbine.

Keywords: data mining, fault detection, wind energy.

Resumen

Uno de los mayores inconvenientes presentes en la generación de energía eólica son los altos costos de mantenimiento asociados a fallas mecánicas. Este problema se hace más evidente en las turbinas de viento de escala industrial, en donde incrementos en el tamaño y la capacidad nominal traen consigo problemas adicionales asociados a vibraciones estructurales y efectos aeroelásticos en las hojas. Debido al incremento en la capacidad de operación, es imprescindible detectar de manera eficiente fallas y degradaciones en el sistema, garantizando la integridad, su fiabilidad y reduciendo los costos de operación. Este artículo presenta un sistema para la detección y aislamiento de fallas (FDI), basado en técnicas "Guiadas por los datos" (*Data driven*, abreviado DD). La arquitectura propuesta es una estrategia de varios niveles en donde: (i) el primer nivel

* Electrical Engineer, M.Sc. in Computer Science, Assistant Professor at Universidad Sergio Arboleda. Bogotá, Colombia. Contacto: ruben.manrique@usa.edu.co

* Electrical Engineer, M.Sc. and Ph.D. in Control Systems, Associate Professor at Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Contacto: jsofronye@unal.edu.co

detecta la ocurrencia de una falla (detección), mientras que (ii) el segundo identifica su origen (aislamiento). Se estudiaron y compararon cuatro técnicas de clasificación para cada uno de los niveles (Máquinas de Vectores de Soporte, Redes Neuronales Artificiales, K vecinos cercanos y Mezcla de Gaussianas). La

mejor estrategia en cada nivel fue seleccionada para construir el sistema FDI. El rendimiento del sistema propuesto se evalúa en un modelo de referencia de una turbina eólica de escala comercial.

Palabras clave: energía eólica, detección de fallas, minería de datos.

INTRODUCTION

Energy generation is one of humanities greatest concerns, as most social activity has been built around its consumption. This highlights the fact that we need to introduce new sources of “green” energy that are reliable, accessible, and economically attractive. Within this context, wind energy has become one of the most popular options, observing a market growth of approximately 24% in the last decade (GWEC Global Energy Council, 2011). Wind power and its transformation into electrical energy is a simple idea that comes along with many challenges. The underlying idea is that wind power absorption is proportional to the square of the blade length and to the wind velocity cubed. As the demand of installed capacity increases, so does the need to design generators with higher rated capacity. This may only be achieved either by increasing the wind speed (which is generally unfeasible) or increasing the size of the blades. At these sizes a significant increases in the structural loads and vibrations are introduced. If these increase in load is not properly addressed the system may be more prone to malfunction in its mechanical components, and consequently less cost efficient. Although the efficiency of wind turbines has improved greatly, their reliability has decreased. This leads to an increase in maintenance costs, which translates into longer down times and captured energy losses.

Modern active control techniques can optimize efficiency and increase system reliability. Nonetheless, faults are likely to occur and have a negative impact on system performance, or even

result in catastrophic events if not detected on time. In addition, wind turbines are located in remote locations, under extreme environmental conditions, making it difficult to implement preventive maintenance plans. It has been reported (Walford, 2006) that approximately 10%-15% of the total revenues due to wind energy generation has to be reinvested into maintenance. Analytical Fault Detection and Isolation (FDI) may offer a cost efficient solution that allows for early fault detection. It is believed that FDI techniques, and the early detection of faults, can reduce the mean down time of wind turbines and repair costs associated with their operation. Industrial demand for such FDI systems has seen an exponential growth in recent years, and has been accompanied by higher performance and reliability demands. FDI techniques have become an essential component in the development of intelligent autonomous systems where it is necessary to constantly monitor the health state (detect, isolate and estimate severity of the failure mode) of the system.

Model based techniques are the most common approach to building analytic FDI systems, where many techniques have been proposed including Kalman filters (Bergantino & S, 2009), unknown input observers (Chen & Saif, 2006), and H_∞/H_2 filters (Verhaegen, 2008), have been used. The underlying idea behind model based FDI is to use a mathematical model of the system as the source of redundant information, and produce estimates of the systems measured outputs, this model is usually developed based on some fundamental understanding of the physics of the process. The disadvantage of this approach is the need for an

accurate model of the process; in other words, model based techniques are affected by model uncertainties, plant disturbances and measurement noise. An alternative approach known as “Data Driven” (DD) FDI uses a collection of measured data to unearth patterns of normal and faulty behavior. DD FDI is based on the advances in areas such as data mining, machine learning and computational intelligence. Some of the most popular DD FDI techniques used Artificial Neural Networks (Zhou, 2004), (Kusiak & Shah, 2006) and Bayesian Networks (Sylvain & Kobi, 2010), amongst others.

This article presents the application of data mining techniques to a Fault Detection and Isolation problem setup. The main contribution is the proposition of a multi-level architecture where the first level must evaluate the existence of a fault, while the objective of the second level is to isolate the source of the fault. This strategy, in combination with a FCTW, proved to enhance performance of the FDI filters, hence making them comply with industrial standards and readily available for the practitioner. The paper starts with a brief outline of the classification techniques used; it follows by describing the DD FDI architecture proposed and its application to a benchmark model of a utility scale wind turbine as proposed in (Odgaard, 2009); the DD FDI system is constructed and simulation results are presented to highlight the usefulness of the data driven approach; finally some concluding remarks are given.

WIND TURBINE CONFIGURATION

The basic wind turbine configuration is as follows. The nacelle contains main components including the generator and gearbox, and sits on top of the tower structure. The blades are connected to the rotor, which in turn is connected to the generator via the gearbox. The nacelle contains a yaw motor that allows the blades to face the wind. Large utility scale generators are generally variable speed and have mechanisms that change the blade pitch angle

and control the lift produced by the wind. Wind turbines have additional actuators and sensors that can be used for control. The generator torque load can be used to dictate the amount of electrical power absorbed from the mechanical system, and act as a braking system to control the acceleration of the rotor; a braking system can set the rotor to a full stop. The main measurements are the rotor and generator speeds and blade pitch angles. As one of the main premises is that the system must remain low cost, high cost and redundant sensors are generally avoided, which entail additional challenges to the closed loop control and FDI problems.

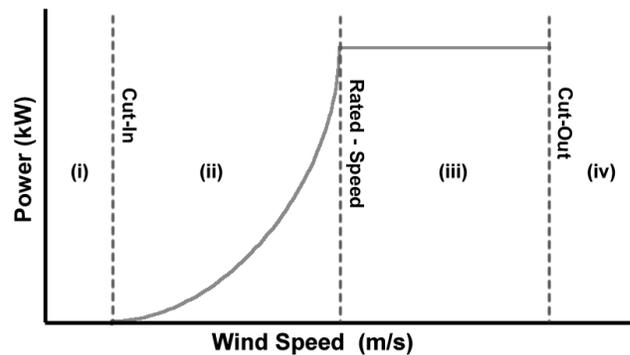


Figure 1. Ideal wind turbine power curve and operating zones.

Source: own work.

The turbine operates at four distinct regions, figure 1: (i) cut in speed, where winds are insufficient; (ii) the interim region, i.e. the region between the cut in and rated wind speed; (iii) maximum power capture region, which starts at the minimum rated wind speed; (iv) cut out speed, where wind speeds are too high. The general control objective is to maximize power absorption while operating in region (ii) and minimize structural loads when operating in region (iii); regions (i) and (iv) are not contemplated.

The data set was generated from simulation results of a “benchmark” wind turbine model built

for the development and analysis of FDI systems (Odgaard, 2009). In figure 2 the components of the model used and the relationship between them are represented. This model is a simplification of a three blade, utility scale (horizontal) wind turbine with a rated power of 4.8 MW. Each blade has independent pitch motion, hence the control system provides three separate pitch command signals, i.e $\beta_{i,r}$ where $i = [1,2,3]$; the actual pitch position is measured by sensors that provide signals $\beta_{i,m}$. Although the model has (dual) physical redundancy for the pitch sensors, the aim of this paper is to analyze the performance of an analytical DD FDI system so we will eliminate redundant measurements.

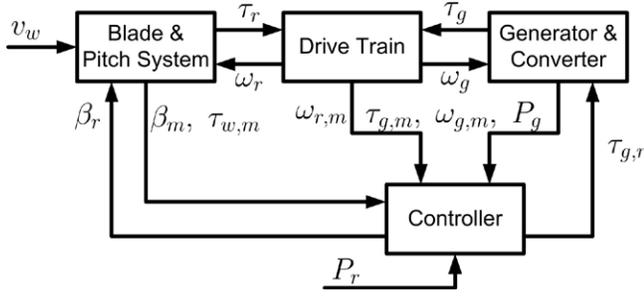


Figure 2. Wind Turbine Model: System Interconnection.

Source: (Odgaard, 2009).

The torque transmitted to the generator and the rotor is denoted τ_g and τ_r respectively, while the

angular velocity of the generator and the rotor are denoted by ω_g (rad/s) and ω_r (rad/s) (respectively). The complete set of measurements (in addition to pitch angle measurements) includes the transmitted torques, angular velocities and the wind speed (v_w). The captured power is approximately given by equation (1).

$$P_r = \tau_{aero} \omega_r = \frac{1}{2} \rho A v_w^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (1)$$

where τ_{aero} (N) is the aerodynamic torque, ω_r is the rotor speed, ρ (kg/m³) is the air density, A (m²) is the area swept by the rotor, v_w (m/s) is the wind speed. C_p is the power coefficient which represents how much power available in wind is captured. C_p is a function of blade pitch angle β (deg) and tip speed ratio $\lambda = \frac{\omega_r R}{v_w}$, R (m) is the rotor radius. The pitch actuators on the system are represented by a transfer function $G_{act}(s)$ (equation (2) with $\zeta = 0.6$ and $\omega_n = 11.11$).

$$\frac{\beta(s)}{\beta_{ref}(s)} = G_{act}(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2)$$

The generator's dynamics are modeled with a first-order transfer function, equation (3).

$$\frac{\tau_g(s)}{\tau_{g,ref}(s)} = G_{gen}(s) = \frac{\alpha_g}{s + \alpha_g} \quad (3)$$

The drive train and generator are modeled by a two mass model, equation (4).

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_r \\ \dot{\omega}_g \\ \dot{\theta}_\Delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(B_{dt} + B_r) & B_{dt} & -k_{dt} \\ J_r & N_g J_r & J_r \\ \eta_{dt} B_{dt} & -\eta_{dt} B_{dt} - B_g N_g^2 & \eta_{dt} K_{dt} \\ N_g J_g & N_g^2 J_g & N_g J_g \\ 1 & -1/N_g & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_r \\ \omega_g \\ \theta_\Delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1/J_r & 0 \\ 0 & 1/J_g \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{aero} \\ \tau_g \end{bmatrix} \quad (4)$$

Where θ_{Δ} is the drivetrain torsion, J_r and J_g are the rotor and generator inertia, B_r and B_g are the viscous damping of the rotor and generator. B_{dt} and K_{dt} are the damping and stiffness coefficients of the drivetrain flexibility, N_{g_i} is the gearbox ratio and η_{dt} is the efficiency of the drive train. If the turbine is operating in Region 3, a discrete PI controller generates the pitch commands references to maintain the rated rotor speed. The generator torque is set as $\tau_{g,ref} = P_{rated}/\omega_g$.

APPLICATION OF DATA MINING TECHNIQUES

The fault diagnosis and isolation problem involves determining the failed component (isolation) once a fault has been detected (detection). The ability to isolate faults can be made “simple” at the expense of additional, physically redundant, sensors and increased costs, thus it is of interest to develop techniques that use analytical (redundant) information. Although the most common approach to analytical FDI is to use model-based techniques, the construction of a high fidelity model is a cumbersome task; data mining techniques allow the detection and isolation of system faults by only using input/output data.

From a data mining perspective, classification is the task of finding (training) an objective function $f(x)$ which assigns one of the predefined class labels y , to each set of the attributes x ; the training data is the collection of records (examples), characterized by a tuple (x,y) . For the case of an FDI system, y may take values associated with each of the fault modes and x would be the vector of measured signals of the system. Although there is a broad range of classification strategies, this paper will focus on four of them: Support Vector Machines (SVM), Artificial Neural Networks (ANN), Bayesian Classifiers (i.e Naive Bayes with Gaussian Mixture Models) and K Nearest Neighbors (KNN). A brief description of each of these techniques will be provided next.

Support vector machines: Vladimir Vapnik first introduced SVM within the context of binary

classification problems. The basic idea behind SVM is to find an optimal hyperplane that maximizes the separation margin between the classes. Finding this hyperplane is equivalent to solving a constrained optimization problem whose solution is a linear combination of training examples that lie on the edge of the margin; these are known as “support vectors”. The mathematical description of the algorithm is extensive and can be found in (Scholkopf & Smola, 2001).

Artificial neural networks: These are inspired by a simplification of the biological neural system, which consists of simple computing elements (called neurons) connected through synaptic weights. The multilayer perceptron (MLP) is the most applied architecture and consists of an input layer, at least one hidden layer, and an output layer. The input to a given neuron is a linear combination of the output of neurons from the previous layer, where each input is weighted by their respective synaptic weight. Associated to each neuron, there exists a nonlinear activation function, which transforms the linear combination of inputs into the neurons output, which in turn is an input to the neurons in the next layer. For the application proposed, the number of hidden layers and neurons was determined experimentally, where sigmoidal activation functions achieved the best results. The ANN is trained using a back propagation with gradient descent algorithm as detailed in (Bishop C. M., 2006).

K nearest neighbors: The K Nearest Neighbors (KNN) approach consists of a supervised classifier based on neighborhoods. The underlying idea is that a new sample belongs to the class to which the largest numbers of (k nearest) neighbors belong. One of the challenges is to choose appropriately the number (i.e. k) of neighbors to be analyzed; if k is too large it may be difficult to discriminate from global tendencies, but if k is small classification may be imprecise because of the lack of data. Note that KNN depends greatly on the way distance is calculated, thus it is possible to have different classifiers by using different distance metrics. The

classifier proposed in this paper uses the Euclidean norm, where the Euclidean norm of a vector x is given by $\|x\| = \sqrt{x^T x}$. The distance between two vectors, x_i and x_j , is defined as $dist(x_i, x_j) = \|x_i - x_j\|$ as the metric for distance.

Bayesian classifiers: Bayesian classifiers are based on probability theory, where classification is made depending on which class has the greatest probability of occurrence or the lowest risk (Duda, Hart, & Stork, 2001). Assume that the problem considered is the classification of a set of attributes as one of K different classes. The vector of attributes (features) is denoted as $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_d]^T$ where d is the dimension of the vector and the probability that the vector x belongs to the class y_k is $p(y_k|\mathbf{x})$ (known as *posterior* probability). The attribute set x belongs to the class with the highest posterior probability, where can be calculated according to Bayes' formula, equation (5).

$$p(y_k|\mathbf{x}) = \frac{p(\mathbf{x}|y_k)p(y_k)}{p(\mathbf{x})} \quad (5)$$

Where $p(\mathbf{x}|y_k)$ is the probability density function of class y_k and $p(y_k)$ is the *prior* probability of the class. If the *prior* probabilities are not currently known, they can be estimated from the proportions of the class in the training set (Tan, Steinbach, & Kumar, 2005). A feature vector \mathbf{x} , belongs to the class y_k if $p(y_k|\mathbf{x})$ is has highest posterior probability of all the K classes: $p(y_k|\mathbf{x}) > p(y_j|\mathbf{x}) \quad \forall j \neq k$. The biggest challenge when implementing Bayesian classifiers is to estimate the probability density function (PDF) $p(\mathbf{x}|y_k)$. In practice, this PDF is always unknown and must be calculated from the available information, i.e. the '*training data*'. Two approaches, namely Naive Bayes and the Mixture of Gaussians, will be presented next.

The Naive Bayes (NB) approach estimates $p(\mathbf{x}|y_k)$ assuming that the attributes are conditionally independent for a given class k . To estimate the conditional probabilities $p(x_i|y_k)$, we can assume a certain form of probability distribution and calculate the parameters of the distribution using the training data (Tan, Steinbach, & Kumar, 2005).

In many cases an exact density function can be difficult to obtain or not follow any particular distribution function. If this is the case, it is possible to use a linear combination of Gaussian distributions to represent (i.e. model) the "real" PDF of each class (Gaussian Mixture Models). Each distribution function is the modeled via equation (6).

$$N(\mathbf{x}, \mu, \Sigma) = \frac{1}{2\pi^{\frac{d}{2}}|\Sigma|^{\frac{1}{2}}} e^{-1/2(\mathbf{x}-\mu)^T \Sigma^{-1}(\mathbf{x}-\mu)} \quad (6)$$

Where \mathbf{x} is the vector of features, μ is the mean vector, Σ is the covariance matrix and $|\Sigma|$ is its determinant. In our particular case, the classifier was constructed under the following premises: *i*) the probabilities of occurrence of each class, i.e. $p(y_k)$ for $k = [1, \dots, K]$, are known and equal to $1/K$; *ii*) the probability density functions $p(\mathbf{x}|y_k)$ for $k = [1, \dots, K]$, are constructed using a linear combination of n multivariate Gaussian distributions; *iii*) since there is no optimal way to choose n (Sylvain & Kobi, 2010), its value was chosen experimentally; *iv*) the GMM parameters are calculated using an Expectation Maximization Algorithm (Alpaydin, 2004).

METHODOLOGY

The data set corresponds to a simulation of 3700 seconds with the model specified above and sampling time $T_s = 0,01$ seg. A total of seven fault modes were studied, originally proposed by (Odgaard, 2009), each of which was triggered at different time intervals. *Fault 1*: Fixed value in pitch 1 position sensor measurement, *Fault 2*: Scaling error in pitch 2 position sensor measurement, *Fault 3*: Fixed value in Pitch 3 position sensor measurement, *Fault 4*: Fixed value in rotor speed sensor measurement, *Fault 5*: Scaling error in rotor and generator speed sensor measurements, *Fault 6*: Degraded hydraulic pitch system response pitch actuator 2 and *Fault 7*: Air in Oil Failure pitch actuator 3.

The signals of the monitoring system are wind speed, pitch position, generator speed, rotor speed and generated power (as shown in

table 1) and constitute our initial set of attributes. The classifiers were trained according to the algorithms discussed earlier in the paper, and results are analyzed in terms of detection times

and false alarm clear out time. To evaluate the models constructed from the perspective of data mining (i.e. prediction levels), the following metrics are defined (equations (7) and (8)).

$$Accuracy = \frac{\text{correctly classified records (normal + fault)}}{\text{Total number of records}} \times 100\% \quad (7)$$

$$Sensitivity = \frac{\text{Fault records correctly classified}}{\text{Total number of fault records}} \times 100\% \quad (8)$$

Table 1. Attribute Set.

| Complete Attribute Set | | | |
|------------------------|--------------------|------------------|-------------------------------|
| Variable | Rate | Measurement | Description |
| v_s | $\Delta(v_s)$ | WindSp [m/s] | Wind speed sensor |
| ω_r | $\Delta(\omega_r)$ | RotorSp [rad/s] | Rotor speed measurement 1 |
| ω_g | $\Delta(\omega_g)$ | GenSp [rad/s] | Generator speed measurement 1 |
| τ_r | $\Delta(\tau_r)$ | GenTorq [kN m] | Measured Generator torque |
| τ_g | $\Delta(\tau_g)$ | GenPower [kNm/s] | Measured Generator Power |
| B_{1m} | $\Delta(B_{1m})$ | Bl1Pitch [deg] | Pitch angle 1 measurement 1 |
| B_{2m} | $\Delta(B_{2m})$ | Bl2Pitch [deg] | Pitch angle 2 measurement 1 |
| B_{3m} | $\Delta(B_{3m})$ | Bl3Pitch [deg] | Pitch angle 3 measurement 1 |

Source: own work.

Data-Driven fault detection and isolation system training

DD FDI systems use measured signals as attributes to build the training set, thus the quality of the classifiers depends greatly on the quality of the training set used. In order to increase the classification model's accuracy, three actions were performed on the data: data sampling, outlier elimination and attribute (feature) creation.

Data sampling: Sampling is the process of selecting a representative (reduced) set that still allows a thorough examination of the entire data. Sampling is needed in order to allow the abstraction of a complex problem, as well as to acquire a sub set that infers information from a larger data set. It is widely accepted that a fairly

modest sized sample can sufficiently characterize a much larger population. The usefulness of the sample is determined by two characteristics: the size and the "quality" of the sample. The sample size should not be too small since it may misrepresent the entire data set, or too large that it overloads the computational algorithms.

In order to generate a suitable training set, it was necessary to reduce the total number of data registers and balance the proportion of "normal" and "faulty" operation events. There exist several procedures that aid in the process of data set sampling. In this paper we followed a simple procedure (random sampling) that allowed a *balanced reduction* of the class labeled as "normal". A (simple) random sample of size

n consists of n individuals from the population chosen in such a way that every individual has an equal chance of being selected. The total number of data registers used for training was 390,000, where 75% correspond to data representing the normal operation of the system, while the remaining registers correspond to faulty behavior. Through random sampling, this number was reduced to 197,000 registers and a balanced data set was obtained.

Outlier elimination: An outlier is generally considered to be a data point that is far outside the normal behavior of a variable or population. Outliers can have deleterious effects on statistical analyses since they generally serve to increase error variance and reduce the relevance of statistical tests. Additionally they can seriously bias or influence estimates that may be of substantive interest. It is therefore desirable to eliminate data that may deteriorate detection performance, i.e. outlier elimination.

Several formal statistical tests have been devised to determine if a certain value can be considered as an outlier. In its simplest form, box plots present five measurements (the minimum, the lower quartile, the median, the upper quartile and the maximum), all in a visual display. The lower quartile has 25% of the sample values below and 75% above it. The upper quartile has 25% of the sample values above it and 75% below. The middle quartile is the median and the middle half of the sample lies between the upper and lower quartile. The distance between the upper and lower quartile is called the interquartile range. Any observation outside the interquartile range is considered a potential outlier. After analyzing data box plots, it was possible to identify and eliminate a set of outliers associated with the turbine's start up process and can therefore be ignored. The outlying data provides no useful information and may correspond to an event that we do not wish to classify.

Creating new attributes: From a viewpoint of data mining, it is possible to increase sensitivity

to a particular class and accuracy of a classifier by creating new attributes (Tan, Steinbach, & Kumar, 2005). For example, fixed value sensor faults may be difficult to detect if the faulty measurement is close to steady state, normal operation value. This problem can be solved by creating a new set of attributes that takes into account the "velocity" of the measurements, and not only its value. Although it may be possible to find more robust attributes, we want to avoid the pre-processing of input data as much as possible; hence the rate of change is a suitable choice. By defining $\Delta(x_i) = |x_i - x_{i-1}|$ as the rate of change of the measurement x a new set of attributes is constructed.

As an exploratory exercise, and with the objective of determining the quality of the FDI models that could be obtained using the previously mentioned techniques, four classifiers were constructed. The training set consists of a family of attributes (see table 1) and a flag that determines the occurrence of a given fault; the flag will take a zero value when no fault occurs (i.e. normal behavior), and will take a value within the set $\{1,2,3,4,5,6,7\}$ in the event of fault occurrence (i.e. the flag values is 1 where Fault 1 is present, and so on). At this stage a full FDI system is constructed for each one of the methods proposed.

To evaluate the performance of each FDI system, a total 50 simulations were performed per technique proposed. Each simulation had duration of 3700 seconds, exhibiting all of the faults at different times. It is important to mention that simulations sequences were different from the training set, and that no preprocessing was performed on the data. The results obtained are presented in table 2.

Observing the general results presented in table 2, it is possible to draw the following conclusions. First, it is important to highlight the need to generate suitable training sets by using outlier elimination techniques and appropriate data sampling (an average 10% degradation was observed when no preprocessing was performed). This will reduce the risk of having the model memorize the training set

Table 2. Average Accuracy and Sensitivity.

| Algorithm | Sensitivity (%) | | | | | | | Accuracy (%) |
|-----------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 | F6 | F7 | |
| KNN | 93.20 | 70.12 | 85.23 | 68.21 | 95.12 | 41.12 | 57.12 | 65.42 |
| NB | 91.70 | 85.80 | 84.20 | 82.60 | 93.20 | 60.90 | 59.80 | 80.72 |
| ANN | 82.60 | 84.00 | 82.70 | 76.10 | 87.80 | 67.20 | 62.50 | 78.63 |
| SVM | 86.70 | 88.80 | 80.20 | 85.60 | 98.20 | 68.90 | 67.80 | 74.89 |

Source: own work.

and avoid any unwanted bias caused by abnormal operation states (i.e. turbine startup). Second, Faults 1 through 5 are abrupt in nature and their detection presents acceptable levels of accuracy and sensitivity, and a low number of false alarms. Unfortunately, for Faults 6 and 7, low sensibility is exhibited and a high number of false alarms are present. Because of this the presented strategy is not suitable for the FDI application at hand and it is necessary to investigate new architectures. Third, it was observed that incipient faults were more difficult to detect due to their slow growing nature. In fact, it was observed that ANN and SVM techniques provided better detection properties for incipient faults, thus a reliable DD FDI system may require the application of more than one data mining technique.

In general, probabilistic methods tend to present better classification performance, and this is supported by the fact that the Naive Bayes method presented the best accuracy and sensitivity indicators of the four algorithms tested. Nonetheless, in order to obtain good results it is necessary to have an accurate (or good enough) PDF. Initially, the task of finding a PDF for detection (determining state of Fault/No Fault) may seem to be relatively easy because the problem at hand is that of binary classification. As the requirements scale up to identification, finding an accurate PDF may become rather complex, thus the need for more advance techniques such as Mixed Gaussian Models to determine an approximate, but accurate enough PDF.

Data driven techniques have proved to be a promising approach to fault detection and isolation, but the previous result also stressed the fact that more heuristic architectures are needed in order to reach the performance levels required for industrial applications. Having this in mind, the next section proposes a *Multi Level* architecture that deals with the problem of detection and the problem of isolation in a sequential manner.

MULTI LEVEL DD FDI

The FDI system proposed uses a *two level* detection architecture: the first classification level is responsible for detecting the fault and distinguishing faulty from normal behavior; the second level is responsible of isolating the source of the failure. The FDI architecture is summarized in figure 3. Details on the construction of each classification level are discussed next.

Level 1: This level is posed as a binary problem where the main classes are "Fault" and "Normal". It is important to note that at this stage it is imperative to recognize states of failure, hence the classifier is trained to have high sensitivity at the expense of partial degradation of the general accuracy. As a consequence, this level has a high number of false alarms, so in order to enhance accuracy a Fault Counter on Time Windows (FCTW), as proposed in (Lipnickas A. , 2006), was implemented. The main objective is to verify the "persistence" of the faulty behavior, so the classifier must identify the "Fault" persistently

over a given period of time. The size of the time window was determined experimentally by considering that there is a trade off between accuracy and detection time. It should be noted that this approach is not suitable for intermittent faults with long periods of occurrence.

The average performance over 50 test runs is summarized in table 3. The accuracy is, in general, higher than 80%, with sensitivity above 90% for SVM, ANN and GMM. At this level we are interested in a classification model with high sensitivity, which usually presents a higher number of false alarms. It can be note no model has an accuracy greater than 90%, indicating that there is a low number of undetected faults, but a considerable number of false alarms. The table also shows the percentage of false alarms (FA %) and the recovery time after its occurrence (FA Clear Time).

Level 2: This stage consists of a multi class classification problem, where all the possible occurrences of fault are a given class. At this level the training set is constructed with data in a state of "Fault", and the main goal is to isolate the

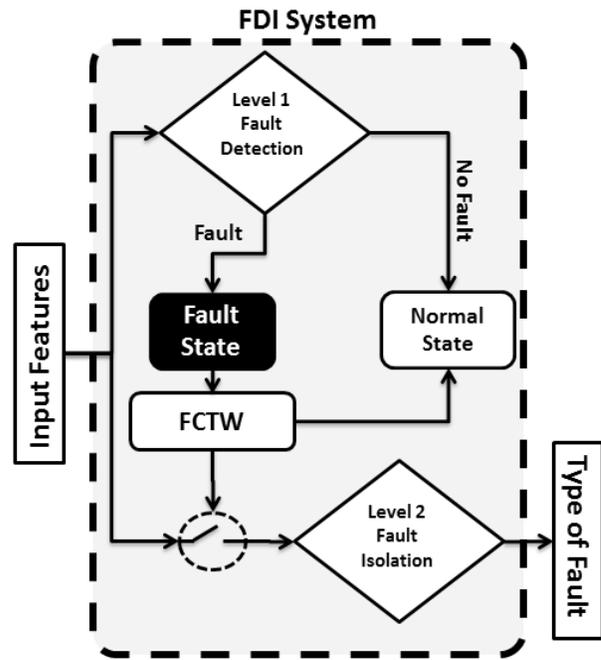


Figure 3. Multilayer Classification Architecture for FDI.

Source: own work.

Table 3. Accuracy and Sensitivity Level 1 using FCTW.

| Algorithm | Accuracy (%) | Sensitivity (%) | FA (%) | FA Clear Time |
|-----------|--------------|-----------------|--------|---------------|
| SVM+FCTW | 97.290 | 89.32 | 1.010 | 3,5Ts |
| ANN+FCTW | 97.10 | 88.14 | 1.012 | 3,5Ts |
| KNN+FCTW | 91.18 | 79.97 | 5.63 | 4,3Ts |
| GMM+FCTW | 92.27 | 84.74 | 5.30 | 4,1Ts |

Source: own work.

Table 4. Accuracy and Sensitivity Level 2.

| Algorithm | Accuracy (%) | Sensitivity (%) | | | | | | |
|-----------|--------------|-----------------|------|------|------|------|------|------|
| | | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 | F6 | F7 |
| SVM | 84.2 | 96 | 80.5 | 96.1 | 87.1 | 82.8 | 60.2 | 72.2 |
| ANN | 89.5 | 94.1 | 85.2 | 99 | 86 | 79.1 | 65.9 | 78.7 |
| KNN | 59.2 | 84.2 | 65.2 | 91.2 | 79.2 | 45.7 | 38,3 | 39.4 |
| GMM | 90.2 | 95.3 | 75.9 | 93.2 | 86.3 | 88.6 | 71.2 | 88.5 |

Source: own work.

source of the fault. All the implemented strategies are multi class classifiers, i.e. there are a total of 7 classes that need to be identified. The results of the validation tests are shown in table 4, where the highest accuracy was achieved with the use of ANN and GMM. Additionally, table 4 shows the sensitivity of each algorithm to each of the faults. Notice that SVM and ANN are more sensitive to Faults 1-5, corresponding to faulty sensors, while the GMM algorithm has excellent sensitivity for faults 6, 7 corresponding to faults in the actuators. Moreover, the KNN algorithm exhibited the worst performance.

SIMULATION TESTS AND RESULTS

Given the performance results obtained by each model, the FDI system was built for Level 1 using the support vector machines, and for Level 2 GMM. Table 5 lists the average detection time and missed faults over 50 test runs. Fault 6, which represents a pitch actuator, has the longest detection times because this fault is simulated in regions 2 and 3. The problem is that the control scheme uses pitch angle as a control variable only in region 3, hence only in this region will it be possible to detect this fault. In general, it is very difficult to detect faults associate with pitch movement in region 2 because blade pitch angles are assumed to be constant. Faults 1 to 4 have acceptable detection

times. Fault 7 presents long detections times since it is an incipient fault, which can only be detected (in this case) until the movement of pitch 3 is considerably degraded.

CONCLUSIONS

This paper presents a multi-level DD FDI system architecture that provides enhanced performance compared to single level DD FDI. In each level, four different classification strategies (SVM, ANN, KNN and GMM) were implemented and tested, where SVM and ANN showed higher accuracy for binary classification (Level 1); for multi class classification (Level 2) GMM based FDI exhibited the best performance, in particular for actuator fault detection. The FDI system built is capable of recognizing all failures selected with acceptable detection times. One of the biggest challenges in FDI is reducing the number of false alarms. Although dividing the problem into two levels and adding a FCTW to the first level of detection achieved an important reduction in false alarms, this is still an open research problem.

Data Driven classification techniques have the advantage of not needing a mathematical model of the system, and rather tries to model data behavior. Although this means that less information about the system is needed, in many cases appropriate attribute sets may only be obtained through an *ad hoc*

Table 5. Results Multi Level FDI Scheme.

| Fault No. | Detection Time | | | False Alarm / Missed Detection | | |
|-----------|----------------|--------|--------|--------------------------------|---------------|--------|
| | Average | Max | Min | FA | FA Clear Time | Missed |
| 1 | 4.2Ts | 7Ts | 3Ts | 2 | 3,5 Ts | 0 |
| 2 | 4.3Ts | 8Ts | 3Ts | 4 | 3,4 Ts | 0 |
| 3 | 4.2 Ts | 7Ts | 3Ts | 1 | 3 Ts | 0 |
| 4 | 17.2 Ts | 24Ts | 8Ts | 3 | 4.5 Ts | 0 |
| 5 | 5.2 Ts | 9Ts | 3Ts | 3 | 4.5 Ts | 0 |
| 6 | 5125 Ts | 5231Ts | 5055Ts | 3 | 3.4 Ts | 0 |
| 7 | 2325.4 Ts | 2725Ts | 1627Ts | 5 | 4.2 Ts | 0 |

Source: own work.

process that requires some expert knowledge about the process. This may be particularly useful if there is some historical knowledge regarding probability of occurrence of each fault and their cause.

One of the drawbacks in this experimentation is that we had a large data set that allowed us to construct the training set in a rather simple manner. In practical applications this may generally not be the case, and the quality of the classifier may be affected. Although there are different techniques that can be used to deal with small or unbalanced data sets (Chawla, 2005), it is still important to have suitable historical data in order to be able to achieve the desired results.

REFERENCES

- Alpaydin, E. (2004). *Introduction to Machine Learning (Adaptive Computation and Machine Learning)*. The MIT Press.
- Bergantino, C. F., & S, L. (2009). FaultBuster: data driven fault detection and diagnosis for industrial systems.
- Bishop, C. M. (2006). *Pattern Recognition and Machine Learning*. New York: Springer-Verlag New York, Inc.
- Chawla, N. (2005). Data Mining for Imbalanced Datasets: An Overview. En O. Maimon, & L. Rokach (eds.), *Data Mining and Knowledge Discovery Handbook* (pp. 853-867). Springer US.
- Chen, W., & Saif, M. (June 2006). Fault detection and isolation based on novel unknown input observer design (6 pp.)
- Duda, R.; Hart, P., & Stork, D. (2001). *Pattern Classification*. Wiley.
- GWEC Global Energy Council (2011). *Global wind report, Annual market update 2010*.
- Kusiak, A., & Shah, S. (2006). Data-mining-based system for prediction of water chemistry faults. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53(2), 593-603.
- Lipnickas, A. (2006). Two Stage Neural Networks Based Classifier System for Fault Diagnosis. En V. Palade, L.; Jain, & C. D. Bocaniala (eds.), *Computational Intelligence in Fault Diagnosis* (pp. 209-230). Springer London.
- Odgaard, K. M. (2009). Fault Tolerant Control of Wind Turbines a benchmark mode. *In Proceedings of Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes*.
- Scholkopf, B., & Smola, A. J. (2001). *Learning with Kernels: Support Vector Machines, Regularization, Optimization, and Beyond*. MIT Press.
- Sylvain, T., & Kobi, A. (2010). Fault detection of univariate non-Gaussian data with Bayesian network.
- Tan, P.-N.; Steinbach, M., & Kumar, V. (2005). *Introduction to Data Mining* (1st ed.), Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.
- Verhaegen, M. (2008). Fault detection of large scale wind turbine systems: A mixed H/H index observer approach. *2008 16th Mediterranean Conference on Control and Automation (M)*, 1675-1680.
- Walford, C. A. (2006). Wind Turbine Reliability: Understanding and Minimizing Wind Turbine Operation and Maintenance Costs. *Energy*(March), SAND2006-1100.
- Zhou, Y. (2004). *Data Driven Process Monitoring Based on Neural Networks and Classification Trees*. Master's thesis, Texas A\&M University.





Análisis estocástico de señales vibratorias de motores de inducción para la detección de fallas usando descomposición de modo empírico

Vibration signals stochastic analysis of induction motors for fault detection using empirical mode decomposition

Alejandro Rivera Roldán*, Miguel Alberto Becerra Botero**, Jaime Alberto Guzmán Luna***

Fecha de recepción: 4 de febrero de 2014

Fecha de aceptación: 5 de diciembre de 2014

Citation / Para citar este artículo: Rivera Roldán, A., Becerra Botero, M. A., & Guzmán Luna, J. A. (2015). Análisis estocástico de señales vibratorias de motores de inducción para la detección de fallas usando descomposición de modo empírico. *Revista Tecnura*, 19(44), 83-91. doi:<http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.2.a06>

Resumen

En este artículo se presenta un análisis de vibraciones en motores de inducción por medio de Modelos Ocultos de Markov (Hidden Markov Model–HMM) aplicado a características obtenidas de la Descomposición de Modo Empírico (Empirical Mode Decomposition–EMD) y transformada de Hilbert-Huang de señales de vibración obtenidas en las coordenadas x y y , con el fin de detectar fallas de funcionamiento en rodamientos y barras. Además se presenta un análisis comparativo de la capacidad de las señales de vibración en dirección x y en dirección y , para aportar información en la detección de fallas. Así, un HMM ergódico inicializado y entrenado por medio del algoritmo de máxima esperanza, con convergencia en $10e-7$ y un máximo de iteraciones de 100, se aplicó sobre el espacio de características y su desempeño fue determinado mediante validación cruzada 80-20 con 30 *fold*, obteniendo un alto desempeño para la detección de fallas en términos de exactitud.

Palabras clave: descomposición de modo empírico, detección de fallas, Modelos Ocultos de Markov, motores de inducción, procesamiento de señales.

Abstract

This paper presents a vibration analysis on induction motors using Hidden Markov Models (HMM) applied to features obtained from the Empirical Mode Decomposition (EMD) and Hilbert-Huang transform to vibration signals obtained in the coordinates x and y , in order to detect malfunctions in bearings and bars. Additionally, a comparative analysis of the ability of the vibration signals in the x and y directions to provide information for failures detection is presented. Thus, an ergodic HMM initialized and trained by expectation maximization algorithm with convergence at $10e-7$ and maximum iterations of 100 was applied to the feature space and its performance was determined by cross-validation with 80-20 with 30 fold for obtaining high performance fault detection in terms of accuracy.

* Ingeniero electrónico, Institución Universitaria Salazar y Herrera, Medellín, Colombia. Contacto: alejandrорiveraroldan@gmail.com

** Ingeniero electrónico, magíster en Automatización y Control Industrial, Institución Universitaria Salazar y Herrera, Medellín, Colombia. Contacto: migb2b@gmail.com

*** Ingeniero civil, especialista en Comunicación educativa, magíster en Ingeniería de Sistemas, doctor en Ingeniería (énfasis Sistemas e Informática), Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. Contacto: jaguzman@unal.edu.co

Keywords: empirical mode decomposition, fault detection, Hidden Markov Models, induction motors,

signal processing.

INTRODUCCIÓN

La confiabilidad es un factor clave de competitividad en los procesos productivos del mercado actual; sin embargo, la maquinaria utilizada en dichos procesos, como los motores, sufren desgastes y averías que pueden llevar a una interrupción inesperada en las líneas de producción. Estos motores tienen una vida útil y un desgaste por el uso a través del tiempo, lo que lleva a que su eficiencia sea cada vez menor (Santana & Madiedo, 2007) (Ho Soon, Chong, & Su, 2006); de ahí la necesidad de implementar sistemas de mantenimiento preventivo y correctivo, mediante sistemas eficientes de detección de fallas que eviten largas paradas en las líneas de producción (Fulufhelo V., Nelwamondo, & Marwala, 2006), (Hernández, Carro, de Oca, García, & Fernández, 2008).

El movimiento irregular de los motores puede caracterizarse por medio del análisis de señales vibratorias, las cuales son complejas y no determinísticas, por lo que no resulta adecuado su análisis usando métodos tradicionales como la transformada de Fourier (Ramírez-Castro & Montejo, 2011). A pesar de esto, en estudios recientes se han efectuado análisis de señales de vibración de máquinas rotativas en el dominio de la frecuencia usando la transformada rápida de Fourier para el monitoreo de desalineación, problemas de engranaje y desbalanceo (Patil & Gaikwad, 2013) y en el dominio del tiempo para el análisis de fallas en rodamientos (Shrivastava & Wadhvani, 2014), demostrando resultados satisfactorios. Sin embargo, este tipo de características son afectadas significativamente en condiciones de ruido y son muy dependientes de los sistemas de inferencia cuando se emplean en detección automática. Debido a esto, su análisis se hace comúnmente aplicando la transformada wavelet que permite una codificación, eliminación

de ruido, compresión y descomposición de las señales, para la detección de condiciones anormales (Askari, 2010)(Patel, Agrawal, & Joshi, 2012), pero debido a que este tipo de señales no tienen características particulares en la fase y frecuencia, no resulta suficientemente adecuado para su análisis. Por lo anterior, la descomposición de modo empírico (EMD) ha ido tomando fuerza para el análisis de este tipo de señales, el cual de manera sistemática y sin mayores bases matemáticas permite una descomposición de la señal, a partir de la cual se obtienen características representativas usando la transformada de Hilbert Huang que describe la dinámica del motor aplicando técnicas de caracterización (Oweis & Abdulhay, 2011)(Qiwei-Xie, y otros, 2008)(Soualhi, Medjaher, & Zerhouni, 2015). Adicionalmente, los clasificadores estocásticos basados en los modelos ocultos de Markov (HMM) han demostrado que pueden usarse en la identificación de series de tiempo no estacionarias y que tienen buen desempeño en el aprendizaje de modelos estadísticos, y aunque se conocen como técnica para el reconocimiento del habla, se han utilizado en el diagnóstico de sistemas de rotor, engranajes y rodamientos a través del análisis de señales de vibración en combinación con otras técnicas; sin embargo, gran cantidad de estudios hacen uso de señales en una sola dirección (x o y) y las consideraciones del ruido varían dependiendo de los datos a estudiar, los cuales generan un alto grado de afección en los resultados de la detección (Ocak & Loparo, 2001)(Qiang & Changjian, 2012).

En este estudio, se presenta un enfoque de análisis estocástico basado en HHT-HMM aplicado sobre la combinación de diferentes IMF de señales vibratorias del eje x y del eje y , junto con un análisis de relevancia basado en Fuzzy Rough Set (FRS) para reducir el número de características,

con el fin de proporcionar un sistema eficiente para la detección de fallas en rodamientos y en barras en motores de inducción en forma más confiable.

MATERIALES Y MÉTODOS

De acuerdo con el diagrama esquemático de la figura 1, la metodología desarrollada consta de 6 pasos: 1) base de datos, 2) preprocesamiento de la señal, 3) descomposición de la señal, 4) caracterización, 5) selección de características y 6) clasificación.

La base de datos es descrita por (Cabal-Yopez, 2009), pertenece a la Universidad de Guanajuato (México) y con ella se hicieron las pruebas en este trabajo usando las señales de vibración correspondientes a las direcciones x y y . En la etapa de preprocesamiento se remuestreó la señal a 150 Hz con un filtrado antialiasing y una normalización en la escala $[-1, 1]$ usando la ecuación (1).

$$x(k)_{norm} = \frac{x(k)}{\max |x(k)|} \quad (1)$$

donde $x(k)_{norm}$ es $x(k)$ normalizada.

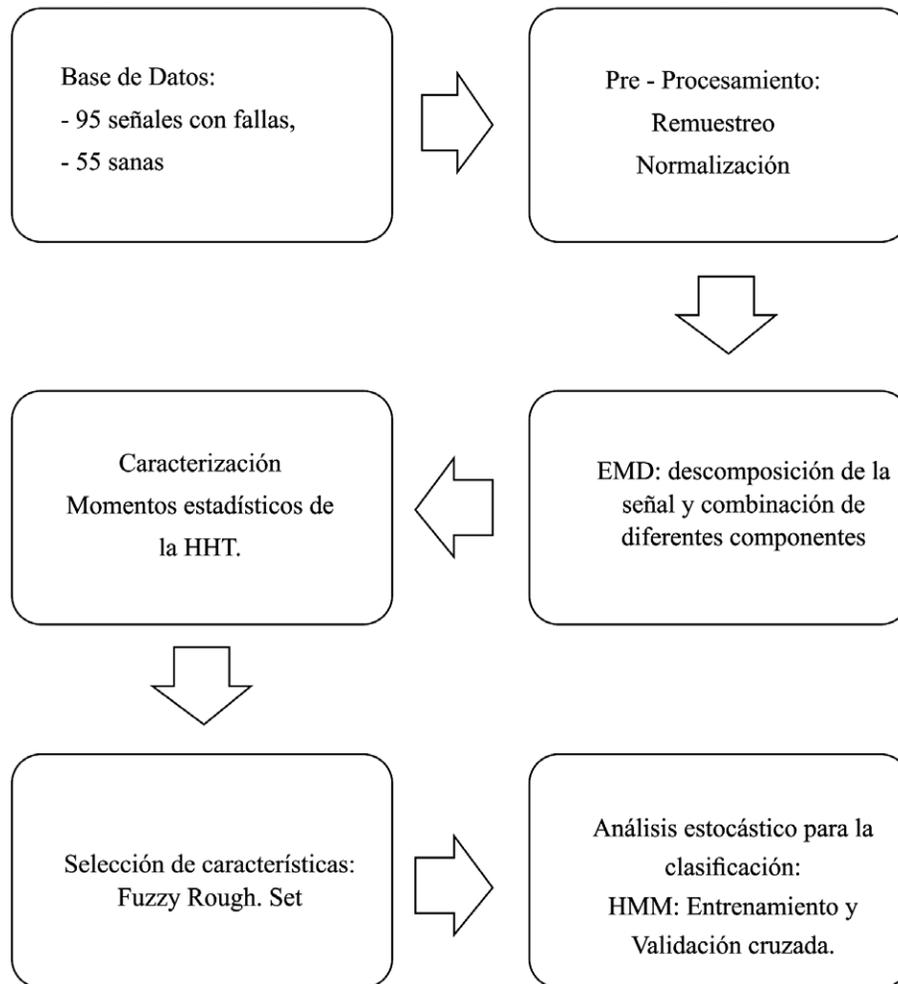


Figura 1. Procedimiento propuesto general.

Fuente: elaboración propia.

Posteriormente se realizó la descomposición de la señal preprocesada en n IMF, donde $4 \leq n \leq 6$ aplicando EMD con una resolución de 40 dB, energía residual de 40 dB y gradiente de 0.1, con el fin de obtener dos constructos, los cuales resultan de reconstruir la señal realizando las características vibratorias del motor y atenuando el ruido. De cada constructo se obtienen 9 características para un total de 18 características por señal, basadas en los momentos estadísticos aplicados a la fase instantánea y amplitud instantánea calculadas mediante la transformada de Hilbert Huang, como se ilustra en la tabla 1, en donde a es la amplitud instantánea, w es la frecuencia angular instantánea, cte indica que una variable se asume como constante para el cálculo de la varianza (var) o de la desviación estándar (std) de la transformada de Hilbert (H).

Posteriormente las características son normalizadas en el rango [0,1] con el fin de mejorar el comportamiento del clasificador y de hacer la selección de características. Con el objetivo de obtener el reducto del espacio de representación, se aplicó el algoritmo Fuzzy Rough Sets con entropía descrito en (Orrego, Becerra, & Delgado-Trejos, 2012) sintonizando el parámetro de vecindad en 0,03 y el de inclusión en 0,6. El análisis estocástico del espacio de representación reducido se efectuó mediante un clasificador HMM ergódico de 2

estados y 3 gaussianas inicializado con un vector de parámetros aleatorios y su entrenamiento se hizo aplicando el algoritmo de máxima esperanza con una convergencia de 10×10^{-7} y un máximo número de iteraciones de 100. Finalmente se aplica validación cruzada 80/20 con 30 repeticiones, para determinar la consistencia y la capacidad de representación del espacio de características.

A continuación se detalla la base de datos de señales de vibración y las técnicas utilizadas.

Base de datos de señales de vibración de motores de inducción

Las señales de vibración fueron adquiridas en el arranque y en el estado estable de tres motores con las mismas características pero con particularidades individuales, así: el primero con fallas en los rodamientos, el segundo con problema en las barras y el tercero no presentaba ningún tipo de fallos. En total se cuenta con 170 señales en las direcciones x y y de motores sanos y con fallos, como se describe en la tabla 2. Las señales de vibración fueron adquiridas a una frecuencia de muestro de 1500 Hz, 12 bits utilizando un acelerómetro MEMS (*Microelectromechanical Systems*) de tres ejes cartesianos (x , y , z) ubicado en el cuerpo del motor.

Tabla 1. Características: momentos estadísticos-HHT.

| Características | | |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| media (std(H(cte,w,a))) | media (std(H(t,cte,a))) | media (var(H(cte,w,a))) |
| media (var(H(t,cte,a))) | media (0.5*sum((H(cte,w,a))) | media (media(H(cte,w,a))) |
| media (max(H(cte,w,a))) | | |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Base de datos de señales de vibración del motor.

| | Motor sano | Falla en rodamientos | Falla barras |
|--------------|------------|----------------------|--------------|
| Arranque | 30 | 38 | 30 |
| Modo estable | 25 | 22 | 25 |

Fuente: elaboración propia.

Descomposición de modo empírico (EMD) para las señales de vibración

Esta descomposición se hace mediante un proceso iterativo adaptativo denominado tamizaje, el cual se emplea para descomponer las señales originales en funciones de modo intrínseco (Intrinsic Mode Function, IMF) que son componentes oscilatorios más sencillos que pueden ser o no lineales y/o estacionarios (Qiwei-Xie, y otros, 2008) (Ramírez-Castro & Montejo, 2011). Así, la descomposición de una señal multicomponente $x(t)$ en L IMF $h^{(i)}(k)$ donde $1 \leq i \leq L$, está dada por la ecuación (2).

$$x(t) = \sum h^{(i)}(t) + d(t) \quad (2)$$

Donde $d(t)$ es un residuo cuya media es diferente de cero y $h^{(i)}(t)$, es cada una de las IMF estimadas de manera iterativa con el algoritmo denominado *sifting*, aplicado a la señal multicomponente residual y se expresa por medio de la ecuación (3).

$$x^{(i)}(t) = \begin{cases} x(t) & , i = 1 \\ x(t) - \sum_{j=1}^{i-1} h^{(j)}(t) & , i \geq 2 \end{cases} \quad (3)$$

De acuerdo con esto, durante la $(n+1)$ enésima iteración el algoritmo *sifting* mejora el IMF $h_n^{(i)}(t)$ estimado temporalmente aplicando los siguientes pasos: 1) Determina el máximo y el mínimo de $h_n^{(i)}(t)$; 2) realiza una interpolación usando spline cúbico, entre los puntos de $h_n^{(i)}(t)$ previamente estimados con el fin de formar una envolvente superior e inferior; 3) computa las medias de todas las envolventes; 4) obtiene el refinado del estimado $h_{n+1}^{(i)}(t)$; 5) vuelve al paso 1 a menos que el criterio de parada haya sido alcanzado por completo. Es importante tener en cuenta que para la primera iteración $h^{(i)}(t)$ se usa $h_1(t)$ como estimación temporal del IMF.

Transformada de Hilbert Huang (HHT) para la obtención de características

La amplitud instantánea $a(t)$ y la fase instantánea $\theta(t)$ de la señal de vibración puede extraerse por

medio de la HHT, la cual se usa para descomponer adaptativamente señales no estacionarias y no lineales. Con esta información puede hallarse la frecuencia instantánea (IF) mediante la ecuación (4) obteniendo resultados para cada instante de tiempo, si hay exclusivamente una frecuencia presente en la señal. Además, con la información de la HHT puede construirse el espectro de Hilbert Huang, el cual proporciona información de tiempo-frecuencia-energía utilizado en el análisis de señales (Guo-liang, Yun-bing, & Gang, 2012).

$$IF(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \theta(t) \quad (4)$$

Modelos ocultos de Markov (HMM) para la clasificación de señales de vibración

Los modelos ocultos de Markov tienen un adecuado desempeño con señales de serie de tiempo por su doble proceso estocástico, aunque la aplicación en la cual se ejecuta con mayor frecuencia es en el reconocimiento del habla (XinGuang-Li, MinFeng-Yao, & JiaNeng-Yang, 2012). Estos son una extensión de las cadenas de Markov, donde cada estado está conectado por medio de un conjunto de distribuciones de probabilidad y cada estado no corresponde a un evento observable. Existen tres tipos de HMM que dependen del tipo de distribución de probabilidad de emisión, así: HMM discretos, continuos y semicontinuos. De igual forma, para el entrenamiento de los HMM existen varios criterios de entrenamiento: algoritmo de estimación de máxima verosimilitud (MLE), máxima información mutua (MMI), entre otros. Este estudio se enfoca en un modelo HMM continuo y MLE para el entrenamiento, dado su buen desempeño en otros estudios.

Tomando $X = \{\varphi_r^{n\varphi_r} : r = 1, \dots, R\}$ un conjunto de entrenamiento de R muestras con categorías $C = \{c_r^{n\varphi_r} : r = 1, \dots, R\}$ para M clases diferentes, i.e., $c_r^r \in \{c_m : m = 1, \dots, M\}$ También, cada muestra $\varphi_r^{n\varphi_r}$ es representada por una secuencia de vectores de características de longitud $n\varphi_r$, así,

$\varphi_r^{n\varphi_r} = \{\varphi_{r,t}: t = 1, \dots, n\varphi_r\}$ El conjunto total de parámetros de los HMM se denota por Θ y está compuesto de M modelos, es decir, $\Theta = \{\lambda_m\}$, donde λ_m denota el conjunto de parámetros de los HMM correspondiente a la clase c_m . El entrenamiento basado en MLE se lleva a cabo teniendo en cuenta la función objetivo expresada en la ecuación (5).

$$f_{MLE}(\theta) = \sum_{r=1}^R \log(P(\varphi_r^{n\varphi_r} | c^r)) \quad (5)$$

La optimización de esta función se logra a partir del ajuste de parámetros para cada modelo separadamente, basado en la observación en el entrenamiento para obtener el máximo valor. Este procedimiento incluye el algoritmo de máxima esperanza (EM), el cual estima la máxima verosimilitud de los parámetros de distribución subyacente a partir de un conjunto de datos cuando los datos son incompletos o tienen parámetros ocultos (Fink, 2007).

Selección de características Fuzzy-Rough Set (FRS) para la reducción del espacio de representación

Los conjuntos difusos rough (FRS) representan la incertidumbre del conocimiento haciendo uso de los conceptos de vaguedad e indiscernibilidad en conjuntos rough, lo cual puede utilizarse de manera efectiva para la reducción del ruido en la información. Esta técnica brinda un medio que permite que los valores ruidosos de los datos reales o discretos (o una mezcla de ambos) puedan ser reducidos eficazmente, aun cuando no se cuente con información suministrada por el usuario, y como tal pueden ser aplicados para la regresión así como la clasificación de bases de datos (Jensen & Shen, 2008). Las ecuación (6) y la (7) expresan la aproximación inferior y superior, respectivamente, usando una relación de similaridad difusa transitiva Y para aproximar una clase equivalente difusa X (Razdikowska & Kerre, 2002).

$$\mu_{\underline{R}_P X}(x) = \inf_y \Psi(\mu_{R_P}(x, y), \mu_X(y)) \quad (6)$$

$$\mu_{\overline{R}_P X}(x) = \sup_y Y(\mu_{R_P}(x, y), \mu_X(y)) \quad (7)$$

Donde Ψ es una implicación difusa, Y una t -norma y R_{x_p} es la relación de similaridad difusa inducida por el subconjunto de características P expresada por medio de la ecuación (8).

$$\mu_{R_P}(x, y) = Y_{a \in P} \{\mu_{R_a}(x, y)\} \quad (8)$$

μ_{R_a} es el grado en que los objetos x e y son similares para la característica a . La función de membrecía de un objeto $x \in \mathbb{U}$, perteneciente a la región positiva difusa, puede definirse mediante la ecuación (9) (MacParthlain & Jensen, 2009).

$$\mu_{POS_P(\mathbb{D})}(x) = \sup_{x \in \mathbb{U}/\mathbb{D}} \mu_{\underline{R}_P X}(x) \quad (9)$$

Donde \mathbb{D} es un conjunto de características de decisiones y el grado de dependencia de \mathbb{D} sobre P es definido por la ecuación (10).

$$\gamma'_P(\mathbb{D}) = \frac{\sum_x \mu_{POS_P(\mathbb{D})}(x)}{|\mathbb{U}|} \quad (10)$$

RESULTADOS

Con el fin de evaluar el sistema de detección de fallas en motores de inducción propuesto, se realizaron pruebas con señales de vibración del eje x y del eje y obteniendo una exactitud de 98,5% y 97%, respectivamente. En la tabla 3 se presentan los resultados en términos de exactitud obteniendo el mejor desempeño 100% en la detección de un motor sano y el más bajo rendimiento, 96% en la detección de fallas en los rodamientos. De igual forma, en la tabla 4 se presentan los resultados obtenidos del análisis estocástico con las señales de vibración en el eje y alcanzando el mejor desempeño en la detección de motores sanos 99% y en detección de falla en las barras, 99% y el más bajo desempeño 94% en fallas en los rodamientos.

Tabla 3. Desempeño clasificador con señales en la dirección x.

| Estados | Acierto |
|----------------------|------------|
| Sano | 100% ± 0,0 |
| Falla en barras | 99% ± 0,03 |
| Falla en Rodamientos | 96% ± 0,05 |
| Promedio | 98,33% |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Desempeño clasificador con señales en la dirección y.

| Estados | Acierto |
|----------------------|------------|
| Sano | 99% ± 0,04 |
| Falla en barras | 99% ± 0,06 |
| Falla en rodamientos | 94% ± 0,06 |
| Promedio | 97,33% |

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 5 se presenta el desempeño del sistema propuesto en términos de precisión usando las señales de vibración del eje x y del eje y en conjunto, para la generación del espacio de representación, lo que permitió obtener un mayor número de características con alta capacidad discriminante y una precisión de 99,33% correspondiente a 1% más alto respecto a los resultados obtenidos con las señales en la dirección x y 2% superior respecto a las señales en la dirección y.

Tabla 5. Desempeño clasificador con señales en la dirección x y y.

| Estados | Acierto |
|----------------------|------------|
| Sano | 100% ± 0,0 |
| Falla en barras | 100% ± 0,0 |
| Falla en Rodamientos | 98% ± 0,02 |
| Promedio | 99,33% |

Fuente: elaboración propia.

Finalmente en la tabla 6 se compara el sistema de detección de fallas propuesto con otros

enfoques basados en HMM pero con diferentes tipos de características, donde el más alto desempeño es evidenciado.

Tabla 6. Comparación con otros estudios.

| Enfoque | Porcentaje de acierto |
|--|-----------------------|
| CHMM – TFP sequences (Geramifard, Xu, & Chen, 2012) | 82,59% |
| HMM-Temporal (Xinmin, Baoxiang, & Yong, 2007) | 91,35% |
| EMD-FSR-HMM (este trabajo) | 99,33% |

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

Se obtuvo un objetivo y exacto mecanismo de clasificación de señales de vibración en motores de inducción para una detección confiable de fallas. La capacidad de representación de la técnica EMD aplicada a señales de vibración y un análisis estocástico por medio de HMM ergódico de características derivadas de momentos estadísticos de la HHT presentan un alto comportamiento en la detección de fallas en barras y rodamientos en motores de inducción. Sin embargo, EMD demanda un costo computacional muy elevado, lo cual lo hace complejo de implementar en un sistema de detección en tiempo real. Aunque este clasificador demostró una alta dependencia con el espacio de representación y los parámetros de inicialización del modelo, la combinación de diferentes IMF disminuyó el ruido y, a pesar de que la información aportada por las señales de vibración en x y en y utilizadas en forma independiente permiten un adecuado desempeño del clasificador, el uso de ambas permitieron mejorar significativamente la exactitud del clasificador.

La reconstrucción de las señales de vibración denominadas constructos a partir de los IMF obtenidos al aplicar la EMD permitieron realzar significativamente factores diferenciadores de las señales de vibración de motores con fallas. Sin embargo,

la selección de las IMF para formar el constructo fue experimental, lo que podría afectar negativamente los resultados con señales de vibración de otros motores. Adicionalmente, EMD presenta el problema de entregar diferentes números de IMF entre señales, denominado problema de mezcla, lo cual afecta el resultado del constructo y, por ende, a las características.

TRABAJO FUTURO

Como trabajo futuro se propone un análisis de vibración de las señales basado en la descomposición de vibraciones de Hilbert (HVD) con el fin de disminuir el costo computacional y mejorar la calidad de la representación. Además se propone un análisis de correlación entre las señales de los ejes x , y y z .

FINANCIAMIENTO

Este trabajo está soportado por el proyecto "Sistemas Inteligentes Web-SINTELWEB" con código Dime 20201009532 de la "Convocatoria Nacional de Apoyo para el Fortalecimiento de Grupos de Investigación o Creación Artística que Soporten Programas de Posgrado" de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín, 2012.

REFERENCIAS

- Askari, M. R. (2010). Broken Bars Detection in Squirrel Cage Induction Motors Using Wavelet Theory. *Journal of Applied Sciences*, 10(6), 477-478.
- Bulla, J. (2011). Hidden Markov Models with t Components, Increased Persistence and other Aspects. *Quantitative Finance*, 11(3), 459-475.
- Cabal-Yepe, E. O.-R.-T.-H.-G. (2009). FPGA-Based Online Induction Motor Multiple-Fault Detection with Fused FFT and Wavelet Analysis. *In International Conference on Reconfigurable Computing and FPGAs, 2009. ReConFig '09*, 101-106.
- Fulufhelo V. U.; Nelwamondo, M., & Marwala, T. (2006). Early classifications of bearing faults using hidden Markov models, gaussian mixture models, mel-frequency cepstral coefficients and fractals. *University of the Witwatersrand, Volume 2(6)*, 1281-1299.
- Geramifard, O.; Xu, J., & Chen, W. (2012). An HMM-based semi-nonparametric approach for fault diagnostics in rotary electric motors. *In 2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 1218-1223.
- Guo-liang, Z.; Yun-bing, W., & Gang, C. (2012). Rotor Break-Bar Fault Diagnosis of Asynchronous Motor Based on Empirical Mode Decomposition. *In Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2012 Asia-Pacific*.
- Hernández, P. L.; Carro, M.; de Oca, J. M.; García, L., & Fernández, S. J. (2008). Optimización del mantenimiento preventivo utilizando las técnicas de diagnóstico integral. Resultados finales y evaluación económica. (Spanish. *Optimization of the Preventive Maintenance Using the Techniques of Integral Diagnosis. Final Results and Economic Evaluation. (English)*, 29(2), 35-45.
- Ho Soon, L.; Chong, K. T., & Su, H. (2006). Motor fault detection method for vibration signal using FFT residuals. *International Journal of Applied Electromagnetics & Mechanics*, 24(3/4), 209-223.
- Jensen, R., & Shen, Q. (s.f.) Computational intelligence and feature selection: rough and fuzzy approaches. Wiley.
- MacParthalain, N., & Jensen, R. (2009). Measures for Unsupervised Fuzzy-Rough Feature Selection. *In Ninth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications, 2009. ISDA '09*, 560-565.
- Ocak, H., & Loparo, K. A. (2001). A new bearing fault detection and diagnosis scheme based on hidden Markov modeling of vibration signals. *In 2001 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2001. Proceedings. (ICASSP '01 (05))*, 3141-3144.
- Orrego, D. A.; Becerra, M. A., & Delgado-Trejos, E. (2012). Dimensionality reduction based on fuzzy rough sets oriented to ischemia detection. *In 2012 Annual International Conference of the*

- IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, 5282-5285.
- Oweis, R. J., & Abdulhay, E. W. (2011). Seizure classification in EEG signals utilizing Hilbert-Huang transform. *BioMedical Engineering OnLine*, 10(1), 38-52.
- Patel, R. K.; Agrawal, S., & Joshi, N. C. (2012). Induction motor bearing fault identification using vibration measurement. In *2012 Students Conference on Engineering and Systems (SCES)*, 1-5.
- Patil, S. S., & Gaikwad, J. A. (2013). Vibration analysis of electrical rotating machines using FFT: A method of predictive maintenance. In *2013 Fourth International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies (ICCCNT)*, 1-6.
- Qiang, S., & Changjian, F. (2012). Hybrid SVM-HMM Diagnosis Method for Rotor- Gear-Bearing Transmission System. *Journal of Computers*, 7(9), 2324-2329.
- Qiwei-Xie, Bo-Xuan, Silong-Peng, Jianping-Li, Weixuan-Xu, & HAN, H. (2008). Bandwidth empirical mode decomposition and its application. *International Journal of Wavelets, Multiresolution & Information Processing*, 6(6), 777-798.
- Radzikowska, A. M., & Kerre, E. E. (2002). A comparative study of fuzzy rough sets. *Fuzzy Sets and Systems*, 126(2), 137-155.
- Ramírez-Castro, R. I., & Montejo, L. A. (2011). Transformada de Hilbert, descomposición modal empírica y sus aplicaciones en el análisis de vibraciones libres. *Hilbert transform, empirical mode decomposition and its applications to free vibration analysis. (English)*, 11(2), 121-132.
- Santana, D., & Madiedo, R. (2007). Valoración de métodos para la determinación de la eficiencia de motores de inducción que accionan cargas en régimen de trabajo continuo variables en el tiempo. (Spanish). *Valoración or Methods to Determine the Induction Engines Efficiency That Carry Loads in a Continuous Work Regime Variables in Time. (English)*, 28(3), 25-29.
- Shrivastava, A., & Wadhvani, S. (2014). An approach for fault detection and diagnosis of rotating electrical machine using vibration signal analysis. In *Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE)*, 1-6.
- Soualhi, A.; Medjaher, K., & Zerhouni, N. (2015). Bearing Health Monitoring Based on Hilbert; Huang Transform, Support Vector Machine, and Regression. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 64(1), 52-62.
- XinGuang-Li, MinFeng-Yao, & JiaNeng-Yang. (2012). Speech Recognition Approach Based on Speech Feature Clustering and HMM. *Journal of Computers*, 7(9), 2269-2275.
- Xinmin, T.; Baoxiang, D., & Yong, X. (2007). Bearings Fault Diagnosis Based on HMM and Fractal Dimensions Spectrum. In *International Conference on Mechatronics and Automation, 2007. ICMA 2007*, 1671-1676.





Optimization of a vehicular routing using simple genetic chu-beasley algorithm

Optimización de un ruteo vehicular usando algoritmo genético simple chu-beasley

Guillermo Roberto Solarte Martínez*

Andrés Gaspar Castillo Sanz**

Guillermo Rodríguez Gahona***

Fecha de recepción: 21 de enero de 2014

Fecha de aceptación: 19 de enero de 2015

Citation / Para citar este artículo: Solarte Martínez, G. R., Castillo Sanz, A. G., & Rodríguez Gahona, G. (2015). Optimization of a vehicular routing using simple genetic chu-beasley algorithm. *Revista Tecnura*, 19(44), 93-108. doi:<http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.2.a07>

Abstract

The research presented in the article is geared towards the area of genetic algorithms in the optimization of resources and processes, and then a case study is set based on vehicular routing and optimization of the same, applying the genetic algorithm of Chu-Beasley. This study, which started on November 2013 and finished on March 2014, was applied in Bogotá city, as it is the capital of Colombia. This metropolis counts with many industrial areas, gathering centers, warehouses and other commercial activities. Likewise, the growing of the capital in the last years has been significant, which has generated an exponential territorial extension, causing mobility problems and transport. For that reason, it is imperative for some warehouses that have to distribute their products, to optimize the routes and guarantee effectiveness and efficiency in delivery.

Keywords: chromosomes, genetic algorithms, mutation, probability, process, recombination theory, routing, species, vehicular.

Resumen

La investigación presentada en el artículo está orientada hacia el área de los algoritmos genéticos en la optimización de recursos y procesos; a continuación se establece un estudio de caso fundamentado en el ruteo vehicular y la optimización del mismo, aplicando el algoritmo genético de Chu-Beasley. Este estudio, que inició en noviembre de 2013 y terminó en marzo de 2014, se aplicó en la ciudad de Bogotá, D.C., por ser la capital de Colombia. Esta metrópoli cuenta con innumerables zonas industriales, centros de acopio, almacenes y demás actividades comerciales. De la misma manera, el crecimiento de la capital en los últimos años ha sido significativo, lo que ha generado una extensión territorial exponencial,

* Ingeniero de Sistemas. Magíster en Investigación de Operativa y Estadística; candidato a doctor en Informática. Docente Investigador, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia. Contacto: roberto@utp.edu.co

** Ingeniero Informático. Doctor en Ingeniería del Software. Docente Investigador, Universidad Pontificia de Salamanca, Madrid, España. Contacto: andres.castillo@upsam.es

*** Estudiante de Sistemas y Computación, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia. Contacto: guiro4321@gmail.com

causando problemas de movilidad y transporte. Por ello es imperioso para algunas empresas que deben distribuir sus productos optimizar los recorridos y garantizar efectividad y eficiencia en las entregas.

Palabras clave: algoritmos genéticos, cromosomas, enrutamiento, especies, mutaciones, probabilidad, proceso, recombinación, teoría, vehicular.

INTRODUCTION

The natural selection of the species is considered one of the most important theories in recent times since it determines the evolutionary character of the living beings, specially of the human beings; starting from this, some sciences and disciplines have been benefited their discursive structure to implement various explanatory strategies of the own problems of those disciplines. In this sense, appears the well-known genetic algorithms, and its creator Jhon Holland (1962), comprehends the importance of the evolutionary theory specially the related with the adaptive systems, starts the process for the creation of such algorithms that search fundamentally to design artificial systems that give account of the mechanisms and working of the natural systems. After the creation of the genetic algorithms by Holland, one of his students David Goldberg (1972) decided to introduce the algorithms designed by his teacher to the plane of the industrial problems, although he did not account with the support of his mentor, Golderg could have success in his enterprise establishing the algorithms in the optimization of the industrial process. In this way, the evolutionary theory and selection of the species become in a method that as engineering as other disciplines adapt to transform and improve the industrials and entrepreneurial process.

This work intends to apply the genetic algorithms (Rondon Villareal, 2010) in the optimization of the particular case of vehicular routing, potentiating its effects and improving the industrial conditions. It is very important to point out that for the application of this specific situation, the Chu-Beasley genetic algorithm will be used, since this allowed a particular management of the object

population of study. The following research pretends to realize a conceptual routing by the genetic algorithms, their classifications and advantages of the applications, showing from a concrete case the importance of its use in determinate situations.

GENETIC ALGORITHMS

Genetic algorithms can be defined as

The AG are adaptive methods that can be used to resolve seeking and optimization problems. These methods are based in the genetic process of the live organisms. Along the generations, the populations evolve in the nature according to the principles of the natural selections and the survival of the strongest, postulated by Darwin (1859). (Cerón, 2012).

It means, the genetic algorithms intend to make use of the genetic development of the living beings to implement mathematically systems which allow the optimization of diverse process. (Pessoa Artut, 2011). This work is inspired particularly in the selection of the species theory, by Darwin and the genetic, this offers an adaptive optimization mechanism on the basis of probability, the survival and the adaptation. The principles of the biology that guide fundamentally the genetic algorithms (Gestal, RiveRo, Rabuñal, & DoRaDo, 2010, p. 30) can be considered the following:

1. The evolution process that operates over the chromosomes.
2. The natural selection is the union between the chromosomes and the actuation of the decoded structures.
3. The reproduction process occurs when the evolution take place, maybe through mutations,

where the chromosomes of the children change slightly of the parents or by recombination process. (M. Cerrolaza). These principles began to be decoded on computerized simulations, which allow starting the adaptability process for the algorithms. One of the first investigations that gave the denomination of genetic algorithms is the one made by Bagley, who developed a test to *control the game of six peons watching their tasks*; this test allow to find the necessary conditions to use in an assessment function of the game, this way discovering that the algorithm can be used in different ambits. On the other hand, the contribution of Rosemberg is the application of the algorithms in engineering, which process provides substantially the optimization of functions on industrials works. To solve problems using genetic algorithms is indispensable make use of the chromosomal representation of the population.

- The way to create the initial population.
- An assessment function.
- The genetic operators.

The assessment of the parameters that the algorithm uses (M. Cerrolaza).

The first item refers to the importance to code the design of variables of strings in finite length, as resemble in the genetic the chromosome strings, but in the algorithms must be realized from any kind of alphabet, which in this case the binary code is used. The second aspect is about the election of the population, this selection should be random. The third ambit in the genetic algorithms is the linking of the algorithm with the problem to be solved, it means, the exposition of one of the chromosomes to the function of merit, which indicates the reaction that is the reason of the success or the failure of the algorithm, and its applicability. The fourth aspect is the genetic operators that can be considered especially with the crossings, mutations and generations, which produce a variation in the result. And the last factor in the algorithms is the assessment, which involves different elements

that compose the algorithm and the process to be solved (size of the population, reproduction probability, etc.) Genetic algorithms are an adaption of the laws of the biology in the optimization and solution of several problems using the changes and the variations of the environment, where the situation is executed. The basic genetic algorithm needs fundamentally the following requirements to work:

Generation of the initial population

This is the starter element to elaborate a genetic algorithm, therefore it is very important to obtain the results. The selection of the population is random commonly, that is to say, choosing some characters of the string, it is important that the population is enough big or long to and so is diverse and nurtured; but it cannot be too long because can produce problems in the code. It is very important to understand that the size of the population affect the successful of the algorithm, due to the fact that a small population or a big one do not guarantee diverse solutions, for many theoretical the perfect size would be between 1 to 21. The population use to be chosen generating randomly *bunches*, but also can be chosen through a specific function or generate a portion of an individual an after that, create the search. The *operator for selection* is used for the selection to choose the best adapted individuals keeping the characteristics of the valuable solutions and hence the possibilities of reproduction are bigger, but in some situations the operator select those individuals that are not enough adapted because these ones can contain useful information necessary for the solution. In the selection operator, exist two selection ways: *By ranking* "Developed by Whitley (1989) which consist in calculate the reproduction probabilities attending the ordination of the population by the adaptive value. And the *selection by Tournament* reports a computational value very low due to its simplicity. A group of t individuals are selected (commonly $t = 2$, binary tournament) and a random number between

0 and 1 is generated. If this number is less than certain threshold k (usually 0.75), the individual with the best adaptation is selected to reproduce and if the number is less than K , the individual with the worst adaptation is selected.

Representation of the individuals

The main types of representation can be classified as follows:

- Binary: where each gen of the chromosome is a bit (0 or 1).
- Example: 010011000. Integer: Where each gen of the chromosome is an integer.
- Example: 106-107-108. Real: Where each gen is a real number.
- Example: 1.28-3.26-5.23

Permutation: Where each gen is an integer number but cannot be repeated in the chromosome. *Codification scheme*: The genetic algorithms are codified as the genetic strings; with the purpose of generate genotypes and phenotypes (rizar Mesa, 2014)

The genotype of an organism is the total sum of all the genes it inherited, it is a pattern or a kind of model designed to serve as a guide for the development of the organism, so that it becomes the same kind of being the parent or parents of the proceeding. At the cellular level, the genotype is the model that guides the development and activities of the cell and is transmitted to daughter cells when the cell divides more. The phenotype of an organism includes factors such as physical appearance, biochemical processes occurring in the body and behavior, and living in a world and interact with others. In summary, the phenotype of an organism is how it looks to observers. It means, give possible solutions to several problems, optimizing such solutions, transmitting it from generation to generation looking for the most suitable, that is the reason why the genetic algorithm needs to use a simple alphabet –that generally is the binary code– and

The variables that represent the parameters of the problem must be discretized to represent it with string bits. It must be used enough resolution able to ensure that the output has a suitable level of precision. It is assumed that the discretization is representative of the objective function. (Zimmermann, 2013).

The crossing: it is a mechanism of analysis and interpretation of data, which is used to obtain a screening of the information of the populations and makes multiples mixtures until create better individuals, each time more adapted to the conditions. There are many methods for those combinations:

The *crossing point*, where a point is selected in the string of the parents, the genes are crossed to the left. In the *n point crossing*, many positions in the string of the parents are chosen and the genes in each side of the position are crossed. In the *uniform crossing*, it is decided which of the parents assume each position of the string. It is important taking into account in the crossings, that the good features must be inherited or such crossings must not leave that the children have worst features that their parents.

MUTATION

Mutation intends to produce fundamentally innovating solutions since the alteration of some genes in an existent solution to promote the variability in the population, creating an element of randomness in the environment of the population. To realize mutations, it can be since the most elemental way in which each gen mutates randomly with totally freedom and independence, until complex configurations where the mutation is realized taking into account some characteristics of the genes.

Schaffer & col. find that the effect of the crossing in the search is lower than the expected. They use the well-known primitive evolution, where the evolutionary process consists only of the selection and mutation. They also find that such primitive evolution exceeds to an evolution based on exclusively in the selection and crossing. (Goldberg, 2011).

The mutation is constituted in one of the fundamental elements in order to prevail the population and even that the conditions of adaptability are higher and better, some people consider the mutations fundamental for the heuristic exercise of the genetic algorithms.

Substitution of the population: With the crossings and the mutations, appear new populations that are denominated the lineage or descendants that will create the new populations, such creation of new populations have three different ways:

- “When the numbers of individuals reach certain number, a subset of the population is removed containing the less adapted individuals.
- Each time a new individual is created in the population, the less adapted is erased and the new one takes its place.
- Each time a new individual is created in the population, a solution is deleted randomly independently of its adaptation”.
- Referent to the stop criterion, this respond to a maximum number of descendants or to the resolution time, or with the situation and condition of the population.

The conditions mentioned before constitute the simple genetic algorithms, but exist certain modifications to the same that will be described as follows:

CHU-BEASLEY ALGORITHM

The use of genetic algorithms in the solutions of determinate problems is a case of the metaheuristic (canarias, 2013), General strategies to build algorithms that are above heuristics, and extend somewhat beyond, called metaheuristics, i.e., to solve a kind of general computational problem, using the parameters given by the user on generic and abstract procedures waiting a manner efficient. Typically, these procedures are heuristic. Due to the fact that it works under the computational system, that is why we talked about the simple genetic algorithms described previously; however,

it appears new modification in these algorithms, which are not going to be described in this research. This work is focused in a specific algorithm due to the features of the problem and its optimization, the algorithm is known as the Chu-Beasley algorithm. This algorithm consists fundamentally, in a modification of the simple genetic algorithm with some additional considerations that allow a higher optimizing of the possible solutions.

The algorithm must satisfice some characteristics:

- The initial population must be totally heterogeneous.
- The selection process is by tournament.
- The recombination generates two children; one of them will be selected through any criteria.
- The Chu-Beasley algorithm must have two alternative parents for the selection by random lottery, these two alternatives are crossed, obtaining a child alternative, if is possible, the mutation is applied, if not, it must be repaired with a reparation method to acquire an observable alternative that achieve the necessary number of zeros in the population.
- In each insistence, only one individual is entered to the population, taking into account the next parameter: The current alternative or resultant will be replaced by a worse alternative of the existent population. Moreover, if the resultant alternative is not better than the worse alternative of the existent population, this one will not be taking into account and will be discarded.

OPTIMIZING OF THE VEHICULAR ROUTING USING THE CHU-BEASLEY GENETIC ALGORITHM

The case of Super Almacenes Olímpica (SAO), Bogotá, D.C.

Taking into account the importance of the genetic algorithms in the optimizing of the resources and process, following, it is established a case based on the vehicular routing (Pessoa Artut, 2011) and the optimizing of it, applying the Chu-Beasley genetic algorithm.

Geographical framework

The case of study will be applied in the Bogotá city because is the capital of Colombia, this metropolis counts with many industrial areas, gathering centers, warehouses and other commercial activities; in the same way, the growing of the capital in the last years has been significant, which has generated an exponential territorial extension, causing mobility problems and transport (Claudia Archetti, Martin W. P. Savelsbergh, M. Grazia Speranza, 2006), for that reason it is imperative for

some warehouses that have to distribute their products, to optimize the routes and guarantee effectiveness and efficiency in delivery.

Bogotá D.C is divided in twenty locations (See figure 1), such division allows to establish travels and measure the distances, and also set up routes due to the distances and the security and mobility problems.

Taking into account the amplitude of the Colombian capital, for the case that is going to be developed in the present work, the vehicular



Figure 1. Map of Bogotá, D.C. by locations.

Source: (Bogotá, 2014).

routing is going to be executed in three of the twenty locations, supporting them in the distribution of the products of one of the most important chain warehouses of the city. In this sense, the optimizing of the vehicular routing (Gruttner & Pinninghoff, 2009) will be realized in the distribution of products of Olímpica warehouses that have the mission of: The Olympic Stores born in the Colombian Atlantic Coast in the hands of the Char family, which starts especially drugstores that quickly become chain are one of the first stores to build the format superstore, i.e., in one place offer all kinds of items needed for

homes, drugstore, fruits, vegetables, food, restaurant, appliances, etc. Today it is one of the few stores that do not have foreign capital in Bogotá, is from the eighties offering service. The Super Almacenes Olímpica (SAO) are very appreciated in the capital, for the monthly promotions that realize a their low prices that are specially offered to the people who are joined to Compensar; likewise, the mall of food, which is very concurrent, therefore, every day, the restaurants should receive supplies coming from other regions, and they are distributed by trucks in routes by localities (See figure 2).

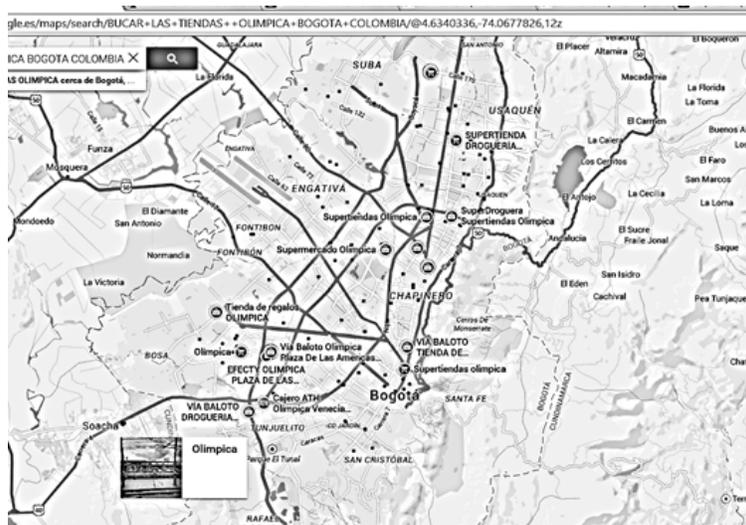


Figure 2. Location of the SAO warehouses in Bogotá, D.C.

Source: (Tiendeo.com | Gran Vía 395, 2013).

As it was mentioned before, for the concrete case of the application of the Chu-Beasley algorithm in the vehicular routing of the SAO warehouses, fourteen (14) warehouses (See figure 3) are going to be used, which are located in Chapinero, Barrios Unidos and Teusaquillo as follows:

RESEARCH METHODOLOGIES

Description of the problem

The Super Almacenes Olímpica (SAO) must do many daily routes to carry the products to the



Figure 3. Sample of the warehouses.

Source: (Tiendeo.com | Gran Vía 395, 2013).

warehouse, the drugwarehouse, the restaurants by all the city, such products are delivered by trucks that supply the warehouses of the different locations. Only one truck distributes the products to the localities of Chapinero, Teusaquillo and Barrios Unidos, this starts from a X central, these centric locations have the majority of the offices, malls, and also have two difficulties, by one side is the mobility and in the other hand the concentration of the population; for that reason it is necessary to optimize the vehicular routing, improving the times and realizing faster deliveries. The SAO enterprise count with vehicles for the distribution of their own brand (Brand Olympic), in the entirely city of Bogotá, D.C., due to the huge size of the warehouses, the distribution in the urban area and taking into account the problematic of the transport in Bogotá, it is indispensable to divide the delivery of the products, nevertheless, due to these measures taken, the delivery process remains slow in the delivery of their products to the warehouses, and there is not any standard to follow, and that is why their deliveries still are unsuccessful.

To achieve the optimizing of the vehicular routing, the Chu-Beasley genetic algorithm will be used to find the best route and in this way improves the times in the deliveries.

For the problem of the vehicular routing, the traveling salesman problem will be taking into account, thus:

The vehicular routing problem (VRP) has several applications in many industries. Some of these applications can be seen in the enterprises that distribute perishable foods and drinks, in the public services, logistic operators, garbage collection, postal service, etc. In concrete, the VRP came up as a generalization of the traveling salesman problem. In this problem, a traveler has to visit a group of cities, crossing for each one exactly one time, in order that the salesman returns to the city where he started in a shorter distance. When exist more than one traveler, we are taking about the m-traveling salesmen problem. (Quintero, 2012).

Apparently, the distribution should be by locations, but it is not very efficiently doing it in that way, this is because the distribution of the warehouses is not uniformly distributed in each location, for example, in the location of Chapinero exists 10 supermarkets, meanwhile in the location of Teusaquillo there are only 2. As a probe case, a sector guided by the map is going to be taken and the location of the different warehouses. The sector is taken by parts from the locations of Chapinero, Barrios Unidos and Teusaquillo with 14 headquarters in total.

PROCEDURES AND ALGORITHMS

To reach the optimizing of the vehicular routing of the Super Almacenes Olímpica in the locations of Chapinero, Teusaquillo and Barrios Unidos, the process will begin making the measures of the distance between each one of the 14 warehouses, where the optimizing of the vehicular routing will be implemented. To measure the approximately distances between the different headquarters, it was used the "Distance Measurement Tool" from Google, which allow to measure an approximately distance between two points (See figure 4). For this specific case, it has to be taking into account the routes of the Bogotá city, it is established that the distance [A-B] is different to the distance [B-A], for this reason, the number of possible combinations for this case is given by n , where n is the number of headquarters.

CODIFICATION

Generally, it is used the binary code to realize the codification of the population, however, for the Travelling Salesman Problem (TSP), this kind of representation it is not very suitable. An entirely codification is use for each one of the headquarters that goes from the 1st until the 14th, that is way the chromosomewould have 14 genes (14 headquarters), each number represents the name of the warehouse or headquarter, according to table 1.

Table 2 presents an example of one of the chromosomes or possible solution for the proposed



Figure 4. Distance measuring.

Source: (Google, 2005).

Table 1. Addresses from the sample warehouses.

| Warehouse | Code | Address |
|----------------|------|-------------------------|
| Headquarter 1 | 1 | cr 40 # 22c-10 |
| Headquarter 2 | 2 | cr 13 # 56-59 |
| Headquarter 3 | 3 | cII 63 # 16-25 |
| Headquarter 4 | 4 | cII 63a # 16-55 |
| Headquarter 5 | 5 | cII 64 # 11-05 |
| Headquarter 6 | 6 | cl 72 # 13-85 |
| Headquarter 7 | 7 | cr 7 # 82-82 |
| Headquarter 8 | 8 | Cr 24 # 63f-55 |
| Headquarter 9 | 9 | cr 72 # 53-12 |
| Headquarter 10 | 10 | cII 69 # 44-20 |
| Headquarter 11 | 11 | Av La Esperanza # 69-07 |
| Headquarter 12 | 12 | Dg 40 # 45A-04 |
| Headquarter 13 | 13 | CII 53 # 28-05 |
| Headquarter 14 | 14 | CII 67 # 10-22 |

Source: own work.

Table 2. Chromosome 1.

| Gen1 | Gen2 | Gen3 | Gen4 | Gen5 | Gen6 | Gen7 | Gen8 | Gen9 | Gen10 | Gen11 | Gen12 | Gen13 | Gen14 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |

Source: own work.

case. Each gen# indicates the order of the headquarter within the route (chromosome), and the associated number indicates the number of the headquarter from the chromosome.

You must take into account that when you analyze the aptitude assessment of the chromosome as a feasible solution, you should add the routes that are between each of the headquarters according to the order described in the chromosome. This can be done using the data from table 3.

Distances table

Table 4 presents the distance between each of the headquarters, the data is represented in kilometers. You must take into account as stated before, for this

case the distance of [A,B] is different to the distance [B,A], this is due to the different conditions of transport in the city, where most of the times differ in big size these two distances. The data provided in table 4 was extracted using GoogleMaps (“Distance Measurement Tool”) to approximate the distances among the geographical locations of each warehouse.

Selection method

As a selection method we use the selection tournament method, for this case were selected randomly couples of individuals to compete against each other and the most suitable according to the aptitude assessment will be able to be part of the next generation with their genes intact.

Table 3. Chromosome 2.

| Gen1 | Gen2 | Gen3 | Gen4 | Gen5 | Gen6 | Gen7 | Gen8 | Gen9 | Gen10 | Gen11 | Gen12 | Gen13 | Gen14 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 14 | 10 | 3 | 4 | 11 | 6 | 7 | 13 | 9 | 1 | 8 | 12 | 5 | 2 |

Source: own work.

Table 4. Distances of the fourteen warehouses.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | r 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Headquarter 1 | 0 | 3,19 | 3,46 | 3,54 | 5,5 | 5,68 | 7,12 | 4,45 | 2 | 4 | 3,77 | 1,48 | 2,06 | 5,7 |
| Headquarter 2 | 3,25 | 0 | 0,7 | 0,78 | 0,8 | 1,75 | 2,83 | 1,68 | 5,56 | 2,83 | 5,38 | 3,03 | 1,45 | 1,08 |
| Headquarter 3 | 3,03 | 0,78 | 0 | 0,08 | 0,58 | 1,24 | 2,61 | 0,86 | 4,93 | 2,07 | 4,97 | 2,82 | 1,37 | 0,88 |
| Headquarter 4 | 3,52 | 8,1 | 0,08 | 0 | 0,55 | 1,12 | 2,51 | 0,89 | 4,94 | 2,03 | 5,03 | 2,95 | 1,45 | 0,78 |
| Headquarter 5 | 3,86 | 0,85 | 0,59 | 0,52 | 0 | 0,95 | 2,11 | 1,26 | 5,35 | 2,38 | 5,47 | 3,33 | 1,84 | 0,4 |
| Headquarter 6 | 4,6 | 1,8 | 1,21 | 1,14 | 0,96 | 0 | 1,51 | 1,21 | 5,17 | 1,97 | 5,65 | 3,9 | 2,56 | 0,74 |
| Headquarter 7 | 5,95 | 2,84 | 2,58 | 2,48 | 2,13 | 1,48 | 0 | 2,66 | 6,44 | 3,24 | 7,01 | 5,36 | 3,94 | 1,77 |
| Headquarter 8 | 3,69 | 1,7 | 0,91 | 0,89 | 1,26 | 1,23 | 2,72 | 0 | 4,15 | 1,14 | 4,44 | 2,8 | 1,7 | 1,37 |
| Headquarter 9 | 5,12 | 5,6 | 4,93 | 4,96 | 5,4 | 5,2 | 6,48 | 4,15 | 0 | 3,24 | 2,02 | 3,75 | 4,56 | 5,55 |
| Headquarter 10 | 4,26 | 2,84 | 2,04 | 2,03 | 2,35 | 1,96 | 3,28 | 1,13 | 3,2 | 0 | 3,97 | 3,06 | 2,51 | 2,39 |
| Headquarter 11 | 3,77 | 5,39 | 4,95 | 4,96 | 5,56 | 5,62 | 6,88 | 4,31 | 2,1 | 3,92 | 0 | 2,63 | 4,02 | 5,65 |
| Headquarter 12 | 1,42 | 3 | 2,84 | 2,93 | 3,38 | 3,91 | 5,42 | 2,78 | 3,74 | 3,08 | 2,68 | 0 | 1,58 | 3,7 |
| Headquarter 13 | 2,04 | 1,41 | 1,35 | 1,45 | 1,84 | 2,55 | 3,96 | 1,69 | 4,55 | 2,52 | 4,04 | 1,59 | 0 | 2,19 |
| Headquarter 14 | 4,19 | 1,12 | 0,85 | 0,75 | 0,35 | 0,74 | 1,81 | 1,37 | 5,53 | 2,4 | 5,73 | 3,69 | 2,19 | 0 |

Source: own work.

Size of the sample

It is used the probabilistic sampling method "simple random sampling", as a method for sample selection. Equations (1), (2) and (3) are used to compute the size of the sample. All of them rely on the finite property of the population.

$$n = \frac{N\sigma^2 Z^2}{(N-1)e^2 + \sigma^2 Z^2} \tag{1}$$

The possible combinations are given by the factorial of n (i.e., n!) Therefore it is not feasible to compute the total population (N), so we have that N = n! , where n corresponds to the number of headquarters of the case to analyze.

Where

$$n = \frac{N\sigma^2 Z^2}{(N - 1)e^2 + \sigma^2 Z^2} \tag{2}$$

- N = 14! = 87178291200
- N-1 = 87178291199
- Z = 1,96
- Z² = 3,8416
- Q = 0,5
- Q² = 0,25
- E = 95% = 0,05
- E² = 0,0025

$$n = \frac{N\sigma^2 Z^2}{(N - 1)e^2 + \sigma^2 Z^2} \tag{3}$$

Replacing

$$\frac{87178291200 * 0,25 * 3,8416}{(87178291199 * 0,0025) + (0,25 * 3,8416)2a}$$

N = size of the sample

N = 85, 1204

Now, the work will be realized with a sample of 386 individuals from a population of 87178291200. (Condori, 2014).

CHROMOSOME

According to the size for the calculation of the sample, 386 chromosomes are selected randomly, and we will call it as the initial population (P0). P0 is referred in the file PoblacionesGeneradas.xlsx on the sheet Poblacion Inicial.

The calculation of the aptitude for each individual is realized. This is achieved using the data distance indicated in table 4. For this, we take the number of the gen1 (that represents a headquarter) and the distance from gen2, the distance of the gen2 with the gen3 and thus successively until gen14, where is set the distance with the gen1, and at the end, the entirety of the distances between the genes are summed up, this result indicates the total distance traveled by a vehicle X for all the headquarters, returning to the headquarter where it started. An example of this is presented in table 5.

Table 5. Example of aptitude of the chromosome.

| Gen Number (i) | Gen1 | Gen2 | Gen3 | Gen4 | Gen5 | Gen6 | Gen7 | Gen8 | Gen9 | Gen10 | Gen11 | Gen12 | Gen13 | Gen14 |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| No of headquarter | 13 | 4 | 3 | 14 | 5 | 7 | 11 | 6 | 1 | 10 | 8 | 12 | 9 | 2 |
| Distance km between Gen sub(i) and the gen sub(i+1) | 1,45 | 0,08 | 1,12 | 0,35 | 2,11 | 7,01 | 5,62 | 4,6 | 4 | 1,13 | 2,8 | 3,74 | 5,6 | 1,45 |

Source: own work.

Total Distance Traveled = DTR = Suma ([Gen1,Gen2] + [Gen2,Gen3] +..... + [Gen14,Gen1]) DTR = 41,06 km. In this way you will have that for the previous chromosome the calculation of its aptitude is = DTR = 41.06 km.

As a method of selection, we will use the tournament deterministic method, where after having the initial population (P0), we will select random couples that will compete against each other to determine who will pass to conform the next population (P1), the criterion to define the winner of the tournament is by the adding between each of the genes, and it is selected that one, which distance is the shorter, that is to say, calculating the aptitude of each one of the genes, the most suitable will be the one of lower DTR (Granada, 2014).

Step followed, the genetic operator of crossing will be used. Given the big multitude of algorithms of crossing and after the assessment of the most relevant, it is decided to initially use the algorithm of crossing of 1 point. In this step and taking into account the essence of the algorithm used for the crossing of a point, came up the need of adding a new method of reparation, which guarantee that after the crossing, the resultant chromosome cover all the headquarters without exception, which would guarantee the uniqueness of their genes.

Crossings in order (OX)

This crossing consists of randomly selecting a substring of a parent A. That substring will be given to the equal son, that is, same genes, same order. The genes of the substring of the parent A are removed from the parent B, the remaining genes of the parent B will be those that are missing in the son. See figure 5 for an explanation.

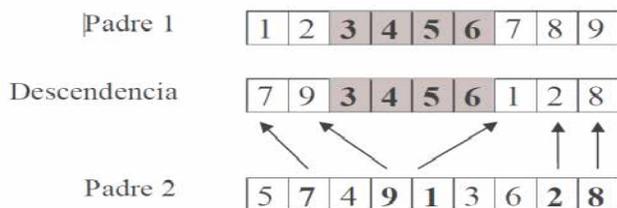


Figura 2.9 Aplicación del operador OX.

Figure 5. Crossing OX.

Source: (Rodriguez Gonzales , 2010).

Mutation operator

The mutation operator will be applied at a rate of 1.04% of the population, which is equivalent according to the population P to 4 individuals, this value will be constant in each generation (yciencia, 2014).

Replace of the population

Now, it will be obtained a population P(temp), with a number of individuals equal to the P(0) (current population), for this, is applied a replacing, taking into account the population obtained during the application of the different operators that we will call P(temp) and the current population P(0) which we will call P(i). The replacement will be used to obtain the new population P(i+1), taking into account the following restriction:

Each individual from P(temp) will be part of the new population P(i+1) if and only if, its aptitude assessment is better than the aptitude assessment of an individual from P(i), otherwise it will not be taken into account. After analyzing the totality of the individuals from P(temp), we will obtain the new population P(i+1), this population will return to the beginning of the iteration and thus until the stop criterion.

Stop criterion

As stop condition, it is established a condition of number of iterations, which is composed as follows:

- In each iteration is saved the individual whose aptitude assessment will salient (in the case when more than one individual exist with the best assessment, only one will be selected randomly). This individual will be maintained until another one with better aptitude assessment replaces it.
- After 1000 iterations the process will end, and displays the chromosome with better aptitude.

Flowchart

The following are the steps taken by the G.A. A flowchart representation is provided in figures 6, 7 and 8.

1. Start with an initial population, which is randomly generated.
2. Aptitude assessment of each individual.
3. Apply the operators (Selection, crossing and mutation).
4. Generate the new population.
5. Go to step 2 until the stop condition be satisfied.
6. When the stop condition is accomplished, return to the best individual found.

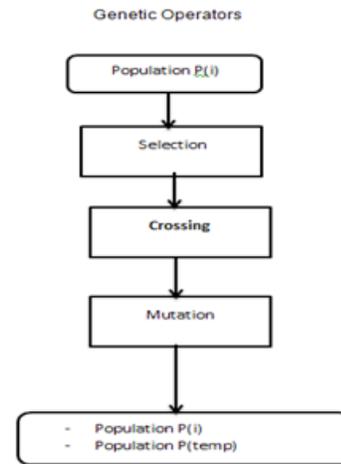


Figure 7. General operators.

Source: own work.

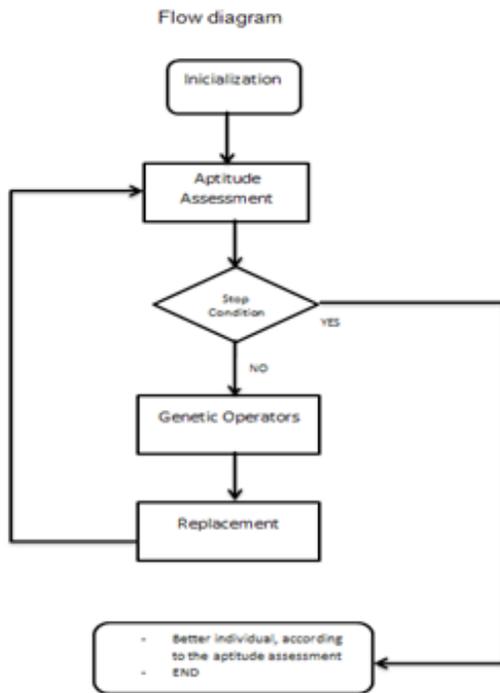


Figure 6. General flow diagram.

Source: own work.

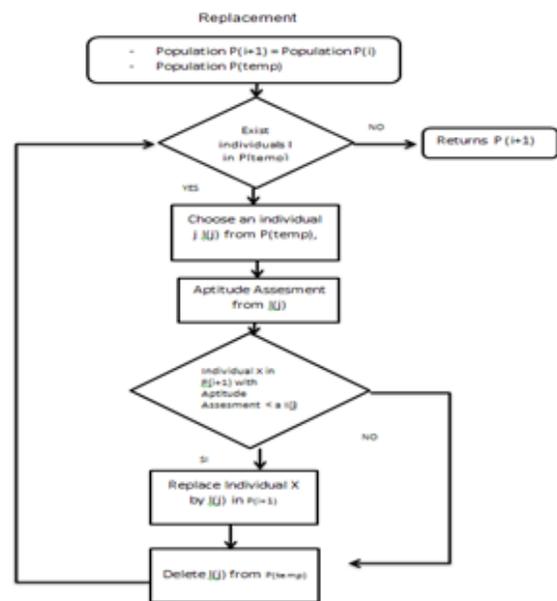


Figure 8. Replacement.

Source: own work.

RESULTS

Developed software

To automate the process, a console application in .NET with framework 3.5 was developed. Although there are specialized software for this kind of problems such as Prolog and Lisp that were the first choice consulted, but the first one was selected because of the names of the authors of the work to the syntax of the same. Figures 9 and 10

show screenshots of the software. Following data were entered into the program genetic Algorithm.

Enter the number of population: 386. Enter the number of iterations: 1000 Please iteration: 1. 386 vectors were created.

CONCLUSIONS

For a vehicle routing problem, the traveling salesman case, we have that for a number of 14 headquarters, the possible combinations of the problem

```

C:\Users\GUILLO\Desktop\Soft (3)\Soft\AlgoritmoGenetico.exe
Algoritmo Genetico
Ingrese el Numero de la Poblacion: 386
Ingrese el Numero de Iteraciones: 1000
Inicia Iteracion: 1
Se crearan 386 Vectores
El numero de vectores eficientes son: 193
Iniciando Cruce de Vectores para Obtener Hijos
Se crearon 193 Vectores Hijos
Iniciando Mutacion de Vectores
    
```

Figure 9. Prolog program input.

Source: own work.

```

C:\Users\GUILLO\Desktop\Soft (3)\Soft\AlgoritmoGenetico.exe
El mejor Vector de la Iteracion
10 8 2 5 7 4 14 3 6 13 12 1 9 11
La Distancia del Anterior Vector fue de: 24,6
Fin Iteracion: 1000
El mejor Vector para todas las Iteraciones
11 12 1 13 2 7 5 4 14 3 6 8 10 9
La Distancia del Mejor Vector fue de: 23,44
Fin Programa:
    
```

Figure 10. Mutation process and final iteration of the program.

Source: own work.

is given by $n!$, Where n is the number of headquarters. So we have that the time cost to evaluate the problem fully, it would take according to an analysis approximately about 45,336 years. This is taking into account the language used. For a sample of the population of 386 we have that the chromosome with better aptitude assessment after 1000 iterations is. As shown in table 6.

Given the initial population, where big part of the population has an attitude assessment superior to 40 km, and only 3 chromosomes less than 0.08%, hardly are below 30 km can be considered

acceptable this mechanism, even we cannot guarantee that it is the best option, but undoubtedly, considering the cost, it is very acceptable.

ACKNOWLEDGE

The project was authorized by Supermercados Olímpica and Universidad Tecnológica de Pereira. Supermercados Olímpica was in charge of providing the information about the routes and location of the stores and the Universidad Tecnológica de Pereira supported the project with the tools and knowledge.

Table 6. Final chromosome.

| Gen 1 | Gen 2 | Gen 3 | Gen 4 | Gen 5 | Gen 6 | Gen 7 | Gen 8 | Gen 9 | Gen 10 | Gen 11 | Gen 12 | Gen 13 | Gen 14 | Distances Total /km |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------------|
| 11 | 12 | 1 | 13 | 2 | 7 | 5 | 4 | 14 | 3 | 6 | 8 | 10 | 9 | 23,44 |

Source: own work.

REFERENCES

- Bogotá, A. M. (24 de enero de 2014). *Alcaldía Mayor de Bogotá Portal oficial*. Recuperado el 3 de abril de 2014, de Alcaldía Mayor de Bogotá Portal oficial.
- Canarias, U. d. (2013). Recuperado en 2014, de Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. <http://www.ulpgc.es/>
- Cerón, S. M. (2012). *Algoritmos Genéticos*. Recuperado en 2013, de noticias umg chiquimula.com /: <http://www.noticiasumgchiquimula.com/index.php/>
- Claudia Archetti, Martin W. P. Savelsbergh, M. Grazia Speranza (2006). An optimization based heuristic for the split delivery vehicle routing problem. *Georgia Institute of Technology, School of Industrial and Systems Engineering, Atlanta, U.S.A.*, 56- 65.
- Condori, D. J. (2014). Análisis de Datos Clínicos y Epidemiológicos. *bioestadístico.com*.
- Gestal, M.; RiveRo, D.; Rabuñal, J. R., & DoRaDo, J. (2010). Introducción a los Algoritmos Genéticos y la Programación Genética. *A Coruña, 2010*, 30 -68.
- Goldberg, D. M. (2011). <http://eddyalfaro.galeon.com/>. Obtenido de [http:// eddyalfaro .galeon.com/](http://eddyalfaro.galeon.com/): [http:// eddyalfaro.galeon.com/geneticos.html](http://eddyalfaro.galeon.com/geneticos.html)
- Google (8 de febrero de 2005). *Google Maps*. Recuperado el 3 de abril de 2014, de: <https://www.google.com/maps/dir/Supermercado+Olimpica,+Bogota+Granada>, C. d. (2014). Algoritmos genéticos. *Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial de la Universidad de Granada*. <http://decsai.ugr.es/index.php>.
- Gruttner, E., & Pinninghoff, M. A. (2009). Algoritmos Genéticos en Recorridos Óptimos de Líneas de Transporte Público. *Universidad de Concepción, Chile*, 34 -32.
- M. Cerrolaza, W. A. (s.f.). Algoritmos de optimización estructural basados en simulación genética . En W. A. M. Cerrolaza, *Algoritmos de optimización estructural basados en simulación genética*. Venezuela: Carraza.
- Pessoa Artut, U. E. (2011). A Robust Branch-Cut-and-Price Algorithm for the Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem. *Universidad Federal Fluminen*, 56.

- Pinninghoff J., M. A., Matthews D., E., & Díaz C., H. (2005).
- Quintero, T. (2012). Problema del ruteo Vehicular. 34- 56.
- Ravindra K. Ahuja, Ö. E. (2009). Estudio de técnicas de búsqueda por vecindad a muy gran escala. Departamento de ingeniería industrial y de sistemas, 23-32.
- rizar Mesa, M. I. (2014). *La Revista Cubana de Computación. GIGA*. Obtenido de: Algoritmos Genéticos: Evolución, Genética y Computación: http://www.ecured.cu/index.php/Algoritmo_gen%C3%A9tico
- Rodríguez Gonzáles, V. B. (4 de marzo de 2010). *Manipulación genética aplicada a problemas de viajero*. Recuperado el 3 de abril de 2014, de: Instituto Politécnico NacionanlMexico: <http://tesis.ipn.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/>
- Rondon Villareal, Nydia Paola; Delgado Quintero, Darío José; Mendoza Castellanos, Alfonso; Quintero, Andrés Felipe; Serna Suárez, Iván David. (2010). Algoritmos Genéticos en la solución de problemas de ruteo de vehículos con capacidad CVRP.
- Sánchez Medina, J. J. (2007). Optimización del tráfico rodado mediante el ajuste de ciclos de semáforos por algoritmos genéticos en dispositivos de computación paralela usando modelación discreta. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, España, 67-74.
- Tiendeo.com | Gran Vía 395, 0. B. (2013). *Súper Almacenes Olímpica*. Recuperado el 3 de abril de 2014, de Súper Almacenes Olímpica: <http://www.tiendeo.com.co>
- Zimmermann, D. (2013). *ehowenespanol.com*. Obtenido de: ehowenespanol.com: http://www.ehowenespanol.com/definicion-genotipo-fenotipo-info_184970/





Extracción de reglas de clasificación sobre repositorio de incidentes de seguridad informática mediante programación genética

Extracting classification rules from an informatic security incidents repository by genetic programming

Carlos Javier Carvajal Montealegre*

Fecha de recepción: 21 de enero de 2014

Fecha de aceptación: 19 de enero de 2015

Citation / Para citar este artículo: Carvajal Montealegre, C. J. (2015). Extracción de reglas de clasificación sobre repositorio de incidentes de seguridad informática mediante programación genética. *Revista Tecnura*, 19(44), 109-119. doi:<http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.2.a10>

Resumen

En este artículo se describe la obtención de reglas de clasificación sobre una colección de datos de incidentes de seguridad informática en un proceso de minería de datos, detallando el uso de la programación genética como un medio para modelar el comportamiento de los incidentes y representar las reglas en árboles de decisión. El proceso de extracción descrito incluye varios puntos, como la evaluación del enfoque de programación genética, la forma de representar a los individuos y la afinación de los parámetros del algoritmo para elevar el rendimiento. Se concluye con un análisis de los resultados y la descripción de las reglas obtenidas, considerando las posibles soluciones para minimizar la ocurrencia de los ataques informáticos. El artículo se basa en una parte de la tesis de grado Análisis de Incidentes de Seguridad Informática Mediante Minería de Datos, para Modelado de Comportamiento y Reconocimiento de Patrones (Carvajal, 2012).

Palabras clave: árboles de decisión, colección de datos, minería de datos, programación genética, seguridad informática.

Abstract

This paper describes the data mining process to obtain classification rules over an information security incident data collection, explaining in detail the use of genetic programming as a mean to model the incidents behavior and representing such rules as decision trees. The described mining process includes several tasks, such as the GP (Genetic Programming) approach evaluation, the individual's representation and the algorithm parameters tuning to upgrade the performance. The paper concludes with the result analysis and the description of the rules obtained, suggesting measures to avoid the occurrence of new informatics attacks. This paper is a part of the thesis work degree: Information Security Incident Analytics by Data Mining for Behavioral Modeling and Pattern Recognition (Carvajal, 2012).

Keywords: data collection, data mining, decision trees, genetic programming, information security.

* Ingeniero de Sistemas, Oracle Certified Associate Java SE 7 Programmer, Oracle Certified Professional Java SE 7 Programmer, Oracle Certified Expert Java EE 6 Web Services Developer. Chief Technology Officer en Conectar.biz. Bogotá, Colombia. Contacto: ing.carlosj@gmail.com

INTRODUCCIÓN

La seguridad informática es hoy día un asunto de importancia mundial, dado el grado de conectividad logrado gracias a Internet, que ha incluido la tecnología en áreas que hace algunos años parecían impensables, como la interacción social, que ahora es posible gracias a redes como Facebook, Twitter, Google+ e Instagram. De igual manera los entornos empresariales, financieros y académicos (entre otros), coexisten en el mundo de la Web 2.0. A su vez, los ataques informáticos aumentan también su ocurrencia (Software Engineering Institute Carnegie Mellon, 2010) y gravedad, vulnerando sectores más sensibles relacionados con la vida diaria. Lo anterior reviste de relevancia los análisis posibles sobre la información de estos incidentes de seguridad informática. Por estas razones, se realizó una extracción de reglas de clasificación para incidentes de seguridad informática.

En la minería de datos una de las tareas más comunes es la clasificación, en la cual se elige un atributo del conjunto de datos que será denominado *clase*; la pertenencia de un registro de dicho conjunto a una clase depende de los demás atributos que lo conformen. Existen varios métodos para efectuar esta clasificación, como los árboles de decisión, clasificación bayesiana, redes neuronales y vecinos próximos (Han, 2005); cada uno de estos métodos permite obtener un modelo de clasificación, el cual recibe un nuevo registro sin valor de clase y estima dicho valor. Estos modelos no son siempre interpretables, pero en el caso de los árboles de decisión el modelo se puede traducir a *reglas de clasificación*.

Las reglas de clasificación se representan en forma de sentencias de tipo IF-THEN, establecen la pertenencia de un nuevo registro a una clase de acuerdo con los valores de sus atributos; estos valores de atributo se conocen como antecedentes y la presencia de estos implica la predicción de la clase, denominada consecuente. Por ejemplo, If X_1 and X_2 and ... X_n Then Y , donde $X_i, \forall i \in \{1,2,\dots,n\}$ es un antecedente que lleva a la predicción de la clase Y . Las reglas de clasificación permiten construir un

modelo de clasificación de fácil interpretación para modelar el comportamiento del conjunto de datos.

La *programación genética* (Poli, 2008) se presenta como una alternativa para la extracción de reglas (Luna, 2012) (Mendes, 2001), "hereda" las ventajas de los algoritmos genéticos en cuanto a la rapidez de exploración del espacio de soluciones y elimina la representación estática de los individuos, los cuales pueden tener tamaño y formas variables (como las reglas de clasificación).

METODOLOGÍA

A continuación se detallan las etapas realizadas para la extracción de reglas.

Etapa I. Análisis y evaluación de alternativas: en esta etapa se hizo una evaluación de las alternativas para la extracción de reglas y se eligieron el enfoque y herramientas para el proceso que se va a realizar.

Etapa II. Experimentación: en esta etapa se hizo una preparación de datos para la ejecución de los experimentos, se dio un ajuste inicial a los parámetros experimentales y se ejecutó la extracción midiendo el rendimiento de cada ejecución.

Etapa III. Análisis de resultados: con las mediciones de cada experimento, se tomaron las reglas obtenidas de las ejecuciones con mejores resultados, se tradujeron dichas reglas a un árbol de decisión que permitió interpretarlas más fácilmente y se concluyó con el comportamiento presentado según estas reglas de clasificación para los incidentes de seguridad.

PROGRAMACIÓN GENÉTICA

La programación genética (PG) difiere de los algoritmos genéticos (AGs) tradicionales en la forma en que los individuos son representados, siendo común en AGs que los individuos sean un arreglo de tamaño fijo en donde cada posición puede contener valores numéricos o alfanuméricos. Para codificar las características de un individuo de la población, se da un valor a cada posición del arreglo, esta representación es adecuada para los problemas de

optimización (principal uso de los AGs); no obstante, los AGs no permiten individuos con tamaños y formas dinámicas, lo que limita su campo de acción (Wong, 2000) en cuanto a la búsqueda de reglas de clasificación y a la simulación de programas de computación permitido por la PG.

El concepto de evolución biológica (reproducción, selección, supervivencia del más fuerte) es de utilidad en la solución de otros problemas distintos a los de optimización, como lo es la extracción de reglas (Banzhaf, 1998), por lo que se extiende este paradigma a la programación genética.

Para la PG, los individuos tienen estructuras similares a los programas de computador con jerarquía, de tamaño y forma variables, al igual que los AGs se realizan las fases de:

- Generación de una población inicial.
- Asignación de un valor de *fitness* para cada individuo. El *fitness* se asigna mediante una función, también conocida como función de evaluación o función objetivo. El *fitness* es una medida de desempeño del individuo y depende enteramente del contexto del problema evaluado.
- Creación de una nueva población de individuos a partir de la copia de los ya existentes o mediante la recombinación genética y mutación.

La PG hace la exploración en un espacio de soluciones compuesto por programas (o algoritmos) de computador que pretenden dar solución a un problema, los individuos se representan como árboles (Han, 2005), definidos por R. Koza como "el conjunto de las posibles composiciones de funciones que puedan ser creadas recursivamente del conjunto de N_{func} funciones de $F=\{f_1, f_2, \dots, f_{N_{func}}\}$ y el conjunto de N_{term} terminales de $T=\{a_1, a_2, \dots, a_{N_{term}}\}$ " (Koza, 1992). Las funciones pueden ser:

- Operadores aritméticos (+, -, *, /).
- Funciones matemáticas (seno, coseno, exponenciación, logaritmo, valor absoluto).
- Operadores de lógica booleana (AND, OR, NOT).

- Operadores condicionales (If-Then-Else).
- Iteraciones (Do-Until).
- Funciones recursivas.

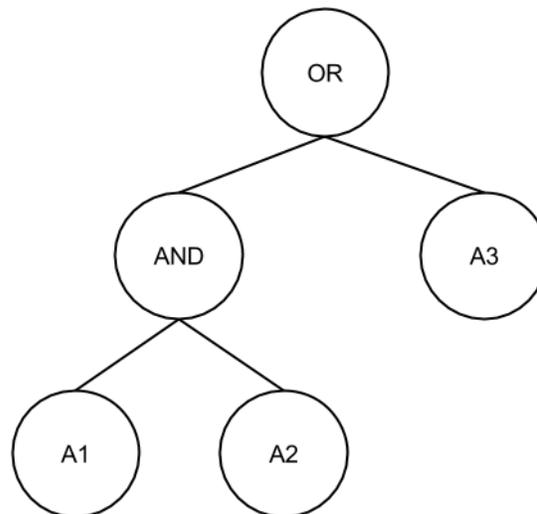


Figura 1. Ejemplo de una regla lógica representada en forma de árbol.

Fuente: (Carvajal, 2012).

Las terminales son variables o constantes atómicas cuyos valores representan alguna característica particular del problema. En la figura 1 se puede observar un ejemplo de un árbol de decisión.

El cruce de los individuos en busca del mejor espécimen se define para árboles como la elección de un nodo al azar de los dos padres, para realizar un intercambio de sub-árboles; este operador de reproducción está fuertemente ligado al concepto de *clausura*, sin el cual un cruce de dos árboles podría generar individuos inviables (Bójarczuk, 2004).

Para la mutación de los árboles, primero se reconoce el tipo de nodo que será modificado; si pertenece al conjunto de terminales T, basta con tomar otra terminal del conjunto para reemplazar el valor del nodo actual; si el nodo es una función perteneciente al conjunto F, se tomará otra función del conjunto asegurándose de mantener la *clausura*.

Obtención de reglas de calificación mediante programación genética

Usando la estructura dinámica de los individuos de la PG, es posible representar las reglas de clasificación para la evolución de las mismas y hallar el mejor individuo entre un conjunto de reglas que estimen un valor de clase. No obstante, los problemas de clasificación cuentan con muchos valores de clase, lo que implica un número igual o mayor de reglas, así que si obtenemos como resultado final de la evolución a la mejor regla, siendo esta solo válida para un valor de clase, la solución del problema estaría incompleta. La PG trata este inconveniente mediante dos aproximaciones (Freitas, 2002):

- *Michigan*: en donde cada individuo es una regla de clasificación, así que la solución al problema se compone de un subconjunto de la población o la totalidad de la misma.
- *Pittsburgh*: cada individuo es un conjunto de reglas de clasificación, representando una posible solución del problema.

EXTRACCIÓN DE REGLAS SOBRE UN REPOSITORIO DE DATOS CATEGÓRICOS

Dada la utilidad de la programación genética, se efectuó un proceso de extracción de reglas de clasificación sobre un conjunto de datos de incidentes de seguridad informática, con el fin de obtener un modelo de comportamiento de dichos incidentes de seguridad.

Descripción del repositorio

El conjunto de datos se compone de 1234 registros de incidentes de seguridad informática recopilados alrededor de todo el mundo desde el año 2004 hasta 2011, obtenidos de 3 fuentes principales: Web Hacking Incident DataBase (The Web Application Security Consortium, 2010), Chronology of Data Breaches (Privacy Rights Clearing House, 2010) y COL-CSIRT (Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2010). Los campos del repositorio se describen en la tabla 1. El campo MÉTODO DE ATAQUE fue elegido como valor de clase.

Tabla 1. Campos del repositorio de incidentes de seguridad informática.

| Campo | Descripción |
|----------------------------|--|
| Tipo de organización | Actividad desempeñada por la entidad atacada. |
| Entidad | Nombre de la entidad víctima del incidente de seguridad informática. |
| Método de ataque | Método usado por el atacante para causar el incidente de seguridad informática. |
| Debilidad de la aplicación | Falencia que permitió que el incidente de seguridad fuera posible. |
| País | País donde se ubica la entidad que fue víctima del incidente de seguridad informática. |
| Fecha | Fecha en la cual ocurrió el incidente de seguridad informática. |
| Atacante | Criminales profesionales, espías, hackers, intrusos corporativos, terroristas, usuario externo, usuario interno, vándalos. |
| Herramienta | Agente autónomo, ataque físico, comando de usuario, intercambio de información, no aplica, script o programa, toolkit. |
| Vulnerabilidad | Configuración, diseño, implementación, políticas de seguridad. |
| Blanco | Componente, computador, cuenta, dato, proceso, red. |
| Resultado no autorizado | Acceso incrementado, corrupción de la información, denegación del servicio, difusión de la información, robo de recursos. |
| Objetivo | Cambio de estatus, daño, ganancia financiera, ganancia política, sin intencionalidad. |

Fuente: (Carvajal, 2012).

Proceso de extracción de reglas

Para la ejecución de los experimentos se usó un *framework* desarrollado totalmente en JAVA y de uso libre JCLEC (Knowledge Discovery and Intelligent Systems, 2011); este *framework* tiene implementadas las aproximaciones propuestas por C. Bojarczuk (Bojarczuk, 2004), I. De Falco (De Falco, 2001) y K. C. Tan (Tan, 2002); se eligió finalmente la propuesta de K.C. Tan, pues además de implementar todos los operadores lógicos y matemáticos básicos permite la mutación e incluye el concepto de torneo de tokens (Wong, 2000) para optimizar la evolución mediante la penalización del fitness. En el contexto de extracción de reglas, el fitness se asigna según la precisión de la regla obtenida al clasificar los registros en los conjuntos de entrenamiento y de evaluación. En la tabla 2 se resumen las características de los tres enfoques evaluados.

El algoritmo admite como parámetros los porcentajes de mutación, cruce, reproducción, tamaños de los conjuntos de entrenamiento y prueba, tamaño de la población, número máximo de generaciones y los valores de las variables W_1 y W_2 , las cuales se emplean para determinar el fitness de los individuos, el cual se calcula como en la ecuación (1).

$$Fitness = \frac{tp}{(tp + w_1fn)} * \frac{tn}{(tn + w_2fp)} \quad (1)$$

tp: Verdaderos positivos (true positives),

fn: Falsos negativos (false negatives),

tn: Verdaderos negativos (true negatives),

fp: Falsos positivos (false positives).

Por otra parte, el torneo de tokens modifica el fitness de los individuos penalizándolos como se muestra en la ecuación (2).

Tabla 2. Características de los tres enfoques evaluados para extracción de reglas.

| | C. Bojarczuk | I. De Falco | K. C. Tan |
|----------------|---------------------|-------------|-----------|
| Copiado | X | X | X |
| Mutación | | X | X |
| Recombinación | X | X | X |
| Representación | Pittsburgh/Michigan | Michigan | Michigan |
| OPERADORES | | | |
| AND | X | X | X |
| OR | X | X | X |
| NOT | | X | X |
| < | | X | X |
| <= | X | X | X |
| > | X | X | X |
| >= | | X | X |
| = | X | X | X |
| != | X | X | X |
| IN | | X | X |
| OUT | | X | X |
| FITNESS | | | |
| Sensibilidad | X | X | X |
| Especificidad | X | | X |
| Simplicidad | X | X | |

Fuente: (Carvajal, 2012)

$$Fitness\ Ajustado = fitness * \frac{conteo_tokens}{conteo_ideal} \quad (2)$$

Donde el `conteo_tokens` indica cuántos registros fueron clasificados correctamente por la regla y el `conteo_inicial` es el total de registros que debieron ser clasificados por la regla.

Para la ejecución de los experimentos se usó 70% de los datos para el entrenamiento (864 registros) y 30% para las pruebas (370 registros), el tamaño de la población se modificó para 100,300 y 600 individuos, mientras que para el número de generaciones se usaron valores de 100 y 200.

El valor de reproducción (copiado) se mantuvo en 0,01, mientras que los valores de mutación y cruce se modificaron en un valor de 0,1 por cada ejecución aumentando uno de los operadores al tiempo que se disminuía el otro (0,1 y 0,9 para mutación y cruce respectivamente, luego 0,2 y 0,8 hasta llegar a 0,9 y 0,1). Los valores de los pesos W_1 y W_2 se modificaron de igual forma con un delta de 0,1 en cada ejecución, aumentando uno y disminuyendo el otro.

Los registros, pertenecientes a clases como Bot, Clickjacking, Comando del sistema operativo, Gusano, Hijacking DNS, Inclusión de Archivo Local, Inclusión de Archivo Remoto, Navegación Forzada, Redirection, fueron retirados del conjunto de prueba ya que tenían en promedio menos de 10

registros por clase, lo que minimiza la posibilidad de encontrar una regla satisfactoria mediante el algoritmo. Esto se visualizó en las primeras ejecuciones del algoritmo en donde aún no se retiraban estos registros y en donde la precisión de las reglas de clasificación para estas clases no superaba en el mejor de los casos 16%, y con este ajuste el número de clases posibles se redujo a 21.

Bajo estas condiciones se realizaron 18 ejecuciones, se tomaron como medidas de evaluación del desempeño de cada experimento el tiempo de ejecución, la precisión del modelo obtenida durante las etapas de entrenamiento y de prueba, el índice Cohen Kappa y el AUC (Area Under Curve).

Todas los experimentos se ejecutaron en una máquina con Intel Core i7 con 6 GB de RAM y Windows 7 como sistema operativo.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los valores de los pesos W_1 y W_2 flexibilizan la rigurosidad con que se asigna el fitness de cada individuo según la precisión de clasificación, como se vio en la ecuación (1), durante la variación de estos pesos se observó que valores bajos de W_1 y valores altos de W_2 conducen a un sobreentrenamiento del modelo (*overfitting*), mientras que valores altos de W_1 y bajos de W_2 reducen drásticamente la precisión del modelo, como se puede

Tabla 3. Valores de precisión durante la variación de los pesos.

| # EJECUCIÓN | PESOS | PRECISIÓN ENTRENAMIENTO | PRECISIÓN PRUEBAS |
|-------------|--------------------|-------------------------|-------------------|
| 1 | $W_1=0,1, W_2=0,9$ | 0,8213 | 0,687 |
| 2 | $W_1=0,2, W_2=0,8$ | 0,7816 | 0,6812 |
| 3 | $W_1=0,3, W_2=0,7$ | 0,7829 | 0,6754 |
| 4 | $W_1=0,4, W_2=0,6$ | 0,763 | 0,6754 |
| 5 | $W_1=0,5, W_2=0,5$ | 0,7717 | 0,6986 |
| 6 | $W_1=0,4, W_2=0,6$ | 0,7543 | 0,6551 |
| 7 | $W_1=0,3, W_2=0,7$ | 0,7543 | 0,6551 |
| 8 | $W_1=0,2, W_2=0,8$ | 0,6526 | 0,5913 |
| 9 | $W_1=0,1, W_2=0,9$ | 0,5993 | 0,5072 |

Fuente: (Carvajal, 2012).

observar en la tabla 3 y figura 2, donde los valores de mutación y cruce se mantuvieron en 0,8 y 0,1, respectivamente, con una población de 600 individuos y 200 generaciones. Cuando los pesos se ajustaron a 0,5 cada uno la precisión obtenida en entrenamiento y pruebas fue de 0,7717 y 0,6986 en comparación con los demás resultados.

Al variar los valores de los operadores de mutación y cruce manteniendo los pesos en 0,5 cada uno, se observó que los valores que mejor resultado arrojaban eran 0,6 para el cruce y 0,4 para la mutación. La precisión del modelo se observa en la tabla 4 y el comportamiento de las curvas, en la figura 3.

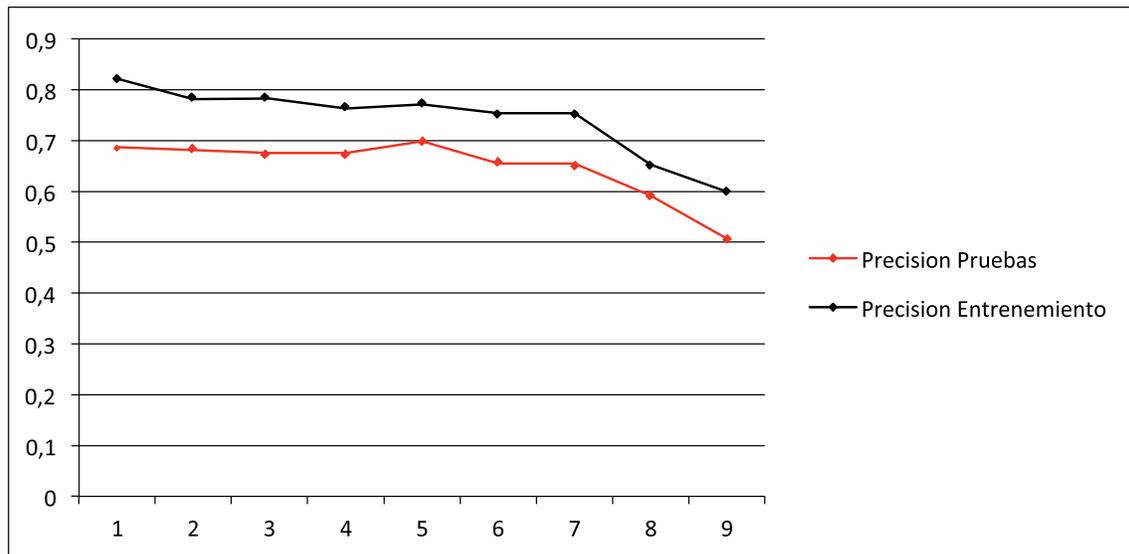


Figura 2. Gráfica de las curvas de precisión de pruebas vs. entrenamiento durante la variación de pesos.

Fuente: (Carvajal, 2012).

Tabla 4. Valores de precisión durante la variación de los operadores de reproducción.

| # EJECUCIÓN | CRUCE | MUTACIÓN | PRECISIÓN ENTRENAMIENTO | PRECISIÓN PRUEBAS |
|-------------|-------|----------|-------------------------|-------------------|
| 10 | 0,9 | 0,1 | 0,7878 | 0,687 |
| 11 | 0,8 | 0,2 | 0,768 | 0,6551 |
| 12 | 0,7 | 0,3 | 0,7531 | 0,6638 |
| 13 | 0,6 | 0,4 | 0,7928 | 0,7246 |
| 14 | 0,5 | 0,5 | 0,7792 | 0,6812 |
| 15 | 0,4 | 0,6 | 0,7667 | 0,687 |
| 16 | 0,3 | 0,7 | 0,7618 | 0,6754 |
| 17 | 0,2 | 0,8 | 0,7618 | 0,6812 |
| 18 | 0,1 | 0,9 | 0,7804 | 0,6812 |

Fuente: (Carvajal, 2012).

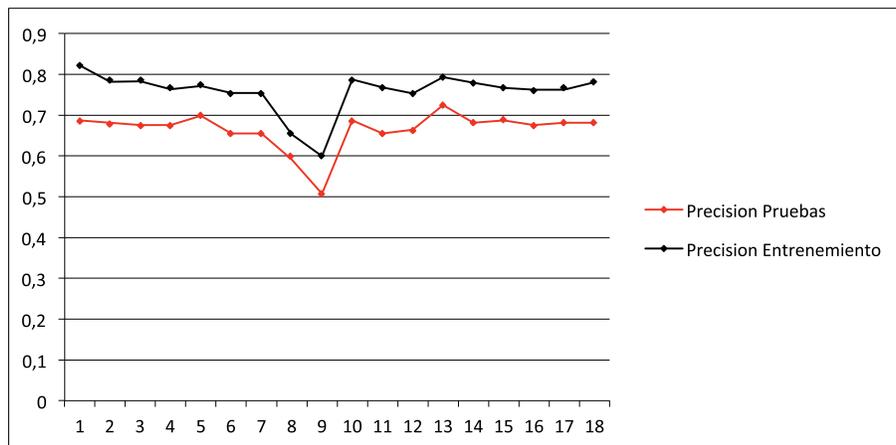


Figura 3. Gráfica de las curvas de precisión de pruebas vs. entrenamiento durante todas las ejecuciones.

Fuente: (Carvajal, 2012).

Así que el mejor resultado se obtuvo con una población de 600 individuos, 200 generaciones, los valores de los pesos ajustados a 0,5 cada uno, el cruce en 0,6, la mutación en 0,4 y la reproducción (copiado) en 0,1; en este caso la precisión obtenida en entrenamiento fue de 0,7928 y de 0,7246 en pruebas,

el tiempo de ejecución del algoritmo fue 8166,741 segundos, el índice de Cohean Kappa fue 0,6829 y el AUC, 0,9589. El modelo obtenido se compone de 29 reglas de clasificación en forma de sentencias IF-THEN que pueden representarse como árboles de decisión, como se muestra en las figuras 4, 5, 6 y 7.

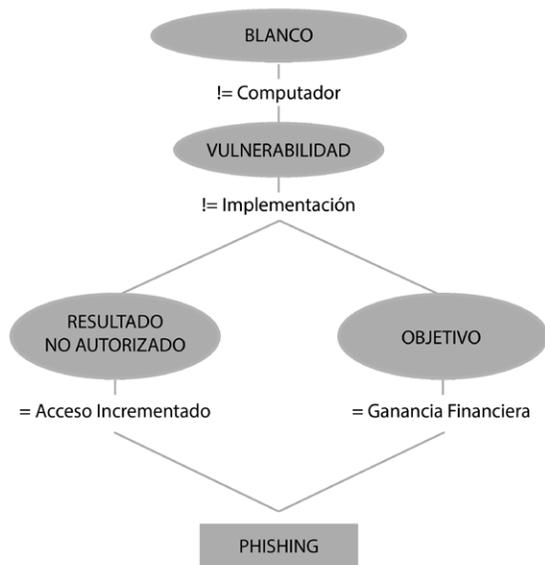


Figura 4. Regla de clasificación para el método de ataque PHISHING.

Fuente: (Carvajal, 2012).

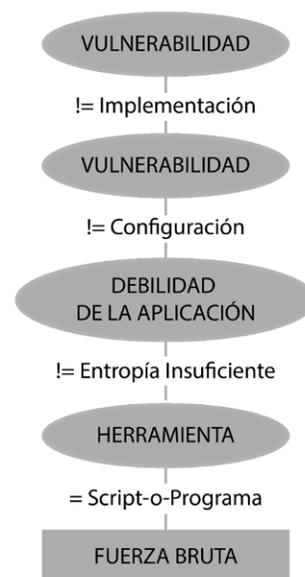


Figura 5. Regla de clasificación para el método de ataque FUERZA BRUTA.

Fuente: (Carvajal, 2012).

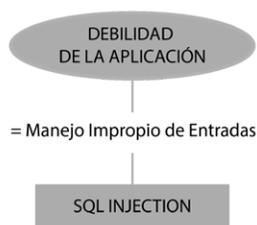


Figura 6. Regla de clasificación para el método de ataque SQL INJECTION.

Fuente: (Carvajal, 2012).

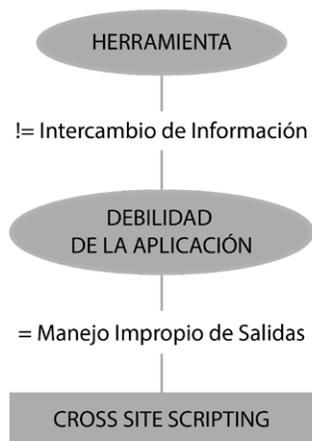


Figura 7. Regla de clasificación para el método de ataque CROSS SITE SCRIPTING.

Fuente: (Carvajal, 2012).

En la tabla 5 se listan las clases y los valores de precisión en clasificación obtenidos por las reglas extraídas para entrenamiento y pruebas.

CONCLUSIONES

Las reglas obtenidas fueron evaluadas y representadas en árboles de decisión; esto permitió interpretarlas y concluir ciertos comportamientos de interés. Por ejemplo, la figura 7 indica que para CROSS SITE SCRIPTING la herramienta usada no fue INTERCAMBIO DE INFORMACIÓN y la debilidad de la aplicación fue un MANEJO IMPROPIO

DE SALIDAS. Además se filtraron patrones de comportamiento obvios como la intencionalidad de los hackers y terroristas o el objetivo común de los ataques de phishing. A continuación se describen los patrones encontrados.

- Las entidades más susceptibles a ataques de secuestro de sesión pertenecen al gobierno o al ejército y las que menos son atacadas son las organizaciones sin ánimo de lucro; estos ataques buscan una ganancia financiera y son perpetrados generalmente por espías.
- Las entidades menos afectadas por los virus son negocios que no se dedican al comercio y/o actividades financieras, como empresas de tecnología, medios de comunicación o cadenas de hoteles.
- Las entidades más vulnerables a los ataques de denegación de servicio son las instituciones de salud. Además la herramienta predilecta para estos ataques son los toolkit.
- Las entidades menos afectadas por los troyanos son las entidades de comercio o venta al por menor.
- Los ataques de *Cross Site Scripting* no son responsabilidad de usuarios inexpertos, es decir, no corresponden a errores humanos, ya que la debilidad de la aplicación es *Manejo Impropio de Salidas*, lo cual indica un error en la construcción del software o en el diseño del mismo.
- Los ataques de *SQL Injection* son ocasionados por un manejo impropio de entradas, recayendo la responsabilidad en los desarrolladores del software al no seguir estándares de construcción que protejan los campos de entrada de las aplicaciones.
- Los incidentes de *Localización Predecible de Recursos* ocurren por falta de restricciones al usuario y las entidades menos susceptibles a este tipo de ataques pertenecen al gobierno o al ejército.
- Los atacantes en los incidentes de *Acceso no Autorizado* son en su mayoría terroristas usando comandos de usuario.
- El *abuso de funcionalidad* es perpetrado por hackers en la mayoría de los casos.

La fiabilidad de estos patrones depende del porcentaje de precisión alcanzado por las reglas de clasificación; las clases que obtuvieron mayor precisión fueron: SQL Injection, Divulgación no Intencional, Cross Site Scripting, Denegación de Servicio y Troyano. En general, aquellas clases que presentaban más de 120 instancias en el repositorio obtuvieron reglas con una precisión superior a 79%. Para las clases con un número menor de instancias se obtuvieron reglas con precisiones entre 77% y 22%, a excepción de las clases Virus y Abuso de Funcionalidad, que tenían 34 y 24 instancias, respectivamente, y cuyas reglas tuvieron 0% de precisión; esto se contrasta con clases con igual número de instancias como Localización Predecible de Recursos, Spyware o Phishing, que lograron 50%, 65% y 61%.

Solo 4 clases tenían más de 120 instancias en el repositorio, el promedio del número de registros por clase fue 41,13, mientras que la desviación estándar para el mismo concepto fue 68,03, así que la mayoría de clases tenía un número mucho menor que 120 registros; no obstante, el modelo de clasificación alcanzó una precisión aceptable tanto en clasificación como en pruebas (79,28% y 72,46%, respectivamente).

De lo anterior se concluye que la programación genética y más específicamente el enfoque de K.C. Tan logra excelentes resultados cuantas más instancias por clase se le proporcionen al algoritmo para el aprendizaje, pero no depende directamente de esta cantidad de registros, pues el algoritmo logra descubrir reglas con calidad aceptable (superior a 75%) para clases con un número precario de instancias.

Por otra parte, es fundamental la obtención de las reglas en sentencias de tipo IF-THEN, ya que su interpretación hizo posible encontrar los patrones de comportamiento de los datos que conforman el repositorio; esta interpretación no es tan viable en otro tipo de modelos como el entregado por redes neuronales o vecinos próximos, una ventaja que presenta este modelo de obtención de reglas.

Los tiempos de ejecución del algoritmo fueron altos en su mayoría (más de 90 minutos); vale la pena ahondar en el desarrollo de herramientas para PG, realizando implementaciones en lenguajes más simples que JAVA, aún más cuando la labor de minería de datos muestra preferencia por lenguajes como Python o R (Harvard, 2013).

Sigue siendo un obstáculo encontrar los mejores valores para los parámetros del algoritmo, donde ya se han hecho avances (Yuan, 2005; Yang, 2000), pero que en algunos casos como el del problema tratado llegan a ser muy costosos en tiempos y recursos, como lo sería diseñar un ANOVA.

Finalmente, es importante reconocer la madurez que ha alcanzado la programación genética, la cual mostró resultados satisfactorios en cuanto a la obtención de patrones para modelar el comportamiento de los incidentes de seguridad, siendo este repositorio un conjunto de datos no numéricos que no permite otro tipo de análisis como la estadística típicamente descriptiva. Este método de obtención de reglas mediante el enfoque de K.C. Tan puede usarse en otros problemas en donde la calidad de los resultados terminará dependiendo del correcto ajuste de los parámetros y del número de registros por clase que se le proporcione al algoritmo para su aprendizaje.

FINANCIAMIENTO

Este artículo es fruto de la investigación de proyecto de grado y no tuvo ningún financiamiento externo además del de los autores.

REFERENCIAS

- Banzhaf ,W.; Nordin, P.; Keller, R. E. y Francone , F. D. (1998). *Genetic Programming: An Introduction – On the Automatic Evolution of Computer Programs and Its Applications*. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers.
- Bojarczuk, C.C.; Lopes, H.S. & Freitas, A.A. (2004). A constrained-syntax genetic programming system for discovering classification rules: application to

- medical data sets. *Journal Artificial Intelligence in Medicine*, Vol. 30, ene., pp. 27-48.
- Carvajal, C.J. y Bayona, D.N. (2012). Análisis de Incidentes de Seguridad Informática Mediante Minería de Datos, para Modelado de Comportamiento y Reconocimiento de Patrones. Tesis de ingeniería de sistemas no publicada, Universidad Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.
- De Falco, I.; Della Cioppa A., y Tarantino, E. (2001). Discovering interesting classification rules with genetic programming. *Applied Soft Computing.*, Vol. 1, No. 4, May, pp. 257-269.
- Freitas A.A. (2002). *Data Mining and Knowledge Discovery with Evolutionary Algorithms*. Secaucus, NJ, USA: Springer-Verlag New York, Inc.
- Han, J. & Kamber, M. (2005). *Data Mining: Concepts and Techniques*. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers.
- Harvard School of Engineering and Applied Sciences (2013). CS109 Data Science. Recuperado de: <http://cs109.github.io/2014/>
- Knowledge Discovery and Intelligent Systems KDIS (2011). Java Class Library for Evolutionary Computation JCLEC. Recuperado de: <http://jclec.sourceforge.net/>
- Koza, J.R. (1992). *Genetic Programming: On Programming Computers by means of Natural Selection and Genetics*. Cambridge, MA, USA: MIT Press.
- Luna, J.M.; Romero, J.R. y Ventura, S. (2012). Design and Behaviour Study of a Grammar Guided Genetic Programming Algorithm for Mining Association Rules. *Knowledge and Information Systems*, Vol. 32, Jul., pp. 53-76.
- Mendes, R.R.; Voznika, F. de B.; Freitas, A.A. & Nievo-la, J.C. (2001). Discovering Fuzzy Classification Rules with Genetic Programming and Co-evolution. *PKDD '01 Proceedings of the 5th European Conference on Principles of Data Mining and Knowledge Discovery*, pp. 314-325.
- Poli, R.; Langdon, W.B. & Mc Phee, N.F. (2008). *A Field Guide to Genetic Programming*. UK: Lulu Enterprises.
- Privacy Rights Clearing House (2010). Chronology of Data Breaches 2005-Present. Recuperado de: <http://www.privacyrights.org/data-breach>
- Software Engineering Institute Carnegie Mellon (2010). CERT Statistics (Historical). Recuperado de: http://www.cert.org/stats/cert_stats.html
- Tan, K.C.; Tay, A.; Lee T.H. & Heng, C.M. (2002). Mining Multiple Comprehensible Classification Rules Using Genetic Programming. *Proceeding CEC '02 Proceedings of the Evolutionary Computation on 2002. CEC '02. Proceedings of the 2002 Congress*, Vol. 2, pp. 1302-1307.
- The Web Application Security Consortium (2010). Web Hacking Incident DataBase. Recuperado de: <http://projects.webappsec.org/w/page/13246995/Web-Hacking-Incident-Database>
- Universidad Distrital Francisco José de Caldas (2010). COL-CSIRT Grupo de Investigación. Recuperado de: <http://gemini.udistrital.edu.co/comunidad/grupos/arquisoft/colcsirt/>
- Wong, M.L. & Leung, K.S. (2000). *Data Mining Using Grammar Based Programming and Application*. Norwell, MA, USA: Kluwer Academic Publishers.
- Yang, Q.W.; Jiang, J.P. & Chen, G. (2000). How to Select Optimal Control Parameters for Genetic Algorithms. *Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Vol. 1, Dec., pp. 37-41.
- Yuan, B. & Gallagher, M. (2005). A Hybrid Approach to Parameter Tuning in Genetics Algorithms. *The 2005 Evolutionary Computation IEEE Congress*, Vol. 2, Sep., pp. 1096-1103.





Metamodels composition strategy for the model driven engineering context

Estrategia de composición de metamodelos para el contexto de ingeniería basada en modelos

Héctor Arturo Flórez Fernández*

Fecha de recepción: 23 de julio de 2013

Fecha de aceptación: 5 de diciembre de 2014

Citation / Para citar este artículo: Flórez Fernández, H. A. (2015). Metamodels composition strategy for the model driven engineering context. *Revista Tecnura*, 19(44), 121-132. doi:<http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.2.a09>

Abstract

In Model Driven Engineering (MDE) approaches, metamodelers usually need to create a metamodel based on existing metamodels, where each one abstracts a specific domain, in order to abstract a new domain, which includes elements that could be taken from the other already created metamodels. This kind of constructions allows getting advantage of the knowledge obtained in the construction of the previous built metamodels. This paper presents a proposal to solve metamodel composition through a Domain Specific Language (DSL). This DSL is used by metamodelers, who are the people that know the domains abstracted by the different metamodels and know how to combine those metamodels in order to generate the new one. Moreover, a simple case study is presented so as to demonstrate the low level of complexity of the DSL.

Keywords: computational modeling, metamodeling, software prototyping.

Resumen

En enfoques de ingeniería basada en modelos (MDE), los metamodeladores usualmente tienen que crear un metamodelo basado en metamodelos existentes, en donde cada uno abstrae un dominio específico con el fin de abstraer un nuevo dominio, que incluye los elementos que se podrían tomar de los otros metamodelos ya creados. Este tipo de construcciones permite obtener ventaja de los conocimientos obtenidos en la construcción de los metamodelos previamente construidos. En este trabajo se presenta una propuesta para resolver la composición de metamodelos a través de un lenguaje de dominio específico (DSL). Este DSL es utilizado por metamodeladores, que son las personas que conocen los dominios abstraídos por los diferentes metamodelos y saben cómo combinar los metamodelos para generar uno nuevo. Además, se presenta un caso de estudio simple con el fin de demostrar el bajo nivel de complejidad del DSL.

Palabras clave: metamodelamiento, modelamiento computacional, prototipo de software.

* Electronic Engineer, Computer Science Engineer, Specialist in Management, Magister in Information and Communication Sciences, Magister in Management, Doctor candidate in Engineering. Assistant professor in the Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Contacto: haflorezf@udistrital.edu.co

INTRODUCTION

A metamodel is a component to abstract the concepts of a specific domain of information, and it is constructed by one metamodeler, who is the person that knows the domain and can solve a problem using a MDE approach. Also, one model is a simplification of a system with an intended goal (J. Bézi-*vin*, 2005), (P.A. Muller, F.; Fondement, B. Baudry, and B. Combemale, 2009), or an artifact to represent a specific case of a domain that is constructed by modelers. In MDE approaches the models must conform to the metamodel that abstract the domain. In addition, modeling has an important role in developing software systems because it provides means to concepts (J. Henriksson, F. Heidenreich, J. Johannes, S. Zschaler, and U. Assmann, 2008), (H. Florez, 2012) abstracted in a specific domain.

Furthermore, in several cases metamodelers need to represent a new domain; however, the new domain can have concepts already abstracted in existing metamodels. Consequently, metamodelers can reuse several concepts from several metamodels in order to create the new metamodel (M. Emerson and J. Sztipanovits, 2006) (G. Karsai, M. Maroti, A. Ledeczi, J. Gray, and J. Sztipanovits, 2004).

This proposal presents a metamodel composition solution strategy, where one metamodeler, who knows several domains abstracted in correspondent metamodels, constructs a new metamodel, which is intended to abstract the new domain, based on the existing metamodels. The new metamodel is generated by creating and executing a script that has instructions defined in one DSL. Instructions of the DSL allow metamodelers to include several existing metamodels and make several operations regarding the elements, attributes, and relations included in the selected metamodels. In addition, the DSL also allows creating new elements, attributes, and relations in the composed metamodel.

The rest of the paper is structured as follows. Section 2 presents different techniques to solve the metamodel composition problem. Section 3 presents the proposed methodology and strategy for solving

the metamodels composition. Section 4 presents the language developed to solve metamodels composition; also, an example about composition using the proposed language. Section 5 presents the composition engine in which the process for composition is explained. Section 6 presents a summarized case of study. In section 7, the related work is presented. Finally, section 8 presents the conclusions.

METAMODELS COMPOSITION

In MDE, metamodels composition is necessary for several reasons (A. Ledeczi, G. Nordstrom, G. Karsai, P. Volgyesi, and M. Maroti, 2001), (J. Oldevik, L. Kutvonen, and N. Alonistioti, 2005). One metamodel is the set of abstractions and techniques that govern how systems related with the domain are going to be modeled; as a result, metamodels represent the way in which a particular engineering domain is abstracted. When a new domain is needed to be abstracted, several previously constructed domains could represent some elements that the new domain needs to include in their abstraction. For instance, in the case that a language designer requires to create a new language, it is possible to get the knowledge included in existing languages with the purpose to reuse the common existing elements between the existing languages and the new language. Consequently, the effort in process of the construction of the new language can be reduced as much as possible getting advantage of the efforts invested in the domains taken through the correspondent metamodels. Then, metamodel composition offers benefits to Domain Specific Modeling Language (DSML) analogous to software reuse offers benefits to software engineering (M. Emerson and J. Sztipanovits, 2006). For instance, it is possible to achieve: the avoidance of duplication effort, emergence of high quality reusable metamodel fragments, recognition of metamodeling patterns, and reduction of time in the creation of new DSMLs.

Metamodel composition strategies aim to support the construction of complex metamodels using atomic transformations (J. Oldevik, L.

Kutvonen, and N. Alonistioti, 2005). In the context of MDE, there are some processes for metamodel composition: 1) matching elements, 2) elements merge, and 3) class refinement (M. Emerson and J. Sztipanovits, 2006). Matching models is a process used to identify different views of the same concept (R. France, F. Fleurey, R. Reddy, B. Baudry, and S. Ghosh, 2007), in order to unify those several equivalent concepts in one composed concepts. This strategy can create new concepts that are enriched by different descriptions previously made in existing metamodels. Metamodel merge combines several concepts creating a new one in order to avoid collisions between the elements described in two different metamodels (M. Emerson and J. Sztipanovits, 2006) used for the metamodel composition process. Merging concepts not only allows joining concepts defined in existing metamodels, but also allows customizing those concepts by adding or removing attributes or relations. Class refinement is used to add details in one single element that has not been composed with other elements. The refined class can be taking from existing metamodels; as a result, the refinement does not imply the creation of all features of the class (e.g., attributes and relations); thus, the refinement becomes an useful mechanism for polishing the composed metamodel in order to obtain the desired abstractions.

METHODOLOGY AND SOLUTION STRATEGY

This proposal consists of a strategy where the domain experts, who are metamodelers, modify the metamodels explicitly specifying the composition process. Metamodelers know the reasons why a metamodel needs to be composed, define the set of input metamodels required to get the composed metamodel, and create a script with the operations needed to build the new metamodel. Figure 1 illustrates composition process and the metamodeler responsibilities. The metamodeler, who is intended to create a composed metamodel and understands the domains abstracted by other metamodels, selects at least two

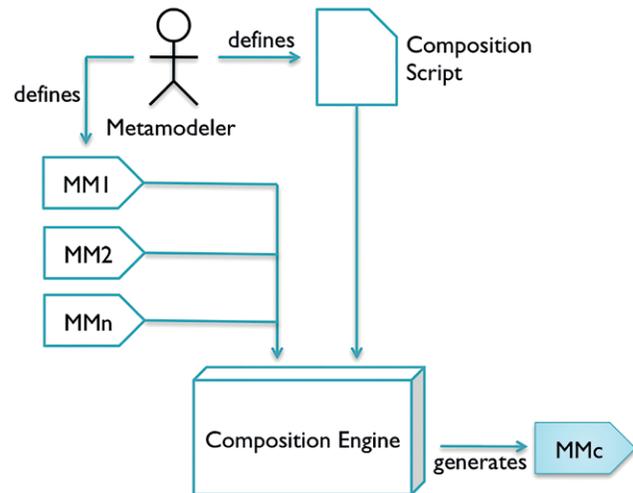


Figure 1. Composition process.

Source: own work.

existing metamodels as inputs of the process. Later on, based on the selected metamodels, he/she creates the composition script that is one source code written using the DSL presented in section 4. Finally, the metamodeler executes the composition script in the “Composition Engine” presented in section 5 providing the required metamodels and obtaining as output one composed metamodel.

The composition engine receives the script developed by metamodelers and imports the support metamodels defined in the script. These scripts are loaded in dynamic memory and manipulated with Eclipse Modeling Framework (EMF) making the modifications determined in the script in order to generate only one composed metamodel as output.

The composition engine process (see figure 2) is based on the set of instructions Δ that corresponds to several instructions ($\Delta = \{\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n\}$). Each instruction δ_i changes the composed metamodel MM_0 based on the support metamodels $\{MM_{sup-1}, MM_{sup-2}, \dots, MM_{sup-m}\}$. In addition, the instruction δ_i changes the affected support metamodels, so after the execution of the instruction δ_i the engine will contain a new version of the composed metamodel (MM_i) and the support

metamodels $\{MM_{sup-1.i}, MM_{sup-2.i}, \dots, MM_{sup-n.i}\}$. Thus, after the execution of the instruction δ_i , the composition engine creates the composed metamodel (MM_i) that is ready to use by the metamodeler. The composition engine also is capable to identify exceptions in the process. Then, due to several instructions can depend on the results of the execution of previous instructions; one exception finalizes the composition engine process and the composed metamodel is not created.

The work of creating metamodels can be considered demanding because it should include the analysis of the context that usually contains a big amount of elements and relations between elements. Due to this strategy is based on existing metamodels that already abstract properly domains, metamodelers do not need to make a big effort for abstracting fragments of the domain, but they can dedicate this effort for understanding the way in which the existing metamodels can support the composition process. In addition, effort for the creation of the new metamodel decreases because the composition engine is able to provide one validated composed metamodel; thus, the metamodeler just need to write one basic script in order to generate the desired result.

COMPOSITION LANGUAGE

The proposal resolves the metamodels composition by defining one Domain Specific Language (DSL). This DSL includes an instructions catalog of the possible operations that can be applied over several input metamodels in order to generate a

unique output composed metamodel. The instructions presented in the catalog are created following the technique “class refinement”; however, one instruction, which is *joinClasses* is based in the technique “element merge” in order to take advantage of the specific features of this technique.

The structure of the DSL consists in the next three operations:

- Operation “import”. This operation allows specifying several input metamodels.
- Operation “export”. This operation allows specifying the output composed metamodel.
- Instructions. Each instruction specifies a change in the composed metamodel.

The DSL has a set of operations that allow metamodelers to define possible changes over the input metamodels in order to construct the composed metamodel, which are defined in the instruction catalog. This proposal is completeness from the principle that each instruction has high granularity, which implies that the operation cannot be decomposed into smaller operations (M. Herrmannsdoerfer, D. Ratiu, and G. Wachsmuth, 2010), to ensure unitary changes on the metamodel in the composition process. As a result, the DSL has a catalog made up of 16 instructions. With these instructions metamodelers can make the necessary changes on the classes, attributes and references from the input metamodels. Also, metamodelers can include new classes, attributes and references that are not defined in any input metamodel.

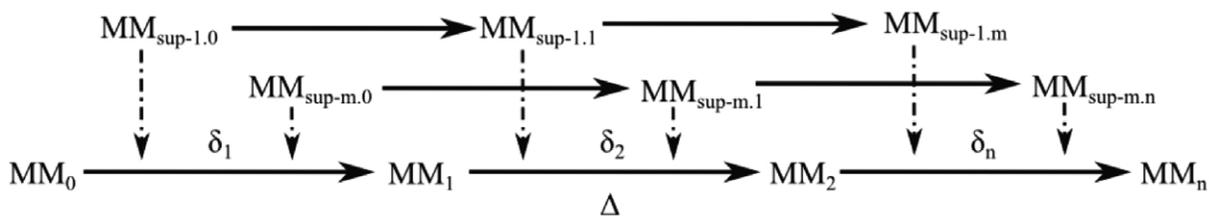


Figure 2. Composition strategy.

Source: own work.

Possible changes related with classes include create, delete, rename, set abstract, unset abstract, divide a class in several classes, and join several classes. Possible changes related with attributes include create, delete, rename, and update. Possible changes related with references include create, delete, rename, create inheritance reference, and delete

inheritance reference. Table 1 presents the instruction catalog created for the composition language.

When any instruction make reference to a class, it is necessary to indicate the name of the input metamodel in which the class is placed. In the case that the instruction does not have the name of the input metamodel, the engine will search the class

Table 1. Instruction Catalog.

| | Instruction | Parameters |
|-----------|----------------------------|--|
| Class | newClass | Class Name |
| | deleteClass | Class Name |
| | renameClass | Class Name New Class Name |
| | setAbstractClass | Class Name |
| | setNonAbstractClass | Class Name |
| | joinClasses | New Class Name Class Name 1 Class Name 2 |
| | divideClasses | Class Name Divided Classes -Divided class name -Divided class attributes -Divided class references |
| Attribute | newAttribute | Class Name Attribute Name Type |
| | deleteAttribute | Class Name Attribute Name |
| | renameAttribute | Class Name Attribute Name New Attribute Name |
| | updateAttribute | Class Name Attribute Name Type |
| Reference | newReference | Reference Name Source Class Name Target Class Name Containment Min Cardinality Max Cardinality |
| | deleteReference | Class Name Reference Name |
| | updateReference | Class Name Containment Min Cardinality Max Cardinality |
| | newInheritanceReference | Sub Class Name Super Class Name |
| | deleteInheritanceReference | Sub Class Name |

Source: own work.

between the classes created before in the composition process.

With this instructions catalog, the composition language offers a language that supports a great variety of metamodel composition cases.

In order to explain how the operations can be used, the next two metamodels presented in figure 3 will be used.

The goal of the example will include the next operations.

- Create a new class named "N"
- Create a new attribute named "attN1" in the class N with type EInt

- Create a new class named "M"
- Create a new attribute named "attM1" in the class M with type EInt
- Create a new attribute named "attB3" in the class B with type EInt
- Set abstract the class V
- Join the classes E and N with the name EN
- Create a new reference named M_Z with source class M, target class Z, containment false, min cardinality 1 and max cardinality *.
- Create a new reference named X_B with source class X, target class B, containment false, min cardinality 0 and max cardinality *.

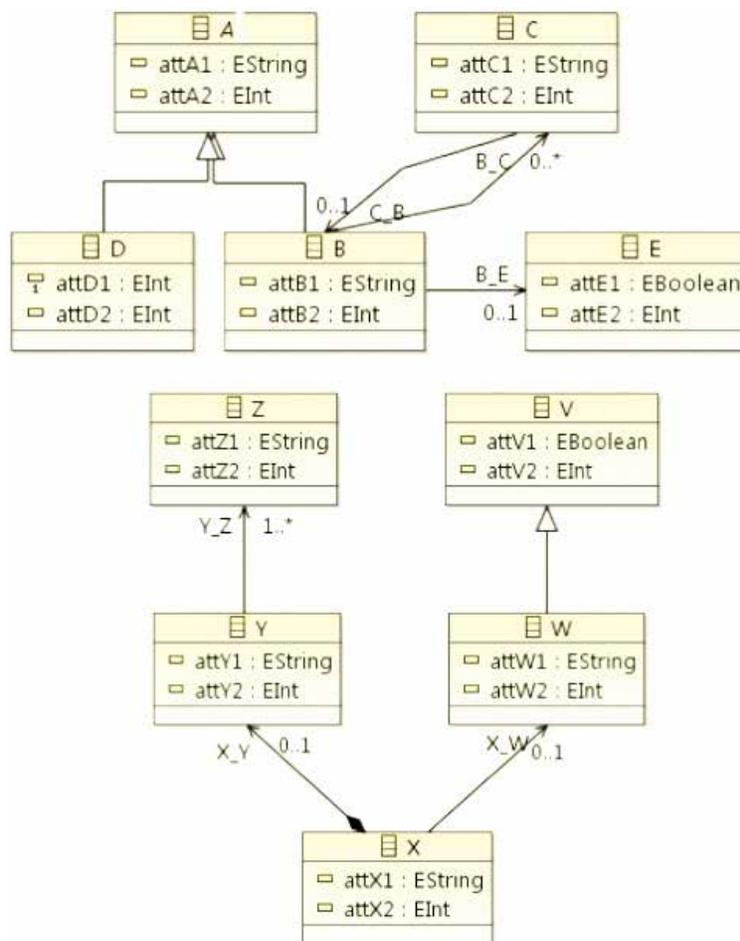


Figure 3. Imported metamodels

Source: own work.

- Divide the class X creating the class X1 with the attribute attX1 and the references X_Y and X_B; and the class X2 with the attribute attX1 and the references X_Y and X_W.

The listing presents with the source code for generating the composed metamodel following the requirements described.

```

1. import "inputMM1.ecore"
2. import "inputMM2.ecore"
3. export "outputMM"
4. newClass (N)
5. newAttribute (N, attN1, EInt)
6. newClass (M)
7. newAttribute (M.attM1, EInt)
8. newAttribute (B.attB3, EInt)
9. setAbstractClass (inputMM1.V)
10.joinClasses (EN, inputMM1.E, N)
11.newReference (M_Z, M, inputMM2.Z, false, 1, -1)

```

```

12.newReference (X_B, exampleMM2.X, exampleMM1.B, false, 0, -1)
13.divideClass (exampleMM2.X [X1, attX1, X_Y, X_B], [X2, attX1, X_Y, X_W])

```

As a result of the composition process, the composed metamodel generated is shown in the figure 4.

COMPOSITION ENGINE

The composition engine of this proposal executes the composition script sequentially. Once, the engine executes the import operations, it creates in dynamically memory the objects of each metamodel inside the correspondent package. Using the metamodels shown in the figure 3, and the previous example script, after executing the first, the second, and the third operations (lines 1, 2, and 3), the distribution of the elements in dynamic memory is presented in the figure 5. With these

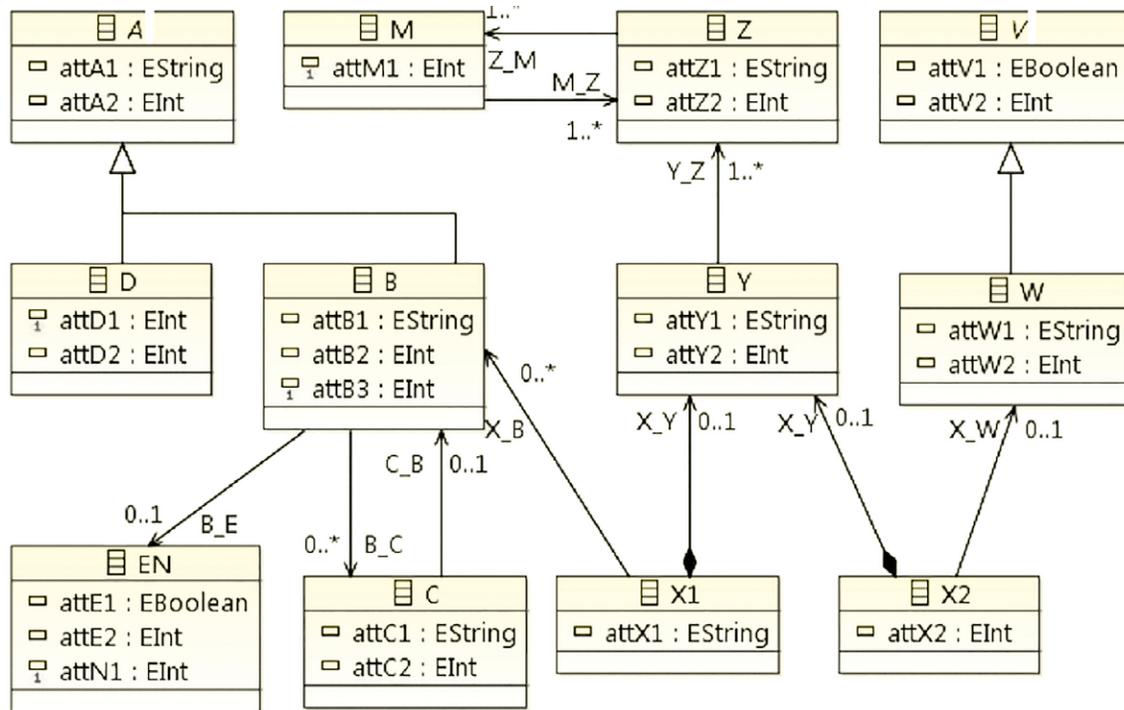


Figure 4. Output metamodel.

Source: own work.

operations the engine imports two support meta-models (MM_{sup-1} , MM_{sup-2}) and creates the composed metamodel (MM_0). The elements that belong to MM_{sup-1} and MM_{sup-2} are included in MM_0 .

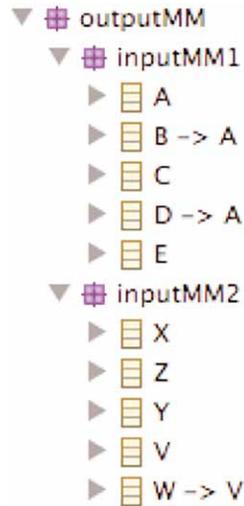


Figure 5. Distribution of the elements in dynamic memory.

Source: own work.

In addition, after the composition engine executes the sixth operation, the classes N and M are created in the generic package “outputMM”. The distribution of the elements in dynamic memory after the seventh operation is presented in the figure 6.

Also, after the composition engine executes the tenth operation, the class EN is created in the generic package “outputMM”. However, the classes involved in this operation that are E (that belongs to MM_{sup-1}) and N will be deleted from the correspondent packages. The distribution of the elements in dynamic memory after the tenth operation is presented in the figure 7.

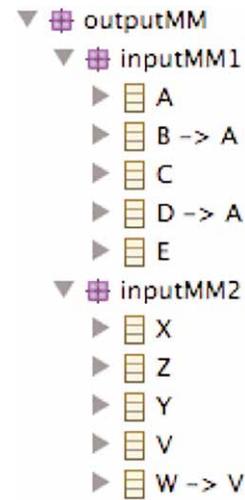


Figure 6. Distribution of the elements in dynamic memory.

Source: own work.

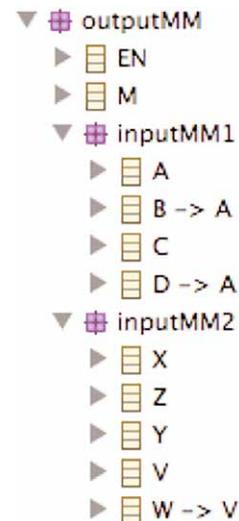


Figure 7. Distribution of the elements in dynamic memory.

Source: own work.

Finally, after the composition engine executes the thirteenth operation, the classes X1 and X2 are created in the generic package “outputMM”. However, the class X (that belongs to MM_{sup-2}) will be deleted from the correspondent package. The distribution of the elements in dynamic memory after the thirteenth operation is presented in the figure 8.

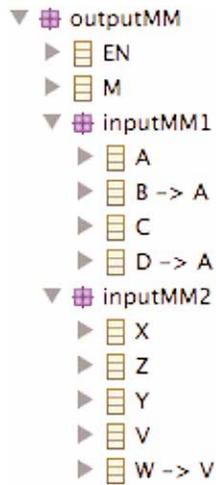


Figure 8. Distribution of the elements in dynamic memory.

Source: own work.

Once the composition engine executes the script, the classes from the import metamodels that have not been affected will be translated to the generic package “outputMM”. Also the packages of the imported metamodels will be deleted. As a result, all elements in the composed metamodel will belong to the generic package.

In the case that the engine finds that one operation cannot be executed, the engine will report the mistake and the process will not continue. The reasons in which the process can fail are the follows:

- The import metamodel does not exist.
- The class, attribute, or reference required does not exist.
- In the case of creation of new elements; the class, attribute, or reference related already exist.
- After executing the script, there are duplicated classes.

CASE STUDY

In order to demonstrate the functionality of the language, a simple case is taken. In this case, it is taken a summarized metamodel of a bike and a summarized metamodel of a car.

Bike Metamodel

The figure 9 presents a summarized metamodel of the bike with the elements abstracted for this domain. This metamodel consist in the main parts of a

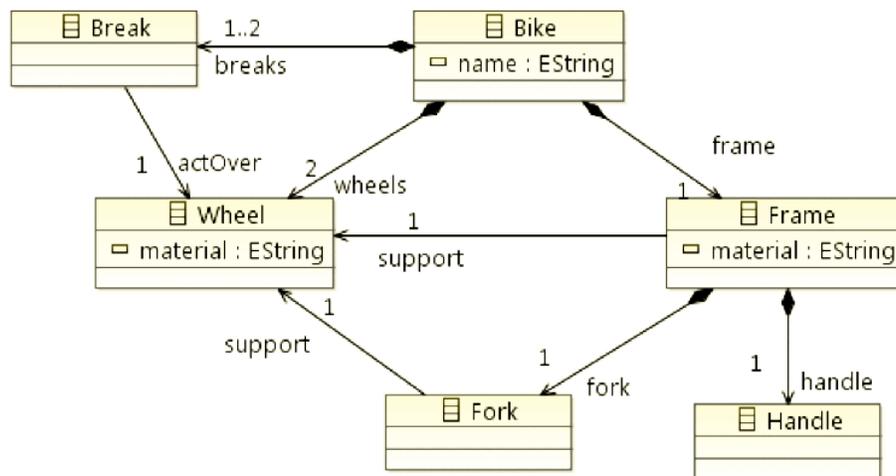


Figure 9. Bike metamodel.

Source: own work.

bike. This metamodel indicates that one bike has one frame, two wheels, and one or two breaks. Moreover, the frame has one handle and one fork, and supports just one wheel. Furthermore, the fork supports the other wheel. Finally, each break acts over one wheel.

Car Metamodel

The figure 10 presents a summarized metamodel of the car with the elements abstracted for this domain. This metamodel consist in the main parts of a car. This metamodel indicates that one car has one chassis, four wheels, four hydraulic breaks, and one engine. Moreover, the chassis has one body that has up to 5 doors, and supports four wheels. Finally, each break acts over one wheel.

Composed Metamodel

Based on the previous metamodels, the next script has been created in order to generate a composed metamodel related with a summarized motorcycle domain. The motorcycle has the majority of the components included in the bike metamodel; however, it requires more elements that can be provided by the car metamodel. The listing

presents the composition script used for composing the metamodel.

1. import "bike.ecore"
2. import "car.ecore"
3. export "motorcycle"
4. renameClass (bike.Bike, "Motorcycle")
5. deleteClass (bike.Break)
6. deleteClass (car.Car)
7. deleteClass (car.Chassis)
8. deleteClass (car.Body)
9. deleteClass (car.Door)
10. deleteClass (car.HydraulicBreak.actOver)
11. newReference (hydraulicBreaks, bike.Motorcycle, car.HydraulicBreak, trae, 2, 2)
12. joinClasses (NewWheel, bike.Wheel, car.Wheel)
13. newReference (actOver, car.HydraulicBreak, bike.Wheel, trae, 1, 1)
14. newReference (engine, bike.Motorcycle, car.Engine, trae, 1, 1)
15. divideClass (bike.Frame, [FrameChassis, material, handle, fork], [Seat, material])
16. newReference (seat, bike.Motorcycle, Seat, true, 1, 1)
17. newReference (frame, bike.Motorcycle, FrameChassis, true, 1, 1)

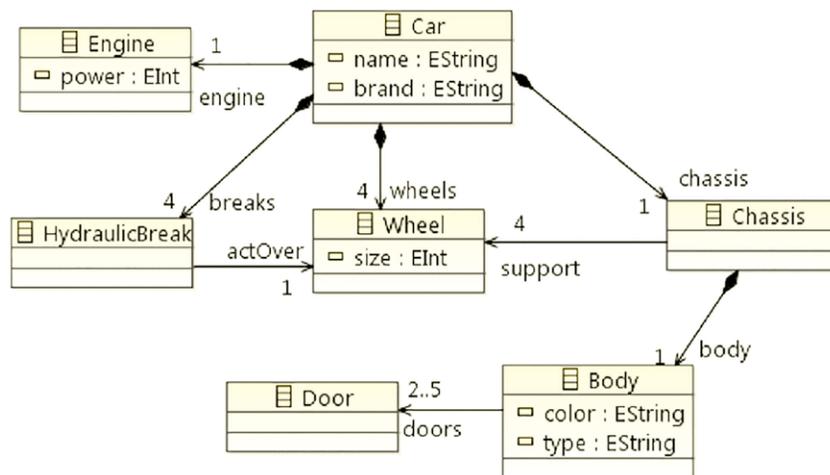


Figure 10. Car metamodel.

Source: own work.

The figure 11 presents a metamodel of the motorcycle generated by the composition engine after applying the previous script based on the composition DSL.

RELATED WORK

There are some approaches that already have treated the problem of metamodel composition. For instance, the work of Emerson *et al.*⁵ presents a complete description of metamodels composition. Also, it presents a detailed characterization of different techniques (e.g., merge, refinement) providing a wide understanding regarding advantages and disadvantages for the composition in the MDE context. However, this work does not present a specific proposal for solving metamodels composition.

In addition, Karsai *et al.*⁶ presents a proposal focused in the reusability of metamodels in one specific domain of information. This proposal also includes a language that allows the manipulation of metamodels that abstracts subdomains of the desired domain of information. Thus, the composition process is not possible with metamodels of different domains. Finally, this proposal acts over diagrams based on UML, which can be taken as disadvantage

due to the MDE context has become more relevant for academic and industrial communities.

Another related work is the proposal presented by (J. Oldevik, L. Kutvonen, and N. Alonistioti, 2005). In this work, the composition is achieved by the execution of several transformations using the transformation language Query View Transformation (QVT). This proposal consists in the creation of one framework that supports the execution of several transformations, where metamodels, which conform ECORE metamodel, are treated as models obtaining the desired behavior and results. This proposal has a disadvantage regarding with the level of knowledge of QVT because in this project, this language is focused in the transformation of one metamodel instead of the creation of on new metamodel as a result of the composition of several input metamodels.

Finally (R. France, F. Fleurey, R. Reddy, B. Baudry, and S. Ghosh, 2007) present a similar proposal for composition because they have created a DSL for defining the way in which the composition would be achieved. This proposal also takes into account the strategies presented in this paper (i.e. matching, merging, and refining); however, they focus their results not in metamodels, but in

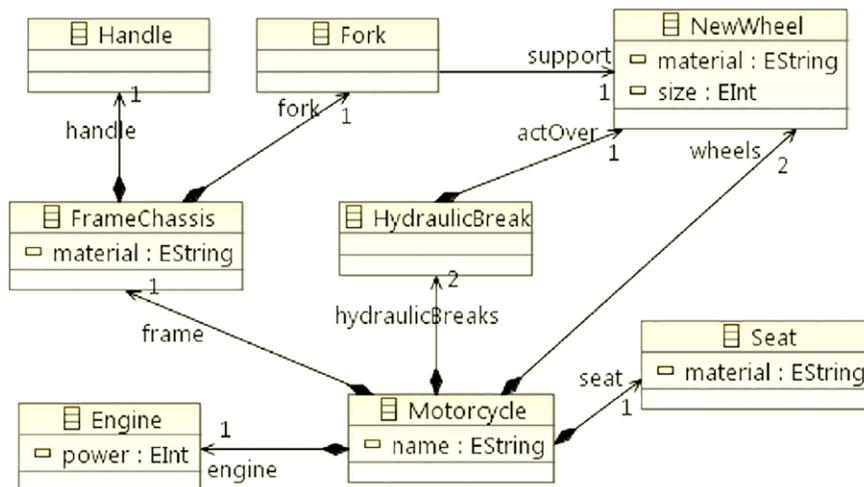


Figure 11. Motorcycle metamodel.

Source: own work.

UML models restricting the solution in one specific domain. Also, the language created is based on constraints, which makes harder the declaration of simple composition tasks such as the refinement of existing elements (e.g., updating of attributes or relations).

CONCLUSIONS

A metamodel composition process, where metamodelers can adapt concepts abstracted in several existing metamodels, is possible. In this approach one DSL allows metamodelers define the creation of new elements for the composed metamodel; the way to adapt the elements existing in those input metamodels, and the elements created in the composition process; and the generation of the new composed metamodel.

An advantage of this approach is that metamodelers cannot perform illogical composition operations. Another advantage of this approach is based on the execution of the composition as a set of atomic operations over the input metamodels; each transition can use the modifications done in the previous operations. One more advantage is the creation of metamodels reducing the effort for metamodelers by getting the elements abstracted in existing metamodels.

The presented approach is simple, completeness and has high granularity, for each composition operation can be done independently and all of them cannot be decompose in smaller operations; as a result, the proposal is adequate to be used by metamodelers in order to create new abstractions through a metamodel based on existing metamodels.

ACKNOWLEDGEMENT

The author thanks the Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

REFERENCES

- A. Ledeczi, G. Nordstrom, G. Karsai, P. Volgyesi, and M. Maroti (2001). On metamodel composition. *Control Applications, (CCA '01). Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on*, pp. 756-760.
- G. Karsai, M. Maroti, A. Ledeczi, J. Gray, and J. Sztipanovits (2004). Composition and cloning in modeling and meta-modeling. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, vol. 12, pp. 263-278.
- H. Florez (2012). Model Transformation Chains as Strategy for Software Development Projects. *The 3rd International Multi-Conference on Complexity, Informatics and Cybernetics: IMCIC 2012*.
- J. Bézivin (2005). On the unification power of models. *Software and Systems Modeling*, vol. 4, pp. 171-188.
- J. Henriksson, F. Heidenreich, J. Johannes, S. Zschaler, and U. Assmann (2008). Extending grammars and metamodels for reuse: the Reuseware approach. *Software, IET*, vol. 2, pp. 165-184.
- J. Oldevik, L. Kutvonen, and N. Alonistioti (2005). Transformation Composition Modelling Framework. *Distributed Applications and Interoperable Systems*. vol. 3543, ed: Springer Berlin / Heidelberg, pp. 1135-1136.
- M. Emerson and J. Sztipanovits (2006). Techniques for Metamodel Composition. *Computer Science and Information Systems Reports*, pp. 123-139.
- M. Herrmannsdoerfer, D. Ratiu, and G. Wachsmuth (2010). Language Evolution in Practice: The History of GMF. *Software Language Engineering*. vol. 5969, ed: Springer Berlin / Heidelberg, pp. 3-22.
- P.A. Muller, F.; Fondement, B. Baudry, and B. Combemale (2009). Modeling modeling modeling. *Software and Systems Modeling*, pp. 1-13.
- R. France, F. Fleurey, R. Reddy, B. Baudry, and S. Ghosh (2007). Providing Support for Model Composition in Metamodels. *Enterprise Distributed Object Computing Conference, 2007. EDOC 2007. 11th IEEE International*, pp. 253-253.





Productividad en una celda de manufactura flexible simulada en promodel utilizando path networks type crane

Productivity in a flexible manufacturing cell simulated in promodel using path networks type crane

María Elena Bernal Loaiza*, German Cock Sarmiento**, Jorge Hernán Restrepo Correa***

Fecha de recepción: 31 de agosto de 2013

Fecha de aceptación: 5 de diciembre de 2014

Citation / Para citar este artículo: Bernal Loaiza, M. E., Cock Sarmiento, G., & Restrepo Correa, J. H. (2015). Productividad en una celda de manufactura flexible simulada en promodel utilizando path networks type crane. *Revista Tecnura*, 19(44), 133-144. doi:<http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.2.a10>

Resumen

Esta investigación se centra en el diseño de una simulación del proceso de una celda de manufactura flexible (FMC) de la Facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad Tecnológica de Pereira, con el propósito de medir y elegir aquella alternativa de solución que mejore en mayor grado la productividad del sistema actual utilizando los resultados que proporciona el software Promodel. Para realizar lo anterior se utilizaron etapas de la simulación como definición del sistema, formulación del modelo, identificación de variables, recolección de datos, implementación e interpretación.

Como resultado, se calculó la productividad teniendo en cuenta las variables del modelo y tiempo de la simulación, al mismo tiempo se interpretó la información de cada una de las locaciones, hallando el porcentaje de utilización y total de entidades para las locaciones con capacidad unitaria; para las locaciones con mayor capacidad se encuentra información

referente al porcentaje de tiempo vacío, parcialmente ocupado, lleno y no disponible respecto del tiempo disponible. A diferencia de otras simulaciones, en este diseño en la parte de redes se utilizó el tipo de red Crane, asociado a los recursos del modelo. El cual facilita el desplazamiento de los brazos robots con las piezas que circulan a través del sistema.

Palabras clave: fabricación asistida por ordenador, modelo de simulación, productividad.

Abstract

This research focuses on the design of a simulation of the process in a flexible manufacturing cell at the Faculty of Engineering of the Universidad Tecnológica de Pereira, aiming at measuring and choosing the one alternative of solution that improves to a greater degree the productivity of the current system using the results provided by the software Promodel. In order to do this, the stages of the simulation as definition of the system, model formulation, identification

* Ingeniera de Sistemas, magíster en Investigación de Operaciones y Estadística, candidata a magíster en Administración del desarrollo Humano y Organizacional. Docente de la Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia. Contacto: mbernal@utp.edu.co

** Ingeniero Industrial, magíster en Investigación de Operaciones y Estadística. Docente de la Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia. Contacto: cook20038@gmail.com

*** Ingeniero Industrial, magíster en Investigación de Operaciones y Estadística, énfasis en Producción. Docente de la Universidad Tecnológica de Pereira; director, maestría y especialización en Sistemas Integrados de Gestión de la Calidad. Pereira, Colombia. Contacto: jhrestrepoco@utp.edu.co

of variables, data collection, implementation and interpretation were used.

As a result, the productivity was calculated taking into account the variables of the model and simulation time, at the same time the information from each of the locations was interpreted, finding the percentage of use and total number of entities for locations with unit capacity, and for locations with greater capacity there is information concerning to

the percentage of empty time, partially occupied, full and unavailable regarding available time. In contrast to other simulations, in this design, on the networks the type of network Crane was used, associated to the resources of model. Which facilitates the movement of robot arms with the parts circulating through the system.

Keywords: computer aided manufacturing, productivity, simulation models.

INTRODUCCIÓN

La productividad en una celda de manufactura flexible Flexible Manufacturing Cells (FMC) puede medirse en cuanto al mejoramiento en calidad, la reducción en costos e inventario, y un mejor manejo de los productos.

Una FMC es un grupo de máquinas o estaciones de trabajo relacionadas que realizan una tarea específica. El proceso que ejecuta cada una de las estaciones de trabajo de una FMC pueden ser simuladas en Promodel, con el fin de predecir posibles mejoras para el aumento de la productividad. Este aumento de productividad está enmarcado en los esfuerzos que conlleva una toma de decisión para un mejoramiento de la calidad de los procesos.

Por otra parte, la simulación ha demostrado ser capaz de hacer frente a las tareas de mejora de la productividad y la eficiencia en las que estas dificultades se superponen e interactúan. Históricamente, la mayor parte del éxito de la simulación que ha tenido en otros sectores de la economía (por ejemplo, el servicio, el transporte y el cuidado de la salud) se ha debido en gran medida a la reputación que se ganó en el sector manufacturero (Kale, 2007).

Teniendo en cuenta lo anterior, el presente trabajo tiene como objetivo realizar una simulación de la celda de manufactura flexible de la Facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad Tecnológica de Pereira, utilizando el software ProModel,

donde se describe cómo se utiliza la simulación para analizar la productividad mediante la construcción de un modelo del sistema actual de la celda, haciendo uso de una red de tipo *crane* en ProModel.

MARCO CONCEPTUAL

Al revisar fuentes bibliográficas se encuentran muchas publicaciones que utilizan la simulación discreta; entre ellas tenemos las siguientes.

Trujillo, Vallejo y Becerra (2010) utilizan la simulación para modelar un centro de llamadas con el ProModel®, que permita identificar las pruebas de bondad de ajuste y homogeneidad con el fin de formular propuestas de mejoramiento para la productividad del sistema. Entre ellas plantearon el requerimiento de nuevo personal e identificaron cuellos de botella.

El propósito del artículo según Taddei, Rodríguez y Ruiz (2013), es mostrar la utilización de la simulación de sistemas, enfocada al sector de los servicios, para resolver problemas de asignación de recursos y toma de decisiones en el proceso de Inscripciones de Primer Ingreso en el campus Hermosillo de la Universidad de Sonora, en el norte de México, teniendo como objetivo encontrar el número óptimo de servidores requeridos en los subprocesos involucrados, sin comprometer la calidad del servicio. El artículo muestra cómo la aplicación de la simulación de sistemas permite hacer más eficiente el uso de los recursos, reducir

los tiempos de espera y brindar mejor atención, en este caso a los aspirantes a ingresar a la Universidad de Sonora. Se aplican este tipo de simulaciones con alta frecuencia, ya que permiten modelar los procesos y las políticas de los servicios.

A través de este artículo Roldán, Moras y Aguilar (2007) se mostró la utilización de la simulación por medio de un software llamado Promodel®, como una herramienta para el mejoramiento de la logística en la empresa Fricongelados Citlaltépetl en Orizaba, Veracruz, México. Se hizo un modelo representativo del sistema real de reparto del helado, y a partir de este modelo se hizo otro con las mejoras propuestas para optimizar la entrega del producto y con ello incrementar la productividad de la distribuidora. Para efectuar el análisis estadístico de los tiempos de servicio en los puntos de venta se utilizó el programa Stat:Fit que incorpora Promodel® en las herramientas desplegadas en su menú inicial. En dicho programa se aplicaron las pruebas de bondad de ajuste chi cuadrado, Kolmogorov-Smirnov y Anderson-Darling a todos los datos recolectados para determinar a qué distribución de probabilidad teórica conocida (p. ej., uniforme, exponencial, normal, etc.) se ajustaba dicha información.

Según Coss (1993) la simulación es el proceso de diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un sistema o proceso y conducir experimentos con este modelo con el propósito de entender el comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias con las cuales se puede operar el sistema.

ProModel es un software de simulación utilizado por empresas de todo el mundo para simular sus operaciones en la búsqueda de mejoras en la productividad, optimización de la producción, disminución de costos, etc., así como para la evaluación de ideas y diseños de nuevos sistemas. Está disponible en: <http://www.simulart.cl/industrias/universidades-y-academicos>.

Al revisar la literatura se observa la diversidad de trabajos que se pueden desarrollar con el uso de la simulación. Lo anterior sirvió de referente para simular un modelo del sistema actual de la

celda de manufactura flexible de la Facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad Tecnológica de Pereira. Cabe señalar que simular no es una tarea fácil.

METODOLOGÍA

Etapas de la simulación del modelo de la FMC. Los pasos necesarios para realizar la simulación de la celda de manufactura flexible de la Facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad Tecnológica de Pereira son los siguientes (Coss, 1993).

Definición del sistema

La Facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad Tecnológica de Pereira cuenta con una Celda de Manufactura Flexible (FMC) que está compuesta por las siguientes estaciones de trabajo: un almacén de materia prima, un robot para descargue de material, una banda transportadora, *pallets* de transporte, fresadora CNC (con control numérico por computadora), y un brazo robot MITSUBISHI MELFA RV; este último cuenta con la posibilidad de desplazarse a través de una guía, para llevar materiales desde la banda transportadora a la fresadora CNC y viceversa. También cuenta con un software Minitex que permite el montaje y alistamiento de las estaciones de trabajo, planeación de los procesos de la ruta de producción de una pieza (ver la figura 1).

Formulación del modelo

Una vez definido con exactitud el proceso que se efectúa en la celda de manufactura flexible, se pasa a definir las variables y flujograma que describe en forma compleja al modelo.

Definición de variables

Número de piezas en proceso, número de piezas fresadas, número de piezas terminadas, piezas procesadas en el almacén y tiempo de ciclo.

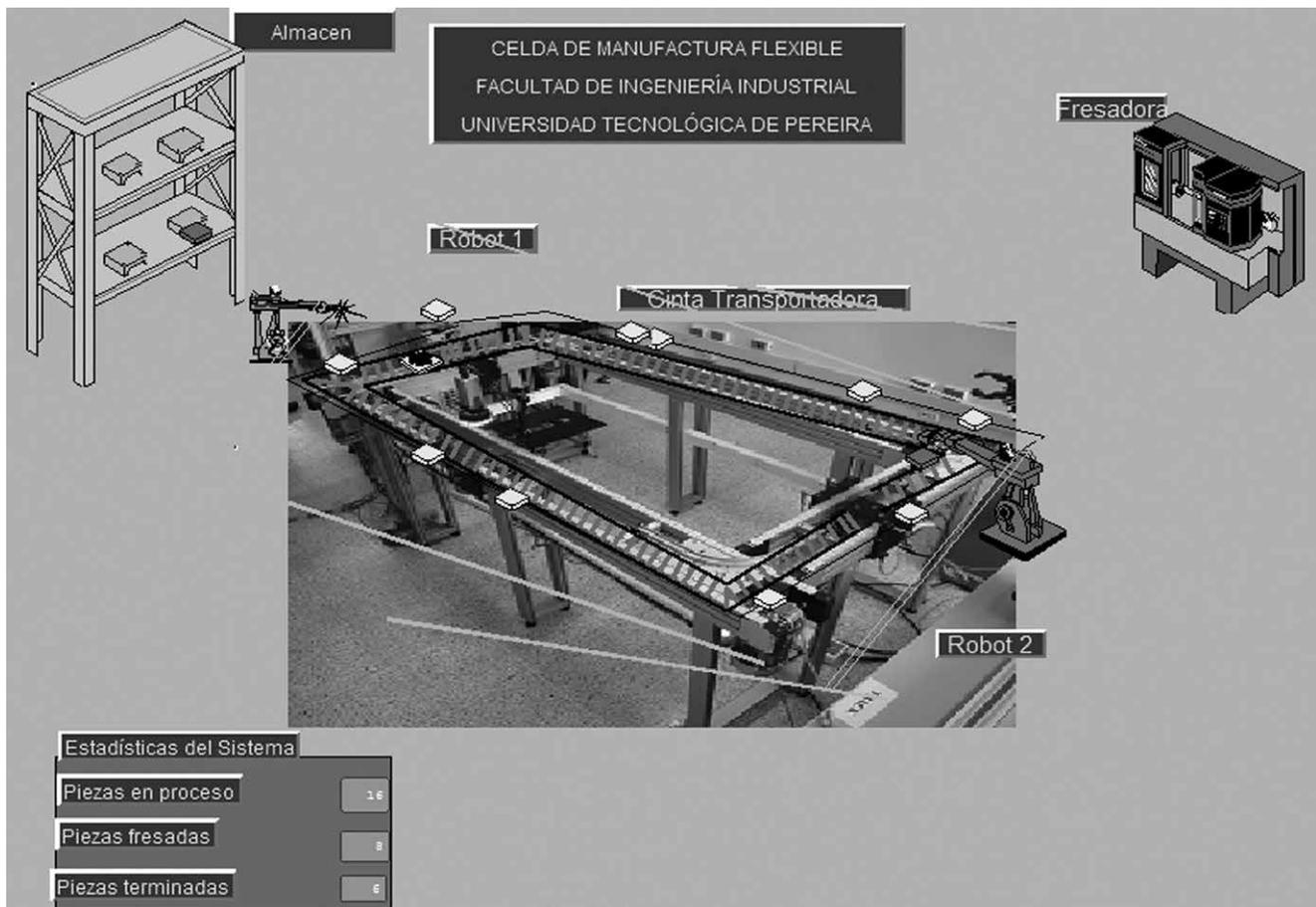


Figura 1. Layout del modelo en Promodel.

Fuente: ProModel.

Flujograma del modelo

En la figura 2 se puede observar los pasos de cada proceso del modelo.

El proceso que se realiza en la FMC que se refleja en la figura 2 es el siguiente: Se ubica una pieza prismática en una de las posiciones del almacén, después de esto se manipula el software para que efectúe las siguientes tareas:

El robot que está situado entre el almacén y la cinta transportadora debe coger la pieza prismática y ponerla en un palet de la cinta transportadora; la cinta transportadora inicia su movimiento y transporta la pieza hasta la ubicación del robot

MITSUBISHI MELFA que está del otro lado del almacén y localizado entre un extremo de la cinta transportadora. El robot coge la pieza prismática y la lleva hacia la fresadora, la fresadora hace todo un proceso en donde inicia con abrir la puerta para que el robot ubique la pieza y espera a que el robot se retire e inicia con el proceso que está asociado al programa que le indican en el sistema que debe realizar a la pieza; por ejemplo, un programa que dibuje en la pieza prismática un corte que simule el diseño de una tapa. Cuando termina de correr todas las instrucciones del software, automáticamente se detiene y se abre la puerta para que el robot nuevamente tome la pieza procesada

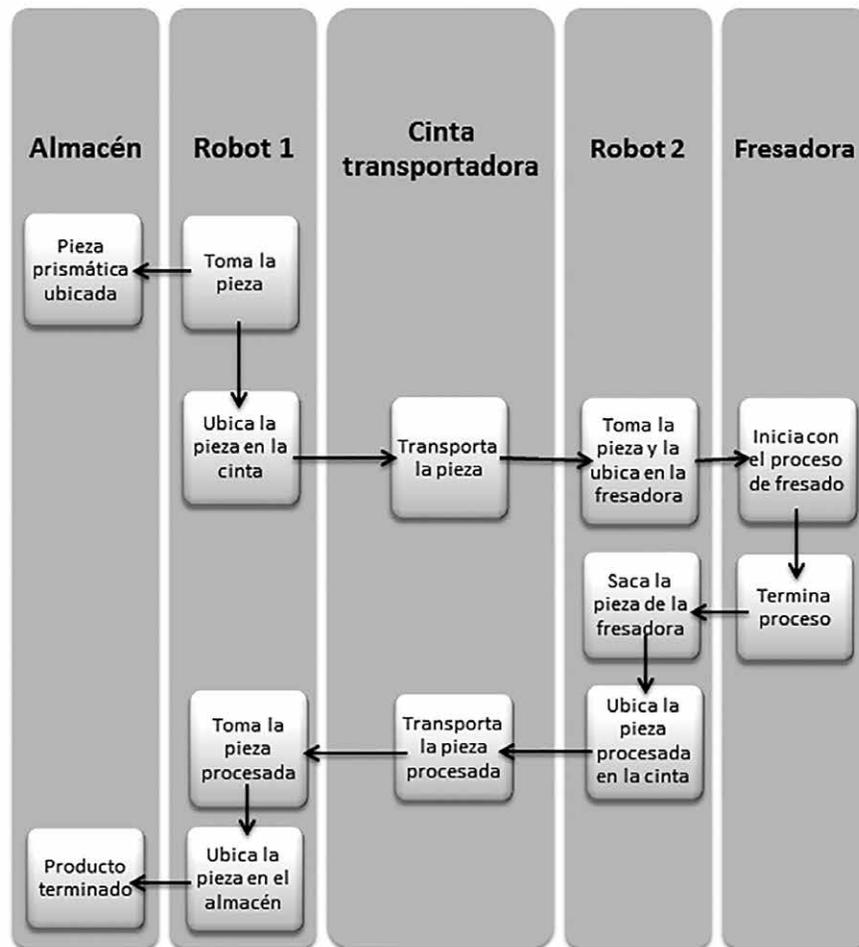


Figura 2. Flujograma del modelo.

Fuente: elaboración propia.

y la lleve al palet que está en la cinta transportadora. La cinta transportadora inicia su movimiento y lleva la pieza procesada al otro extremo en donde está el almacén, la cinta para y actúa el robot llevando la pieza procesada a su lugar en el almacén como producto terminado.

Recolección de datos

El Minitel, software que controla la celda de manufactura flexible tiene una opción de registros históricos en donde se puede visualizar información

de las planificaciones que se han lanzado a producción y la lista de órdenes de fabricación ya producidas, mostrando información como total y mínimo tiempo de fabricación. También se puede observar un Gantt de la producción.

El Promodel permite visualizar los resultados de la simulación por medio de tablas y un visualizador para generar gráficos como histogramas, entre otros.

Teniendo en cuenta lo anterior es posible obtener datos que pueden describir el comportamiento de los procesos con el fin de mejorar la productividad.

Implementación

La simulación de estaciones de trabajo de una celda de manufactura flexible comienza por el reconocimiento del sistema e identificar la interacción existente que se requiere para hacer un modelo proactivo. Dicho modelo se desarrolla en "ProModel, el cual está diseñado para modelamiento de sistemas de fabricación que van desde pequeños talleres de trabajo y las células de mecanizado a gran escala de producción y los sistemas de fabricación flexibles" (Harrell, 2013). Los elementos básicos de modelado en ProModel son: locaciones, entidades, llegadas y procesos (Harrell, 2004). Las *locaciones* representan lugares fijos en el sistema; cualquier cosa que un modelo puede procesar se llama una entidad. En la figura 3 se encuentra la descripción de las locaciones y de las entidades.

Algunos ejemplos son partes de una fábrica, los pacientes de un hospital, los clientes de un banco y los viajeros que llaman para hacer reservas aéreas. El mecanismo para definir cómo las entidades entran en el sistema se llama *llegadas*, las cuales se encuentran detalladas en la figura 6. Las entidades pueden llegar individualmente o en lotes. El tiempo entre las llegadas de entidades sucesivas se llama tiempo entre llegadas. El *procesamiento* describe las operaciones que tienen lugar en una locación, como la cantidad de tiempo que una entidad pasa allí, los recursos que necesita para completar el proceso, y cualquier cosa que sucede en el lugar, ProModel también incluye otros elementos, como la red de caminos descrita en la figura 4, atributos, recursos descritos en la figura 4, variables detalladas en la figura 6, los nodos asociados a los recursos referidos en la figura

```

*****
*
*                               Locations
*                               *
*****
Name          Cap      Units  Stats      Rules      Cost
-----
Almacen       2         1      Time Series Oldest, ,
Fresadora     1         1      Time Series Oldest, ,
Cinta_transportadora_1  INFINITE 1      Time Series Oldest, FIFO,
Cinta_transportadora_2  INFINITE 1      Time Series Oldest, FIFO,
Cinta_palet   INFINITE 1      Time Series Oldest, FIFO,
Mesa1         INFINITE 1      Time Series Oldest, ,
Mesa2         INFINITE 1      Time Series Oldest, ,
*****
*
*                               Entities
*                               *
*****
Name          Speed (mpm)  Stats      Cost
-----
pieza_prismatica  50      Time Series
pallet_lleno     50      Time Series
pallet_vacio     50      Time Series
*****
*
*                               Path Networks
*                               *
*****
Name          Type          T/S          From          To          BI          Dist/Time  Speed Factor
-----
Red_1        Crane        Speed & Distance  Origin      Rail1End  Uni
              Origin      BridgeEnd  Uni
              BridgeEnd  Rail2End  Uni
Red_2        Crane        Speed & Distance  Origin      Rail1End  Uni
              Origin      BridgeEnd  Uni
              BridgeEnd  Rail2End  Uni

```

Figura 3. Modelado del sistema de una celda de manufactura flexible en Promodel.

Fuente: ProModel.

5, etc. ProModel se centra en la utilización de recursos, la producción, la capacidad, la productividad, los niveles de inventario, cuellos de botella, tiempos de producción y otras medidas de rendimiento. ProModel es capaz de modelar los más complejos sistemas (Yu, 2006). La descripción del proceso se encuentra en la tabla 1.

Crane: es un sistema de grúas que forma una zona representado en paralelogramo, delimitada

por dos carriles y las líneas que conectan los puntos finales de los rieles. Las líneas que conectan los puntos extremos de los carriles son efectivamente las dos posiciones extremas de las líneas centrales de los puentes que operan dentro de la trayectoria. ProModel utiliza el final de uno de los carriles como el origen para servir como punto de referencia para todos los cálculos de distancia dentro de la trayectoria.

```

*****
*                                     Interfaces                                     *
*****
Net          Node          Location      Coords (R,B)
-----
Red_1        N1            Almacen      2.90, 5.59
              N2            Mesa1        9.96, 6.76
Red_2        N1            Mesa2        4.02, 3.70
              N3            Fresadora    1.22, 0.38

*****
*                                     Resources                                    *
*****
Name         Units  Stats      Res      Ent      Path          Motion          Cos
-----
Robot_1      1      By Unit  Closest  Oldest  Red_1          Empty: 10,10 mpm
              Home: origin   Full: 5,5 mpm
              (Return)  Accel: 1 mpss
              Decel: 1 mpss
              Pickup: 20 seconds
              Deposit: 20 seconds

Robot_2      1      By Unit  Closest  Oldest  Red_2          Empty: 10,10 mpm
              Home: BridgeEnd Full: 5,5 mpm
              (Return)
    
```

Figura 4. Descripción recursos y redes.

Fuente: Promodel.

```

*****
*                                     Resource Node Logic                            *
*****
Res          Node          Entry Logic      Exit Logic
-----
Robot_1      N1            GRAPHIC 3        GRAPHIC 2
              N2            GRAPHIC 2        GRAPHIC 2
              Origin      GRAPHIC 1        GRAPHIC 1
Robot_2      N1            GRAPHIC 2        GRAPHIC 1
              N3            GRAPHIC 1        GRAPHIC 2
    
```

Figura 5. Nodos asociados a los recursos.

Fuente: Promodel.

Tabla 1. Descripción del proceso.

| Processing | | | | | | | |
|------------------|------------------------|--|-----|------------------|------------------------|---------|---|
| Entity | Location | Process | | | Routing | | |
| | | Operation | Blk | Output | Destination | Rule | Move Logic |
| pieza_prismática | Almacén | Tiempo_entrada=CLOCK(MIN) WAIT 1 | 1 | pieza_prismática | Mesa1 | LOAD 1 | INC Piezas_en_proceso MOVE WITH Robot_1 THEN FREE |
| pallet_vacío | Cinta_palet | | 1 | pallet_vacío | Mesa1 | FIRST 1 | |
| pallet_vacío | Mesa1 | LOAD 1 WAIT 0.16 | 1 | pallet_lleno | Cinta_transportadora_1 | FIRST 1 | |
| pallet_lleno | Cinta_transportadora_1 | | 1 | pallet_lleno | Mesa2 | FIRST 1 | |
| pallet_lleno | Mesa2 | UNLOAD 1 WAIT 1 | 1 | pallet_vacío | Cinta_palet | FIRST 1 | |
| pieza_prismática | Mesa2 | | 1 | pieza_prismática | Fresadora | FIRST 1 | MOVE WITH Robot_2 THEN FREE |
| pieza_prismática | Fresadora | tiempo_proceso_fresadora=CLOCK(MIN) WAIT 5 | 1 | pieza_prismática | Mesa2 | FIRST 1 | GRAPHIC 2 LOG "Tiempo de proceso en fresadora", tiempo_proceso_fresadora MOVE WITH Robot_2 THEN FREE INC Piezas_fresadas |
| pallet_vacío | Cinta_palet | | 1 | pallet_vacío | Mesa2 | FIRST 1 | |
| pallet_vacío | Mesa2 | LOAD 1 WAIT 1 | 1 | pallet_lleno | Cinta_transportadora_2 | FIRST 1 | |
| pallet_lleno | Cinta_transportadora_2 | | 1 | pallet_lleno | Mesa1 | FIRST 1 | |
| pallet_lleno | Mesa1 | UNLOAD 1 WAIT 2 | 1 | pallet_vacío | cinta_pallet | FIRST 1 | GRAPHIC 2 MOVE WITH Robot_1 THEN FREE INC Piezas_procesadas_almacén |
| pieza_prismática | Mesa1 | GRAPHIC 2 WAIT 1 | 1 | pieza_prismática | Almacén | FIRST 1 | |
| pieza_prismática | Almacén | LOG "Tiempo de Ciclo", tiempo_entrada | 1 | pieza_prismática | EXIT | FIRST 1 | INC Piezas_terminadas DEC Piezas_en_proceso |

Fuente: elaboración propia.

```

*****
*                               Arrivals                               *
*****
Entity      Location  Qty Each  First Time  Occurrences  Frequency  Logic
-----
pieza_prismatica Almacen  1         0           inf          1
pallet_vacio     Cinta_palet 1         0           inf          2

*****
*                               Attributes                             *
*****
ID          Type          Classification
-----
#Este atributo llamado "tiempo_entrada", es asignado a CADA entidad
tiempo_entrada Real      Entity
tiempo_proceso_fresadora Real    Entity

*****
*                               variables (global)                       *
*****
ID          Type          Initial value  Stats
-----
Piezas_en_proceso Integer      0             Time Series
Piezas_fresadas Integer      0             Time Series
Piezas_terminadas Integer      0             Time Series
Piezas_procesadas_almacen Integer      0             Time Series
    
```

Figura 6. Descripción de llegadas, atributos y variables.

Fuente: ProModel.

RESULTADOS

Para analizar el comportamiento de los procesos con el fin de mejorar la productividad de la

simulación de la celda de manufactura flexible se tuvo en cuenta los resultados obtenidos, los cuales se muestran en la figura 7 y tabla 2.

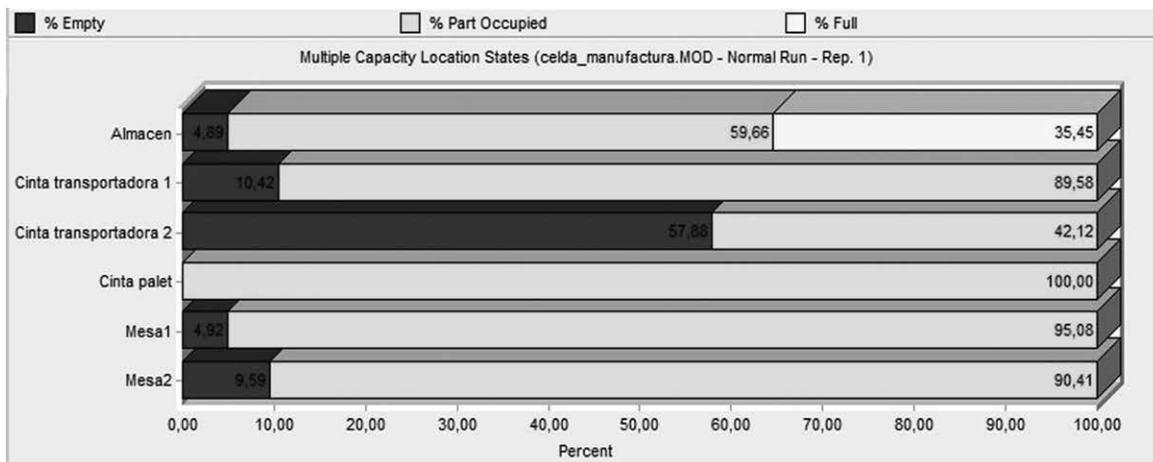


Figura 7. Capacidad de las locaciones.

Fuente: ProModel.

Tabla 2. Descripción del proceso.

| Name | Scheduled Time (HR) | % Operation | % Setup | % Idle | % Waiting | % Blocked | % Down |
|-----------|---------------------|-------------|---------|--------|-----------|-----------|--------|
| Fresadora | 3 | 63,89 | 0 | 25,42 | 10,69 | 0 | 0 |

Fuente: ProModel.

Se puede observar en la tabla 3 y tabla 4 que la locación almacén está ocupada en 59,6%, vacía en 4,89% y llena completamente en 35,45%. La cinta transportadora 2 presenta un alto grado de vacío (57,88%); lo anterior se puede presentar por el proceso que debe realizar la fresadora y hasta que se termine dicho proceso el robot 2 no puede entregar a la cinta transportadora 2 el material

para continuar con el proceso. Estos resultados son bastante eficientes ya que podemos observar altos porcentajes de ocupación de las locaciones, exceptuando las locaciones de almacén y cinta transportadora 2, que se deben estudiar a fondo para ver qué sucede y poder aumentar la utilización de las mismas. La locación fresadora no presenta bloqueos, punto que también aumenta la productividad.

Tabla 3. Locaciones del modelo.

| celda_manufactura.MOD (Normal Run-Rep. 1) | | | | | | | | |
|---|---------------------|-----------|---------------|--------------------------|--------------|------------------|------------------|---------------|
| Name | Scheduled Time (HR) | Capacity | Total Entries | Avg Time Per Entry (MIN) | Avg Contents | Maximum Contents | Current Contents | % Utilization |
| Almacén | 3 | 2,00 | 73 | 3,22 | 1,31 | 2 | 1 | 65,28 |
| Fresadora | 3 | 1,00 | 23 | 5,84 | 0,75 | 1 | 1 | 74,58 |
| Cinta transportadora 1 | 3 | 999999,00 | 51 | 3,75 | 1,06 | 2 | 1 | 2,14 |
| Cinta transportadora 2 | 3 | 999999,00 | 22 | 3,45 | 0,42 | 1 | 0 | 0,94 |
| Cinta palet | 3 | 999999,00 | 159 | 8,63 | 7,63 | 10 | 8 | 2,45 |
| Mesa1 | 3 | 999999,00 | 126 | 34,40 | 24,08 | 55 | 54 | 0,00 |
| Mesa2 | 3 | 999999,00 | 97 | 44,79 | 24,14 | 52 | 52 | 0,00 |

Fuente: ProModel.

Se simula el modelo durante 3 horas del proceso de la celda de manufactura flexible y se obtiene un inventario final de 73 unidades que llegaron al almacén. Hay que tener en cuenta que en estas 73 piezas hay piezas sin fresar y piezas fresadas, que son los productos terminados. Lo anterior porque el almacén recibe la materia

prima y el producto final; para lograr un mejor análisis se debe recurrir al resultado de las variables. La locación que tiene mayor porcentaje de utilización es la fresadora, ese alto porcentaje podría estar relacionado con el tiempo de proceso de la locación. A continuación, en la tabla 4, podemos observar el resultado de las variables.

Tabla 4. Variables del modelo.

| Name | Current Value |
|---------------------------|---------------|
| Piezas en proceso | 31 |
| Piezas fresadas | 22 |
| Piezas terminadas | 21 |
| Piezas procesadas almacén | 21 |

Fuente: elaboración propia

Se define la productividad en un puesto de trabajo como la relación existente entre un conjunto de unidades procesadas por unidad de

tiempo (Sempere, 2008), obteniendo la siguiente ecuación:

$$Productividad = \frac{\text{unidades procesadas}}{\text{tiempo}} \quad (1)$$

Teniendo en cuenta la ecuación (1), para medir la productividad de los resultados del modelo, con miras al mejoramiento para la productividad del sistema se tuvo en cuenta la siguiente medida de desempeño:

Calcular productividad = $23/3 = 7$ piezas procesadas por hora

Este valor se constituye en uno de los principales indicadores, ya que establece el rendimiento del modelo en una corrida de simulación.

Tabla 5. Recursos del modelo.

| celda_manufactura.MOD (Normal Run-Rep. 1) | | | | | | | | |
|---|-------|---------------------|-------------------|--------------------------|------------------------------|-------------------------------|---------------------|---------------|
| Name | Units | Scheduled Time (HR) | Number Times Used | Avg Time Per Usage (MIN) | Avg Time Travel To Use (MIN) | Avg Time Travel To Park (MIN) | % Blocked In Travel | % Utilization |
| Robot 1 | 1,00 | 3,00 | 72,00 | 2,08 | 0,29 | 0,00 | 0,00 | 95,08 |
| Robot 2 | 1,00 | 3,00 | 45,00 | 0,66 | 0,34 | 0,68 | 0,00 | 25,41 |

Fuente: Promodel.

El número de veces que se utiliza cada uno de los robots en cada una de las secciones es 72 y 45 para el robot 1 y robot 2, respectivamente. El tiempo promedio de cada robot en cada una de las secciones fue 2,08 y 0,66 minutos. El recurso más utilizado es el robot 1. Lo anterior se puede observar en la figura 9, donde se detalla los resultados de la operación de los recursos en el modelo.

CONCLUSIONES

La metodología utilizada en este trabajo permitió evaluar la productividad de un proceso que se lleva a cabo en una celda de manufactura flexible, por medio del Promodel que permite la modelación y análisis para la mejora de procesos. Este tipo

de metodología puede extenderse para la evaluación de otros sistemas como manejo de materiales, prestación de servicios, entre otros. Sin embargo, la mayor dificultad para modelar se centra en comprender muy bien el sistema actual.

La simulación del modelo permitió construir y validar una metodología para el mejoramiento de procesos y maximización del uso de los recursos, dado que la experimentación sobre el modelo ayuda a comprender el comportamiento del sistema y a la toma de decisiones, las cuales pueden aumentar la productividad con un mejor desempeño del sistema (Soto, 2010).

La utilización de las etapas de la simulación como definición del sistema, formulación del modelo, identificación de variables, recolección de

datos, implementación e interpretación, permiten una mayor comprensión de la realidad del sistema que se está simulando.

FINANCIAMIENTO

El artículo es uno de los resultados del proyecto de investigación “Metodología para el mejoramiento de procesos a través de la ingeniería de métodos y la manufactura esbelta en busca de la maximización de la utilización de los recursos-segunda etapa”, radicado en la Vicerrectoría de Investigaciones Innovación y extensión de la Universidad Tecnológica de Pereira con el código 7-12-1. El proyecto se encuentra en la categoría sin financiación.

REFERENCIAS

- Coss, R. (1993). *Simulación un enfoque práctico*. México D.F.: Limusa.
- Harrell, C. y Price R. (2003). *Simulation modeling using ProModel technology*. Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference.
- Harrell, C.; Ghosh, B. y Bowden, R. (2004). *Simulation Using ProModel*. (2a. ed.) Mc Graw-Hill.
- Kale, N. ; Zottolo, M. ; Ulgen, O. y Williams E. (2007). *Simulation improves end-of-line sortation and material handling pickup scheduling at appliance manufacturer*. [Winter Simulation Conference–WSC](#).
- Roldán, E.; Moras, C., y Aguilar, A. (2007). Optimización de las rutas de reparto de helado de la empresa Fricongelados Citlaltépetl. *Ingeniería Industrial*, Vol. 1, No. 1. Disponible en: <http://academia-journals.com/downloads/RoldanMorasAguilar.pdf> [Consulta: 2014-05-14].
- Sampere, F.; Miralles, C.; Romano, C. y Vincens, E. (2008). *Aplicación de mejora de métodos de trabajo y medición de tiempos*. México D.F.: Limusa.
- Soto, J. (2010). *Laboratorios de simulación discreta*. Colombia: Postergraph S.A.
- Taddei, J.; Rodríguez, R., y Ruiz, J. (2013). Mejora del proceso de inscripciones en una Institución de Educación Superior mediante Simulación. *Ingeniería Industrial*, vol. 34, No. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1815-59362013000100003&script=sci_art-text. [Consulta: 2013-05-10].
- Trujillo, J.; Vallejo, J., y Becerra, M. (2010). Metodología para la simulación de centros de llamadas–Caso de estudio. *Studiositas*, vol. 5, No. 3, pp. 117-137. Disponible en: <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3951276>. [Consulta: 2014-05-12].
- Yu, Q.; Duffy, V. y Zachary, J. (2006). *Productivity simulation with Promodel for an automotive assembly workstation involving a lift assist device*. Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference.





Theoretic similitude of the aerobic biological growth kinetics for the stabilization of organic matter in wastewaters treatment

Similitud teórica de la cinética de crecimiento biológico aeróbico para la estabilización de materia orgánica en el tratamiento de aguas residuales

Juan Pablo Rodríguez Miranda*, Cesar Augusto García Ubaque**, María Camila García Vaca*

Fecha de recepción: 7 de mayo de 2014

Fecha de aceptación: 19 de enero de 2015

Citation / Para citar este artículo: Rodríguez Miranda, J. P., García Ubaque, C. A., & García Vaca, M. C. (2015). Theoretic similitude of the aerobic biological growth kinetics for the stabilization of organic matter in wastewaters treatment. *Revista Tecnura*, 19(44), 145-156. doi: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.2.a11>

Abstract

To achieve the stabilization of organic matter in wastewaters treatment, it is not only significant to establish the microbial growth kinetics, but also the interrelation of the removal of nutrients such as nitrogen, given the similitude of coefficients, specific growth rate and the adjustments for water temperature, which represents it for both the removal of organic matter as well as for the nitrification and denitrification processes present in the biological wastewaters treatment. Therefore, this theoretic similitude between microbial growth kinetics and nitrogen removal processes constitutes concise considerations for the dimensioning process of wastewater biological treatment systems, which contribute in the understanding of the simultaneous process of removing organic matter and nutrients from raw wastewater.

Keywords: organic matter, nitrogen, wastewater, wastewater treatment.

Resumen

Para la estabilización de la materia orgánica en el tratamiento de las aguas residuales no solo es significativo establecer la cinética de crecimiento microbiano sino la interrelación de la remoción de nutrientes como el nitrógeno, dada la similitud de coeficientes, tasa de crecimiento específica y los ajustes por temperatura del agua, que lo representa tanto para la remoción de la materia orgánica como para los procesos de nitrificación y denitrificación presentes en el tratamiento biológico de las aguas residuales. Por ello, esta similitud teórica de las cinéticas de crecimiento microbiano y de los procesos de remoción de nitrógeno constituye consideraciones concisas para el proceso de dimensionamiento de sistemas de tratamiento biológicos de tratamiento de aguas residuales, que ayudan a entender el proceso simultáneo de remover materia orgánica y nutrientes del agua residual cruda.

Palabras clave: agua residual, materia orgánica, nitrógeno, tratamiento de aguas residuales.

* Sanitary and Environmental Engineering. Master in Environmental Engineering. PhD (C) Engineering. Faculty of Environment, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogota, Colombia. Contact: jprodriguez@udistrital.edu.co.

** Civil Engineer. PhD in Engineering. Faculty of Technology, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogota, Colombia. Contact: cagarciau@udistrital.edu.co.

*** Chemical engineer. Department of Chemical Engineering, Universidad de Los Andes. Bogota, Colombia. Contact: mcgarcia149@uniandes.edu.co.

INTRODUCTION

The composition of raw or untreated wastewater may vary depending on the eating habits, the economic and industrial activity and the socio-economic environment of the populations and generally the composition may have organic matter compounds (BOD, COD, TOC). However, organic matter in wastewaters is highly heterogeneous, containing substances with different molecular weights, ranging from simple to very complex polymers (Krzeminski, 2012) and the rate of degradation or the rate of reduction of organic matter and specific substances may vary according to factors that proportionally affect the stabilization of organic matter. Within the context of wastewater treatment engineering, the decomposition of organic matter may be adequately described as the loss of biomass or the loss of activity through the activation of microorganisms degraders of the same (Manser, 2006). In contrast to the above, the biomass activities, and the concentration of microbial products can be analyzed through aerobic growth kinetics for the stabilization of organic matter in aerobic biological reactors (Sabia, 2013), and through them, the activated sludge models have the purpose of modeling the concentrations of nutrients and not the number and conditions of the microorganisms (Chiavola, 2014). The application of aerobic microbial growth kinetics in the design of reactors for the stabilization of organic matter, requires a balance between the steady state approach and the unidimensional approach, which are widely used and implemented in the design of the aerobic biological treatment of municipal wastewaters (Eldyasti, 2012). The Monod type equations have been widely used to describe the kinetics of aerobic degradation. Up to now, very few studies have been conducted to determine the optimum kinetic values in aerobic treatment (Günay, 2013, Chiavola, 2014, Pomiès, 2013 and Cosenza, 2014); as well as the similitude of the kinetics for the stabilization of organic matter and the stabilization of the nitrogen present in wastewaters.

Due to the above, the treatment of wastewater using biological technologies presents a large variety of reactors and special configurations for the stabilization of biodegradable organic compounds as a fraction of total organic matter, suspended solids, nitrogen and phosphorus among others (Rodríguez, 2012). Special care shall be given to having an adequate nutritional balance among the input substrate (affluent), the microbial consortium and the nutritional and energy requirements inside the reactor tank; hence, the importance of establishing kinetic coefficients in order to know the velocity of the biological reaction of the microbial consortium and its rapid or slow stabilization of the organic compounds present in the raw wastewater. Accordingly, this study presents the considerations of comparison and similitude of the aerobic biological growth kinetics for the stabilization of organic matter and the removal of nitrogen in the treatment of wastewater, in terms of the criteria germane to the coefficients and equations that represent the biological event within the reactors applied in the management of wastewaters.

BIOLOGICAL KINETICS FOR THE STABILIZATION OF ORGANIC MATTER

The composition of wastewater comprises substrates of multicomponents (Crittenden, 2005) (*in many cases, the carbon source is the substrate, but an inorganic nutrient, an aminoacid, vitamin or any other compound necessary for cellular synthesis may be referred to as a substrate in particular cases*), namely, a mix of compounds that can be reported as BOD o COD o TOC (APHA, 1989) and each of these components are present in the water in different concentrations and are removed in accordance with an order of kinetics, at different velocities though, it could happen that to the extent that a substrate (growth limiting nutrient) decreases, the velocity of removal decreases in the same proportion, originating an inflexion point in a removal curve. The kinetic phenomena and the stoichiometry of the removal of the substrate, the

growth of the biomass and the consumption of oxygen are a fundamental and explicative base of the processes involved in the treatment of wastewaters (Nodal, 2001 and Rodríguez, 2013). Meaning that the study of the kinetics determines the velocity at which the microorganism degrades a specific residue, which provides the necessary basic information to determine the adequate size of the aerobic biological, anaerobic or hybrid reactors (Romero, 2004). In all treatment systems, it is indispensable to control the environmental conditions to ensure an optimum environment for the development of the microorganisms, but additionally, sufficient time of permanence is required for these to reproduce, such time of permanence is directly related to the growth rate and the velocity at which they degrade the substrate, which leads to the calculation of the kinetic coefficients.

The knowledge of the stabilization of organic matter in the treatment of wastewaters is represented through the description of microbial growth, and the most widely used method is the *Monod* method (Eckenfelder, 2000, Droste 1997 and Gil, 2005) which relates microbial growth with the limiting substrate, that is, describes the growth dynamics of a bacterial culture, limited solely by the concentration of substrate (Eweis, 1999) which is highly dependable on the temperature of water, pH, nutrients and the type of microbial consortium present, which can be expressed as follows (Crites, 2000, Metcalf & Eddy, 2003, Eweis, 1999 and Ferrer, 2008).

$$\mu = \frac{\mu_{Max} * S}{K_s + S} \quad (1)$$

Where μ is the growth rate (h^{-1}); μ_{Max} is the maximum growth rate (h^{-1}); K_s is the saturation coefficient (mg/L) and S is the concentration of the substrate (mg/L). The above indicates that if $S \gg K_s$, the growth rate shall be approximately equal to μ_{Max} . The values of K_s in the stabilization of organic matter indicate a high affinity of the microbial consortium with the affluent substrate, which shows that the growth rate is generally present for

a slightly lower concentration of affluent substrate, but if the concentration of the affluent substrate is diluted, the growth rate takes a tendency towards zero. In addition to the above, if there is an effect of the concentration of the substrate over the specific growth rate, the following equation is obtained, taking into account that the biological growth corresponds to a first order reaction with a concentration of active biomass $\frac{dX}{dt} = \mu * X = r_g$, as follows (Crites, 2000, Metcalf & Eddy, 2003, Eweis, 1999 and Ferrer, 2008).

$$r_g = \frac{\mu_{Max} * X * S}{K_s + S} \quad (2)$$

Where r_g is the bacterial growth rate or velocity of growth of the microorganisms (mg/L * h), X is the concentration of biomass (mg/L). When a substantial growth of microorganisms is present, their extinction can be considered negligible, during the exponential growth stage; thereby, a part of the substrate transforms into new cells and the other is oxidized (Crites, 2000 y Metcalf & Eddy, 2003) and the relationship between the degree of utilization of the substrate and the rate of growth is as follows.

$$r_g = -Y * r_{SU} = \frac{-r_g}{Y} \quad (3)$$

Where Y is the coefficient of maximum production (mass of cells produced mg and the mass of the substrate consumed mg); r_{SU} is the rate of utilization of the substrate (mg/L * h) or the quantity of contaminant eliminated. The above may be considered through the expression of Lawrence and Mc Carty (Orozco A., 2005).

$$r_{SU} = \frac{-\mu_{Max} * X * S}{Y * (K_s + S)} \quad (4)$$

The expression above can be applied to low concentrations of substrate, presenting a zero order model, in some cases, having the opportunity of changing the model to first order, if there is a high concentration of substrate in the affluent. But if $k = \frac{\mu_{Max}}{Y}$, then the following is established (Crites, 2000, Metcalf & Eddy, 2003, Eweis, 1999 and Ferrer, 2008).

$$r_{SU} = \frac{-k * S * X}{K_S + S} \quad (5)$$

Where k is the maximum rate of utilization of the substrate (h^{-1}). Another special consideration is endogenous metabolism, which represents that not all the cells of the microbial consortium are in exponential growth, reason why there should be a correction of the energy required for the expense of stabilization of the organic matter and can be expressed as follows: (Eweis, 1999 and Ferrer, 2008).

$$r_d = -k_d * X \quad (6)$$

Where r_d is the endogenous decay rate ($mg/L * h$); k_d is the coefficient of endogenous decay (h^{-1}). Consequently, the net growth rate (r_g).

$$r_g' = \frac{\mu_{Max} * X * S}{K_S + S} - k_d * X = -Y * r_{SU} - r_d \quad (7)$$

It should be clarified that these biological reaction velocity rates shall be corrected to the temperature of water to be treated (Crites, 2000 and Metcalf & Eddy, 2003), given that this is an influencing factor in the stabilization of the organic matter, which can be expressed as follows: $r_T = r_{20} * \theta^{(T-20)}$, where r_T is the rate of reaction at the indicated temperature, r_{20} is the rate of reaction at 20 °C, θ is the coefficient of activity of the temperature (if the temperature of the water is between 5 and 15 °C then θ is 1.11, but if the temperature of the water is between 15 and 30 °C then θ is 1.047 (Gil, 1998) and T is the temperature of water (°C).

Other expressions of the biological growth kinetics may be: Orozco's (2005) equation for the net rate of soluble substrate removal, with limitation of substrate, as follows:

$$\frac{-dS}{X * dT} = \frac{\frac{k_0 * S}{X}}{\frac{k_c + S}{X}} \quad (8)$$

In addition of the equations of Eckenfelder and McKinney (Eckenfelder W., 2000) for starvation, as follows: $\frac{dS}{dT} = X * k * S$ y $\frac{dS}{dT} = X * k_l * \frac{S}{X}$ respectively. On the other hand, there are equations such as that of Contonis, which is applied to growth with limited substrate and high concentrations of biomass, that is, sufficient enzymes are present for the reaction to continue without limitation and the equation is:

$$\mu = \frac{\mu_{Max} * S}{K_C * X + S'} \quad (9)$$

where K_C is Contonis' constant (Orozco, 2005). In addition to the above, there are also other expressions that were developed to describe the growth of the microorganisms and the stabilization of the substrate, as follows:

$$r_{SU} = -k; r_{SU} = -k * S, r_{SU} = -k * S * X, \\ r_{SU} = -k * X * \frac{S}{S_0}, r_{SU} = -k * \frac{S}{S_0 + K_S}$$

(Crites, 2000, Metcalf & Eddy, 2003 and Eckenfelder, 2000).

The equations above present kinetic coefficients, which can vary in accordance with the type of wastewater or liquid waste, reason why table 1 presents the optimum values and ranges for each of the kinetic coefficients shown in the aforementioned equations, according to different authors, which are applicable to the aerobic biological treatment at a water temperature of 20 °C (Orham, 1994; Mandt, 1982; Pearson, 1999; Lawrence, 1970; Mara, 1997; San, 1992; Horan, 1990; Ferrer, 2008; Droste, 1997; Rich, 1973 and Gil, 1998).

Table 1. Kinetic coefficients for aerobic systems.

| Type of Wastewater | Author | k | | K _s | | Y | | k _d | | μ _{Max} | | | |
|------------------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------------|----------|-----------------------------|----------------|----------------|---------|------------------|---------|-----------------|-----------------|
| | | d ⁻¹ | d ⁻¹ | mg/L DBO ₅ | mg/L DQO | mg SSV/ mg DBO ₅ | mg SSV/ mg DQO | Optimum | Range | Optimum | Range | d ⁻¹ | d ⁻¹ |
| | | Range | Optimum | Range | Optimum | Range | Optimum | Range | Optimum | Range | Optimum | Range | Optimum |
| Domestic | Metcalif & Eddy (2001) | 2 - 10,0 | 5 | 25 - 100 | 60 | 15 - 70 | 40 | 0,4 - 0,8 | 0,6 | 0,25 - 0,4 | 0,4 | 0,04 - 0,075 | 0,06 |
| Domestic | Orhan (1994) | 2 - 10,0 | | 25 - 100 | | 15 - 70 | | 0,4 - 0,8 | 0,6 | 0,3 - 0,6 | | 0,02 - 0,1 | |
| Domestic | Mandt (1982) | 5,6 - 26,4 | | 22 - 120 | | 15 - 70 | | 0,5 - 0,67 | | | | 0,06 - 0,07 | 3,75 - 13,2 |
| Domestic | Crites & Tchobanoglous (2000) | 2 - 10,0 | 4 | 25 - 100 | 60 | 15 - 70 | 40 | 0,4 - 0,8 | 0,6 | 0,3 - 0,6 | 0,4 | 0,02 - 0,1 | 0,055 |
| Domestic | Ferrer (2008) | | 0,2 | | | 10 | | | | | 0,6 | | 4 |
| Domestic | Droste (1997) | | | | | | | 0,4 - 0,84 | 0,6 | 0,24 - 0,4 | 0,4 | 0,04 - 0,1 | 0,06 |
| Urban | Pearson (1999) | | | 12 - 80,0 | | 43 - 223 | | 0,38 - 0,67 | | 0,31 - 0,35 | | 0,01 - 0,014 | 0,6 |
| Urban | Lawrence (1970) | | | | 100 | | 22 | 0,5 - 0,67 | | | 0,67 | 0,048 - 0,55 | 6 |
| Urban | San (1992) | | | 25 - 120 | | 22 - 60 | | 0,42 - 0,75 | | 0,4 - 0,67 | | 0,04 - 0,075 | 1,43 - 13,2 |
| Urban | Mandt (1982) | | | | | 25 - 100 | | | | 0,35 - 0,45 | | 0,05 - 0,10 | |
| Urban | Horan (1990) | | | 0,3 - 15 | | | | 0,51 - 0,66 | | | 0,56 | 0,05 - 0,08 | 1,2 - 25,2 |
| Breweries | Ferrer (2008) | | 0,3 | | | | | | | | | | 4 |
| Glucose | Lawrence (1970) | 3,0 - 3,3 | | | 355 | 0,42 - 0,59 | | | | | | 0,087 | 1,26 - 1,95 |
| Glucose | Pitter (1990) | | | 5 - 25,0 | | | | | | | | | |
| Glucose-Peptone | Lawrence (1970) | | 10,3 | | | | | | 0,49 | | | | 5,05 |
| Lactose | Pitter (1990) | | | | 20 | | | | | | | | |
| Skim Milk | Lawrence (1970) | | 5,1 | | 100 | | | 0,48 | | | | 0,045 | 2,45 |
| Slaughterhouse | Droste (1997) | | 0,67 | | | | 150 | | | 0,41 | | 0,04 | |
| Methanol | Pitter (1990) | | | 0,4 - 0,7 | | | | | | | | | 6,24 |
| Peptone | Lawrence (1970) | | 14,5 | | 65 | | | | 0,43 | | | | |
| Shrimp Processing Plant | Mandt (1982) | | | | 85,5 | | | | 0,5 | | 1,6 | | |
| Pulp and paper | Mandt (1982) | | | | | | | | 0,47 | | 0,2 | | |
| Pulp and paper | Ferrer (2008) | | 0,25 | | | | | | | 0,5 | | | 1,2 |
| Chemicals and Petrochemicals | Ferrer (2008) | | 0,25 | | | | | | | 0,5 | | | 2 |
| Refinerias | Ferrer (2008) | | 0,3 | | | | | | | 0,5 | | | 2 |
| Soft drink Waste | Mandt (1982) | | 1 | | | | 0,31 | | | 0,35 | | 0,031 | 0,35 |
| Synthetic Waste | Lawrence (1970) | | | | | | | | 0,65 | | | 0,18 | |
| Synthetic Waste | Gil (1998) | 0,31 - 5,0 | | 23 - 266 | | | | 0,31 - 0,81 | | | | 0,012 - 0,19 | |
| Soy | Droste (1997) | | 16,2 | | 355 | | | | 0,74 | | 0,14 | | |

Source: own work.

BIOLOGICAL KINETICS FOR THE REMOVAL OF NITROGEN

A large percentage of the nitrogen present in raw wastewaters is found as ammoniacal nitrogen or organic nitrogen (Metcalf & Eddy, 2003; Zalakain, 2010), which can be soluble or particulate. The biological transformation and elimination are expressed in two stages, one of *Nitrification* and the other known as *Denitrification* (Escaler, 2001).

The first stage known as *Nitrification*, where ammoniacal nitrogen is oxidized into nitrites, and these in turn into nitrates, requiring 4.57 grams of oxygen per each gram of ammoniacal nitrogen (Hatzicontantinou, 2002) and this stage generally occurs after the carbonaceous demand for oxygen is satisfied, although the oxidation of carbonaceous and nitrogenous matters may occur simultaneously. (Liu, 2000). The efficiency of the nitrification process depends on the specific velocity of nitrification (Henze, 2002), which in turn is established by the following factors: a) dissolved oxygen, b) temperature, c) pH (adequate between 7.2 and 8.5), d) the ratio DBO_5/NTK , and e) the presence of inhibitor and toxic substances (Droste, 1997; Metcalf & Eddy, 2003; Lee, 2002; Randall, 1992; Holakoo, 2005; Jenicek, 2004 and Keller, 2001). The kinetic expressions involved in this stage are given by the equation that interrelates cell growth and the elimination of ammonium, in function of the growth of autotroph organisms through the *Monod* equation (Gil, 1998; Ferrer, 2008; Metcalf & Eddy, 2003; Crites, 2000; Orozco, 2005 and EPA, 1975), both in the nitrosomonas phase and in the nitrobacter, as follows.

$$\mu = \frac{\mu_{Max} * N}{K_N + N} \quad (10)$$

Where μ is the growth rate of the microorganisms (h^{-1}), μ_{Max} is the maximum growth rate (h^{-1}), K_N is the coefficient of semi-saturation for nitrogen (mg/L) and N is the concentration of substrate (mg/L N). On the other hand, the oxidation rate of ammonium can be: $q_{Max} = \frac{\mu_{Max}}{Y_N}$. Although the

kinetics of the nitrosomonas presents the following (Park, 2008): $\frac{dN}{dT} = Y_N * \frac{dN - NH_4}{dT}$, where Y_N is the yield coefficient of nitrificand substances (mg VSS/mg N – NH_4). The nitrification process, according to the stoichiometric equations, indicates that the reaction of NH_4 to NO_2 is too slow due to the reduced velocity of the nitrosomonas to convert the NO_2 (Orozco, 2005) in comparison with the velocity of the nitrobacter, reason why the expression for the nitrification rate can be

$$\mu_N = \frac{\mu_{MaxN} * N}{K_N + N} \quad (11)$$

Where μ_N is the growth rate of the nitrosomonas (h^{-1}), μ_{Max} is the maximum growth rate (h^{-1}), K_N is the semi-saturation coefficient for nitrogen (mg/L) and N is the concentration of the substrate (mg/L N – NH_4). At the same time, the velocity of ammonium utilization can be expressed as follows: (Ferrer, 2008).

$$r_{NH} = \frac{-\mu_{MA} * S_N * X_A}{Y_A * (K_{NH} + S_N)} \quad (12)$$

Where r_{NH} is the velocity of ammonium utilization (g N – NH_4 /m³ day), μ_{MA} is the specific velocity of growth of autotroph bacteria (d^{-1}), Y_A is the maximum production coefficient (g VSS/g N – NH_4), X_A is the concentration of autotroph microorganisms (g COD/m³). The above can be expressed through the rate of growth as follows (Park J., 2008).

$$\frac{dN}{dT} = \mu_N * \frac{X_A}{Y_N} = \frac{\mu_{MaxN} * N * X_A}{Y_N * (K_N + N)} \quad (13)$$

On the other hand, endogenous respiration during nitrification can be expressed as follows (Park, 2008), very similar to endogenous respiration of the organic matter.

$$\frac{dN}{dT} = -b_N * X_A \quad (14)$$

Where b_N is the coefficient of endogenous decay by nitrosomonas (d^{-1}), in some cases may be at 20 °C and take a value between 0.04 a 0.24 d^{-1} . Also the specific rate of nitrification can be (Park, 2008): $K = \frac{K_M * N}{K_N + N}$, where K is the specific rate of

nitrification (mg N/mg VSS day), N is the concentration of nitrogen (mg N – NH₄/L) which can be between 0 and 70 mg/L; K_M is the ratio μ_{MaxN}/Y_N , where Y_N can be 0.05 and 0.10 mg VSS/mg N and μ_{MaxN} can be between 0.30 and 0.65 d⁻¹. Within the factors influencing nitrification there can be corrections for water temperature, pH, DBO₅/TKN, oxygen dissolved at the job site, as follows (Park, 2008; Metcalf & Eddy, 2003; Crites, 2000 and EPA, 1975).

Adjustments for water temperature:

$$\mu_{\text{MaxNt}} = \mu_{\text{MaxN}20^\circ\text{C}} * 1.123^{(T_W-20)} \quad (15)$$

$$\mu_{\text{Nt}} = \mu_{\text{MaxN}20^\circ\text{C}} * e^{0.098*(T_W-15)} \quad (16)$$

$$\mu_{\text{Nt}} = 0.47 * e^{0.098*(T_W-15)} \quad (17)$$

$$K_{\text{Nt}} = K_{\text{N}20^\circ\text{C}} * 1.123^{(T_W-20)} \quad (18)$$

$$K_{\text{Nt}} = 10^{0.051*(T_W-1.158)} \quad (19)$$

$$b_{\text{Nt}} = b_{\text{N}20^\circ\text{C}} * 1.029^{(T_W-20)} \quad (20)$$

Adjustments for the pH of water, where it was observed that the maximum nitrification rate occurs at pH values ranging from 7.2 to 9.0, and the general application can be:

$$\mu_N = \mu_{\text{MaxN}} * (1 - 0.833 * (7.2 - \text{pH})) \quad (21)$$

For 7.2 < pH < 8.5

EPA Method:

$$\mu_{\text{Nt}} = \mu_{\text{MaxN}20^\circ\text{C}} * e^{0.098*(T_W-15)} * \left[\frac{OD}{K_{OD} + OD} \right] * (1 - 0.833 * (7.2 - \text{pH})) \quad (28)$$

If pH < 7.2 for nitrosomonas is valid temperatures between 8 and 30 °C:

$$\mu_{\text{Nt}} = 0.47 * e^{0.098*(T_W-15)} * \left[\frac{OD}{K_{OD}+OD} \right] * (1 - 0.833 * (7.2 - \text{pH})) * \left(\frac{N}{N+10^{(0.051*T-1.158)}} \right) \quad (29)$$

South African Method:

If the pH < 7.2

$$\mu_{\text{Nt}} = \mu_{\text{MaxN}20^\circ\text{C}} * 1.123^{(T_W-20)} * 2.35^{(\text{pH}-7.2)} * \left[\frac{OD}{K_{OD} + OD} \right] \quad (30)$$

$$\mu_{\text{MaxpH}} = \mu_{\text{NpH}7.2} \quad (22)$$

$$K_{\text{NpH}} = K_{\text{NpH}7.2} \quad (23)$$

For 5.0 < pH < 7.2

$$\mu_{\text{MaxpH}} = \mu_{\text{NpH}7.2} * 2.35^{(\text{pH}-7.2)} \quad (24)$$

$$K_{\text{NpH}} = K_{\text{NpH}7.2} * 2.35^{(7.2-\text{pH})} \quad (25)$$

Where $\mu_{\text{NpH}7.2}$ can be 0.33 d⁻¹, K_{NpH7.2} can be 1.0 d⁻¹. The adjustments for the concentration of dissolved oxygen, which affects the specific velocity of growth of the nitrificant organisms, and the expression can be:

$$\mu_{\text{NOD}} = \frac{\mu_{\text{MaxN}} * OD}{K_{OD} + OD} \quad (26)$$

Where T_w is the temperature of water (°C), DO is the concentration of oxygen dissolved in the water (mg/L) and whose minimum concentration should be 2 mg/L, K_{OD} is the constant of medium saturation (mg/L) which can be between 0.3 and 2 mg/L. And the adjustments for the ratio DBO₅/TKN, is due to the presence of a fraction of nitrificant organisms present in the liquor mixed and that can be expressed as follows:

$$F_N = \frac{0.16 * N}{0.6 * (DBO_5) + 0.16 * N} \quad (27)$$

Even though there are equations that interrelate the aforementioned factors, such as:

If the pH is between 7.2 and 8.5

$$\mu_{Nt} = \mu_{MaxN20^{\circ}C} \quad (31)$$

On the other hand, the growth rate for heterotrophic organisms in the nitrification can be (EPA, 1975).

$$\mu_b = \frac{1}{\theta_c^d} = Y_b * q_b - b_N \quad (32)$$

Where μ_b is the growth rate of heterotrophic organisms (h^{-1}), q_b is the removed substrate rate (mg BOD/ mg VSS day), Y_b is the coefficient of heterotrophic organisms (mg VSS/mg BOD), θ_c^d is the time of retention of solids (days), which can be :

$$\theta = \frac{1}{\mu_N} \quad (33)$$

The above expresses that $\mu_N > \mu_b$ if the condition is that the pH and the DO do not have a limiting growth rate in the nitrification.

Just as there are biological kinetic coefficients for the stabilization of organic matter, there are also kinetic coefficients for nitrification; these are presented in table 2, which shows the optimum values and recommended ranges according to different authors, which are applicable to the aerobic biological treatment at a water temperature of 20 °C (Metcalf & Eddy, 2003; Crites, 2000; Ferrer, 2008; Orozco, 2005 and EPA, 1975).

The second stage is *Denitrification*, during which, nitrates are reduced to gaseous nitrogen, which is released into the atmosphere. To carry out this process, the organisms need a source of organic carbon, which can be the organic matter contained in the wastewater (organic compounds contained in raw wastewater) or applied externally such as methanol (easily biodegradable and that is the reason for a higher denitrification velocity) or as endogenous carbon source (it is a much slower process). The efficiency of the denitrification process depends on several factors: a) the dissolved oxygen, b) the carbon source used, c) the concentration of nitrites, d) the temperature, e) the pH and f) the presence of inhibitor and toxic substances (Droste, 1997; Metcalf & Eddy, 2003 and Randall, 1992).

It is important to establish that this process contains a high presence of carbon, on that basis, an expression can be related as follows (Pérez, 2007):

$$\frac{DQO}{N_{NO_3}} = \frac{2.867}{1 - (1.134 * Y_{NET})} \quad (34)$$

where N – NO₃ is the concentration of nitrate available (mg/L), Y_{NET} is the yield of the biomass according to COD (mg VSS/mg COD), COD in mg/L, and these variables assumes that the COD and the VSS produced are 1.42 g COD/g VSS and that the biomass contains approximately 10% nitrogen. In the denitrification reactions, the elimination of NO₃ is much slower (Pérez J., 2007), therefore

Table 2. Kinetic coefficients for nitrificant aerobic systems.

| Type of Wastewater | Author | μ_{MaxN} | μ_{MaxN} | K_N | K_N | Y_N | Y_N | b_N | b_N |
|--------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|
| | | d ⁻¹ | d ⁻¹ | mg/L N -NH ₄ | mg/L N -NH ₅ | mg SSV/ mg N -NH ₄ | mg SSV/ mg N -NH ₄ | d ⁻¹ | d ⁻¹ |
| | | Range | Optimum | Range | Optimum | Range | Optimum | Range | Optimum |
| Domestic | Metcalf & Eddy (2003) | 0,3 - 3,0 | 1 | 0,2 - 5,0 | 1,4 | 0,1 - 0,3 | 0,2 | 0,03 - 0,06 | 0,05 |
| Domestic | Crites & Tchobanoglous (2000) | 0,4 - 2,0 | 0,9 | 0,2 - 3,0 | 0,5 | 0,1 - 0,3 | 0,16 | 0,03 - 0,06 | 0,04 |
| Domestic | Ferrer (2008) | | | | 1 | | 0,24 | | |
| Domestic | Park (2008) | 0,3 - 0,65 | 0,33 | | 1 | 0,05 - 0,1 | 0,1 | 0,04 - 0,24 | |
| Domestic | Orozco (2005) | 0,48 - 0,71 | | 0,08 - 1,0 | 0,405 | 0,15 - 0,6 | 0,6 | 0,02 - 0,03 | 0,02 |
| Domestic | EPA (1975) | 0,25 - 1,44 | | 0,5 - 1,0 | | | 0,15 | | |

Source: own work.

the equation is expressed as follows (Park, 2008): $\frac{dN}{dT} = K_{DN} * X$, where N is the concentration of nitrates (mg/L), K_{DN} is the specific denitrification constant (mg N/mg VSS day); but is also expressed as follows, since it is an expression of *Monod* (Pérez J., 2007; Metcalf & Eddy, 2003; Crites, 2000 and EPA, 1975), in which the velocity of growth of the denitrificand microorganisms is related to the concentration of nitrate, as follows:

$$\mu_{DN} = \mu_{MaxDN} * \frac{N_{NO}}{K_{NO} + N_{NO}} \quad (35)$$

Where μ_{DN} is the specific velocity of growth of the denitrificand microorganisms (d^{-1}), μ_{MaxDN} the maximum velocity of specific growth of the denitrificand microorganisms, (d^{-1}). N_{NO} is the concentration of N- NO_3 (mg/L) and K_{NO} : constant of semi-saturation for denitrification (mg/L), the usual values are between 0.1 and 0.2 mg/L. The aforementioned expression can be transformed in order zero, if K_{NO} is much smaller than N_{NO} . The velocity of growth of the denitrificand microorganisms is very similar to that of aerobe heterotroph organisms; therefore, greater than the nitrificands. Additionally, it can be expressed (EPA, 1975):

$$q_{DN} = \frac{\mu_{DN}}{Y_{DN}} \quad (36)$$

where q_{DN} is the nitrate removal rate (mg N - NO_3 /mg VSS day), Y_{DN} is the gross yield of the denitrification (mg VSS/mg N - NO_3). Consequently, the velocity of nitrate decrease present in the system can be related to the specific growth velocity of the microorganisms, and its expression can be (Ferrer, 2008):

$$\mu_{DN} = 4 * 1.072^{(T_w-20)} * \frac{N_{NO}}{0.1 + N_{NO}} \quad (37)$$

It is also important to mention that the expression for the gross yield of denitrification can be (EPA, 1975):

$$Y_{DN}^{MAX} = \frac{Y_{DN} * q_{DN} - K_d}{q_{DN}} \quad (38)$$

where Y_{DN}^{MAX} is the maximum rate of denitrification (mg VSS/ mg N - NO_3), k_d is the coefficient of decay (d^{-1}). In addition, there is an effect on the concentration of carbon according to the Monod type, which affects the velocity of nitrate removal, given the source of carbon, accordingly, the concentration of nitrate as well as the concentration of organic substrate (carbon), limit the velocity of nitrification, and on this basis it is expressed as follows (Metcalf & Eddy, 2003 and Crites, 2000):

$$\mu_{DN} = \mu_{MaxDN} * \frac{C}{K_C + C} \quad (39)$$

Where μ_{DN} is the specific velocity of growth of the denitrificand microorganisms (d^{-1}), μ_{MaxDN} the maximum velocity of the specific growth of the denitrificand microorganisms, (d^{-1}). C is the concentration of carbon or organic substrate (mg/L) and K_C : the constant of semi-saturation for the carbon source (mg/L), it presents very low values in comparison with the organic matter represented as BOD or COD, therefore, the usual value is 0.1 mg/L. Then, for the denitrification process to take place, a combination of reactions can be made, of both, nitrate as well as organic substrate (methanol in some cases as carbon source), as follows:

$$\mu_{DN} = \mu_{MaxDN} * \left(\frac{C}{K_C + C}\right) * \left(\frac{N_{NO}}{K_{NO} + N_{NO}}\right) \quad (40)$$

In some cases, K_{NO} can be low, indicating that concentrations between 1 and 2 mg/L N - NO_3 present very little effect on the velocity of denitrification. This constant can have corrections for water temperature as follows (Park J., 2008): $K_{NOt} = 0.72 * 1.20^{(T_w-20)}$, but if the temperature of water is below 13 °C, then the equation is: $K_{NOt} = 0.1008 * 1.08^{(T_w-20)}$.

Just as there are biological kinetic coefficients for nitrification, there are also kinetic coefficients for denitrification, which are presented in table 3, which shows the optimum values and recommended ranges according to several authors, and which are applicable in the aerobic biological treatment

at a water temperature of 20 °C (EPA, 1975; Metcalf & Eddy, 2003 and Park, 2008).

ELEMENTS OF THEORETIC SIMILITUDE IN THE KINETICS OF BIOLOGICAL GROWTH

One of the elements of similitude in the kinetics of biological growth, for the stabilization of organic matter, the nitrification and the denitrification is the consideration of utilizing growth rates for conditions of limiting substrate, in this way this growth is present according to the concentration which can be expressed mathematically through the Monod equation, as a common denominator, but it is worth highlighting that when these equations are used with high concentrations or concentrations above normal for the substrate, the progress of the expression may have growth limitations, creating barriers to the biodegradability reactions in

nitrification and denitrification conditions, but in a different condition for organic substrates, carbonaceous organic matter and even dissolved oxygen. Table 4 shows the similitude in the equations using the *Monod* expression, additionally, the same tendency is observed in the temperature correction for each biological kinetic.

Another element of similitude is the high dependency of water temperature, pH, nutrients and the type of microbial consortium present, on each of the biological kinetics equations for organic matter, nitrification and denitrification, as well as a correction given for the energy required for the stabilization expense of organic matter, nitrification and denitrification, which is known as endogenous decay. In terms of kinetic coefficients for organic matter, nitrification and denitrification, great concordance is observed in the values among themselves, in spite of the variation of liquid waste in some cases, and in others the testing conditions.

Table 3. Kinetic coefficients for denitrificant aerobic systems.

| Type of Wastewater | Author | μ_{MaxN} | μ_{MaxN} | K_{NO} | K_{NO} | Y_{DN} | Y_{DN} | k_d | k_d |
|--------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------|-----------------|
| | | d ⁻¹ | d ⁻¹ | mg/L N -NO ₃ | mg/L N -NO ₃ | mg SSV/mg N -NO ₃ | mg SSV/mg N -NO ₃ | d ⁻¹ | d ⁻¹ |
| | | Range | Optimum | Range | Optimum | Range | Optimum | Range | Optimum |
| Domestic | Metcalf & Eddy (2003) | 0,3 - 0,9 | 0,3 | 0,06 - 0,2 | 0,1 | 0,4 - 0,9 | 0,8 | 0,04 - 0,08 | 0,04 |
| Domestic | EPA (1975) | 0,16 - 0,9 | | 0,06 - 0,16 | | 0,45 - 1,4 | | 0,02 - 0,10 | |
| Domestic | Park (2008) | | 0,36 | 0,072 - 0,72 | | | 0,45 | | 0,04 |

Source: own work.

Table 4. Similitudes of the biological kinetics

| Type of biological kinetic | Specific growth rate | Adjustment for water temperature |
|----------------------------|---|---|
| Monod – Organic Matter | $\mu = \frac{\mu_{Max} * S}{K_s + S}$ | $\mu_T = \mu_{20} * \theta^{(T-20)}$ |
| Monod – Nitrification | $\mu = \frac{\mu_{Max} * N}{K_N + N}$ | $\mu_{Nt} = \mu_{MaxN20°C} * e^{0.098*(T_W-15)}$ |
| Monod – Denitrification | $\mu_{DN} = \frac{\mu_{MaxDN} * N_{NO}}{K_{NO} + N_{NO}}$ | $\mu_{DN} = 4 * 1.072^{(T_W-20)} * \frac{N_{NO}}{0.1 + N_{NO}}$ |

Source: own work.

CONCLUSIONS

In general, it can be expressed that the theoretical elements of similitude between the biological kinetics for organic matter, nitrification and denitrification, build fundamental and concise considerations for the dimensioning process of wastewater treatment systems, in which they are a solid and explanatory base of the processes involved in the conversion of the substrate into another element or byproduct as a result of the biological activity. That is, the study of kinetics determines the velocity, at which the microorganisms degrade a specific residue to the special conditions of the treatment, which provides the basic information necessary to determine the adequate size of the aerobic, anaerobic or hybrids biological reactors, namely, the design of the wastewater treatment systems.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to thank the Universidad Distrital Francisco José de Caldas and in particular the Engineering PHD Program for their support in the preparation of this document. Likewise, the authors express their gratitude to tenured professor Vidal Fernando Peñaranda Galvis of the Environmental and Natural Resources Faculty of the Universidad Distrital Francisco José de Caldas, for his review of this document.

REFERENCES

- APHA.(1989). Standard methods for the examination of water and wastewater. Washington: AWWA - WEF.
- Chiavola A. (2014). Biological treatment of olive mill wastewater in a sequencing batch reactor. *Biochemical Engineering Journal*, 71 - 78.
- Cosenza A. (2014). Variance-based sensitivity analysis for wastewater treatment plant modelling. *Science of the Total Environment*, 1068–1077.
- Crites R. (2000). Small and decentralized wastewater management systems. New York: McGraw Hill.
- Crittenden J. (2005). Water treatment: principles and design. Second edition. USA: Wiley & sons INC.
- Droste R. (1997). Theory and practice of water and wastewater treatment. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Eckenfelder W. (2000). Industrial water pollution control. New York: McGraw Hill.
- Eldyasti A. (2012). Development of a calibration protocol and identification of the most sensitive parameters for the particulate biofilm models used in biological wastewater treatment. *Bioresource Technology*, 111 - 121.
- EPA.(1975). Process design manual for nitrogen control. Chapter 3. USA: EPA.
- Escaler M.I. (2001). Eliminación bioógica de nutrientes (nitrógeno y fósforo) mediante un proceso discontinuo de fangos activados. *Tecnología del agua.*, 67 - 77.
- Eweis J. (1999). Bioremediation principles. New York: Mc Graw Hill.
- Ferrer J. (2008). Tratamiento biológicos de aguas residuales. Valencia: Universidad politécnica de valencia.
- Gil M. (2005). Procesos de descontaminación de aguas. *Cálculos avanzados informáticos.* . Madrid: Thompson.
- Gil Rodríguez M. (1998). Modelo dinámico del proceso secundario de depuración de aguas residuales urbanas. *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño de ingeniería.*, 525 - 538.
- Günay A. (2013). Determination of aerobic biodegradation kinetics of olive oil mill wastewater. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 237 - 242.
- Hatzicontantinou G. (2002). Differences in nitrification potential between fully aerobic and nitrogen removal activated sludge systems. *Water science and technology*, 297 - 304.
- Henze M. (2002). Effect of solid retention time and wastewater characteristics on biological phosphorus removal. *Water science and technology*, 137 - 144.
- Holakoo L. (2005). Simultaneous nitrogen and phosphorus removal in a continuously fed and aerated membrana bioreactor. *Journal of environmental engineering ASCE*, 1469 - 1472.
- Horan N.J. (1990). Biological Wastewater Treatment Systems. Chichester UK: Systems Wiley.

- Jenicek P. (2004). Factors affecting nitrogen removal by nitrification/denitrification. *Water science and technology*, 73 - 79.
- Keller J. (2001). Full scale demonstration of biological nutrient removal in a single tank SBR process. *Water science and technology*, 355 - 362.
- Krzeminski P. (2012). Impact of temperature on raw wastewater composition and activated sludge filterability in full-scale MBR systems for municipal sewage treatment. *Journal of Membrane Science*, 348 - 361.
- Lawrence A.W. (1970). *Unified basis for biological treatment. Design and operation*. USA: ASCE.
- Lee N. (2002). Population dynamic in wastewater treatment plants with enhanced biological phosphorous removal operated with and without nitrogen removal. *Water science and technology*, 163 - 170.
- Liu D. (2000). *Wastewater treatment*. USA: Lewis publishers.
- Mandt M.G. (1982). *Oxidation ditches in wastewater treatment*. USA: Ann arbor science.
- Manser R. (2006). Decay processes of nitrifying bacteria in biological wastewater treatment systems. *WATER RESEARCH*, 2416 - 2426.
- Mara D. (1997). *Design manual for waste stabilization ponds in india*. Leeds: University of Leeds.
- Metcalf & Eddy. (2003). *Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse*. 4 edition. New York: Mc Graw Hill.
- Nodal E. (2001). Procesos biológicos aplicados al tratamiento de aguas residuales. *Ingeniería hidráulica y ambiental*, 52 - 56.
- Orhan U. (1994). *Wastewater management for Istanbul: Basis for treatment and disposal*. USA: Environmental Pollution.
- Orozo A. (2005). *Bioingeniería de aguas residuales. Teoría y diseño*. Bogotá: ACODAL.
- Park J. (2008). *Biological nutrient removal. Theories and design*. Winconsin: Madisson.
- Pearson H.W. (1999). A hybrid waste stabilization pond and wastewater storage and treatment reservoir system for wastewater reuse for both restricted and unrestricted crop irrigation. *Water Research*, 591 - 594.
- Pérez J. (2007). Variantes de procesos de nitrificación denitrificación para un sistema de biomasa en suspensión para el tratamiento de aguas residuales. *Ingeniería hidráulica y ambiental*, 57 - 64.
- Pomiès M. (2013). Modelling of micropollutant removal in biological wastewater treatments: A review. *Science of the Total Environment*, 733-748.
- Randall C. (1992). *Design and retrofit of wastewater treatment plants for biological nutrient removal*. USA: Technomic publishing CO inc.
- Rich L.G. (1973). *Environmental systems engineering*. USA: Mc Graw Hill.
- Rodríguez J.P. (2012). Assessment of an aerobic treatment system for. *Int. J. Environmental Engineering*, 307 - 314.
- Rodríguez J.P. (2013). Diseño y evaluación de un sedimentador SEDHELCON y reactor biológico aeróbico FLORICARRFP en planta piloto para tratamiento de aguas residuales. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de caldas.
- Romero J. (2004). *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Sabia G. (2013). Effect of solid retention time on sludge filterability and biomass activity: Long-term experiment on a pilot-scale membrane bioreactor treating municipal wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 176 - 184.
- San A. H. (1992). Mechanism of Biological Treatment in Plug-Flow or Batch Systems. *Journal of Environmental Engineering*, 614 - 628.
- Zalakain G. (2010). Ampliación de la capacidad de los tratamientos biológicos de fangos activos empleando soporte móviles para la eliminación de nutrientes. *RETEMA*, 20 - 27.





Los residuos de la construcción y demolición en la ciudad de Cali: un análisis hacia su gestión, manejo y aprovechamiento

Construction and demolition wastes: analysis of its management and reuse in Cali

Rafael Andres Robayo Salazar*, Pedro Enrique Matthey Centeno**,
Yimmy Fernando Silva Urrego***, Diana Marcela Burgos Galindo****, Silvio Delvasto Arjona*****

Fecha de recepción: 7 de noviembre de 2013

Fecha de aceptación: 5 de diciembre de 2014

Citation / Para citar este artículo: Robayo Salazar, R. A., Matthey Centeno, P. E., Silva Urrego, Y. F., Burgos Galindo, D. M., & Delvasto Arjona, S. (2015). Los residuos de la construcción y demolición en la ciudad de Cali: un análisis hacia su gestión, manejo y aprovechamiento. *Revista Tecnura*, 19(44), 157-170 doi:<http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.2.a12>

Resumen

El número de obras de construcción, remodelación y demolición en las ciudades colombianas aumenta de manera constante como consecuencia del crecimiento y desarrollo socioeconómico de la población urbana. Sin embargo, estas prácticas generan grandes volúmenes de residuos que en la actualidad se han convertido en un problema de contaminación ambiental en ciudades como Cali (Colombia). La búsqueda de soluciones integrales que permitan un adecuado manejo, gestión y aprovechamiento de los diferentes materiales que componen los residuos de la construcción y demolición (RC&D) era impensable hace algunas décadas. No obstante, hoy día es un desafío apremiante para los diferentes sectores de la sociedad que deben encaminar esfuerzos para encontrar soluciones. En este sentido, este artículo de revisión presenta un análisis sobre la situación actual alrededor de este tema

en la ciudad mencionada y propone la generación de acciones de acuerdo con las oportunidades y retos necesarios para alcanzar una gestión total de los RC&D. El análisis de esta problemática podría ayudar a orientar futuras investigaciones sobre el tema, además de promover su prioridad en la agenda pública, generando así las condiciones necesarias para que la actividad del reciclaje de los RC&D se convierta en una posibilidad viable en las ciudades colombianas a partir de la experiencia obtenida.

Palabras clave: aprovechamiento, gestión de los RC&D, materiales de construcción, residuos de la construcción y demolición (RC&D).

Abstract

The amount of construction, remodeling and demolition activities in the Colombian cities increases constantly due to growth and economic development of

* Ingeniero de Materiales, estudiante de doctorado en Ingeniería con énfasis en Ingeniería de los Materiales. Universidad del Valle, Cali, Colombia. Contacto: rafael.robayo@correounivalle.edu.co

** Ingeniero Metalúrgico, magíster en Ingeniería de los Materiales, estudiante de doctorado en Ingeniería con énfasis en Ingeniería de los Materiales. Universidad del Valle, Cali, Colombia. Contacto: pedromatthey@gmail.com

*** Ingeniero de Materiales, estudiante de maestría en Ingeniería de los Materiales. Universidad del Valle, Cali, Colombia. Contacto: yimmy.silva@correounivalle.edu.co

**** Ingeniero de Materiales, estudiante de doctorado en Ingeniería con énfasis en Ingeniería de los Materiales. Universidad del Valle, Cali, Colombia. Contacto: diana.burgos@correounivalle.edu.co

***** Ingeniero químico, magíster en Ingeniería Civil y Gestión de Materiales, doctor en Ingeniería de Nuevos Materiales y sus tecnologías de fabricación, profesor titular de la Universidad del Valle. Cali, Colombia. Contacto: silvio.delvasto@correounivalle.edu.co

the urban population. However, these practices create big quantities of debris that have currently become an environmental problem in cities such as Cali (Colombia). The search for integral solutions that allow for an adequate management and reuse of the different materials that form construction and demolition debris was unthinkable some decades ago. Nonetheless, nowadays it is an urgent challenge for different sectors in the society that must join efforts to find solutions. Regarding this, the present article shows an analysis about the currently situation of the construction debris

management in the aforementioned city and proposes different actions according to the necessary opportunities and challenges to achieve an integral management and reuse of these materials. The analysis of this topic could be a guide for future research, as well as promote its priority in the public agenda, creating the necessary conditions for the recycling process of the construction and demolition wastes to become a viable possibility in the Colombian cities through the obtained experience.

Keywords: construction materials, construction waste, demolition waste, management and recycling.

INTRODUCCIÓN

Los residuos de la construcción y demolición (RC&D) o escombros como son llamados en algunos países latinoamericanos, son en general materiales de desecho generados durante la ejecución de un proyecto de obra civil; incluyendo estructuras y materiales rechazados, materiales que han sido descartados, materiales que han sido utilizados y se han deteriorado, e incluso aquellos derivados de actividades de excavación y limpieza del lugar al finalizar la obra, entre otros (Torgal & Jალი, 2011) (Oikonomou, 2005) (Poon & Chan, 2007) (Lin *et al.*, 2004) (Limbachiya *et al.*, 2004) (Adam & Kurama, 2013).

Actualmente en la ciudad de Santiago de Cali se producen cerca de 2480 metros cúbicos de estos residuos por día, cifra que en un año logra alcanzar un millón de metros cúbicos; esto de acuerdo con el número de habitantes llega a ser 0,5 metros cúbicos de RC&D por persona, índice que resulta alarmante y sitúa a la mencionada ciudad en el segundo puesto de las capitales colombianas con mayor generación de escombros, superada por la capital del país, Bogotá, que con un promedio de 12 millones de toneladas de RC&D al año ocupa el primer lugar a nivel nacional (Castaño *et al.*, 2013). Por esta razón la municipalidad en los últimos años ha optado por buscar soluciones integrales que permitan mitigar la problemática social y

ambiental derivada de la alta generación de RC&D originada por el desarrollo urbanístico de los últimos años (DAGMA, 2011). Todas estas alternativas orientadas a lograr una adecuada gestión y manejo de estos residuos que lleve al aprovechamiento sostenible de gran parte del volumen que actualmente se genera en la ciudad.

Este artículo muestra la situación actual de la ciudad de Santiago de Cali en torno a los RC&D y analiza las deficiencias que presentan los procesos actuales de manejo y gestión de estos residuos. Con base en lo anterior, este artículo propone acciones que lleven a poner en marcha un proceso estandarizado que permita el reciclaje de los RC&D, avalado por normas técnicas y una legislación que asegure su sostenibilidad.

ANTECEDENTES

La construcción es una de las actividades industriales con mayor demanda en Colombia, que se consolida por su gran dinamismo como uno de los sectores más importantes y de mayor incidencia en el desarrollo económico del país. Sin embargo, una de las consecuencias que se derivan de esta actividad es la generación de volúmenes considerables de RC&D. En la actualidad, Colombia cuenta con desarrollo legislativo enmarcado en la "Política Nacional para la Gestión de Residuos Sólidos" que establecen los parámetros mínimos que

se deben llevar a cabo para un adecuado manejo y gestión de los residuos sólidos y RC&D en el territorio nacional; como es el caso de la Resolución 541 de 1994 y la Ley 1259 de 2008 (Congreso de la República, 2008). Sin embargo, muchas de estas leyes han sido formuladas aprovechando la legislación de otras naciones más desarrolladas y su aplicación en el territorio nacional ha resultado infructuosa en razón de las diferencias existentes, como, por ejemplo, la cultura ambiental de sus habitantes (Hincapié & Aguja, 2003).

Adicionalmente cada municipio ha desarrollado su propio marco legal para la gestión y en algunos casos el aprovechamiento de los RC&D. En Bogotá, por ejemplo, la implementación de la Resolución No. 2397 de 2011 de la Secretaría Distrital de Ambiente permite la regulación técnica del tratamiento y/o aprovechamiento de los escombros en el distrito capital, y establece que a partir del año 2012 las entidades que desarrollen obras de infraestructura en la ciudad deberán incluir la utilización de materiales y elementos elaborados a partir del reciclaje de RC&D en un porcentaje no inferior a 10% del total de metros cuadrados construidos para las entidades públicas y 5% para las entidades privadas. Además se establece que cada año dicho porcentaje aumentará en 5% hasta alcanzar un mínimo de 25% (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2011).

En Medellín, la aprobación del "Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos" (PGIRS, Acuerdo 062 de 2009) estableció una política pública para la gestión de los RC&D generados en la capital de Antioquia; sin embargo, un proyecto de reglamentación de este Acuerdo Municipal tiene como objetivo el incluir un sistema de aprovechamiento similar al propuesto en Bogotá mediante la Resolución No. 2397 de 2011, para el cual se propone el uso en obras civiles de un porcentaje no inferior a 5% en elementos no estructurales elaborados con materiales obtenidos a partir de RC&D, además del aumento anual de 2% hasta llegar a un máximo de 15% (Consejo de Medellín, 2009) (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2012) (Alcaldía

Mayor de Bogotá, 2011) (Alcaldía de Santiago de Cali, 2012).

Por otro lado, en el caso de estudio el Decreto Municipal No. 0291 de 2005 regula la gestión integral de los RC&D y contiene las herramientas necesarias para que la Municipalidad adelante un buen manejo y regulación de estos residuos, incluyendo su generación, recolección, transporte, transferencia, aprovechamiento y disposición final. Así mismo establece, según el Artículo 59 del mencionado decreto, la creación del Comité Municipal de Escombros, como un espacio interinstitucional e intersectorial articulador de las acciones que desarrollen en el Municipio en esta temática (Alcaldía de Santiago de Cali, 2005) (DAGMA, 2012). En la figura 1 se presentan los antecedentes del marco jurídico del manejo de los RC&D en la ciudad de Cali; se puede observar que la mayoría de disposiciones tienen como finalidad la regulación del manejo de los RC&D desde su generación hasta su disposición final (Congreso de Colombia, 2000) (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2002) (Congreso de Colombia, 2002) (Alcaldía de Santiago de Cali, 2004) (Alcaldía de Santiago de Cali, 2009).

Además de la legislación propia del país y el Municipio creada para la gestión de los RC&D, diferentes sectores de la sociedad, incluyendo la academia, han desarrollado numerosas propuestas tecnológicas de aprovechamiento que aprueban la reutilización sostenible de los RC&D en nuevos materiales de construcción con excelentes resultados. No obstante, la mayoría de estos esfuerzos resultan infructuosos y no trascienden debido principalmente a que en Colombia no existen normas técnicas basadas en estudios científicos que especifiquen, regulen y avalen la reutilización de los RC&D en diferentes sectores de la industria de la construcción, lo cual fue verificado por los autores en diversas fuentes de información. Y que a su vez brinden la suficiente seguridad al consumidor, que a partir de estos materiales se puedan desarrollar productos de excelente calidad y durables a través del tiempo.

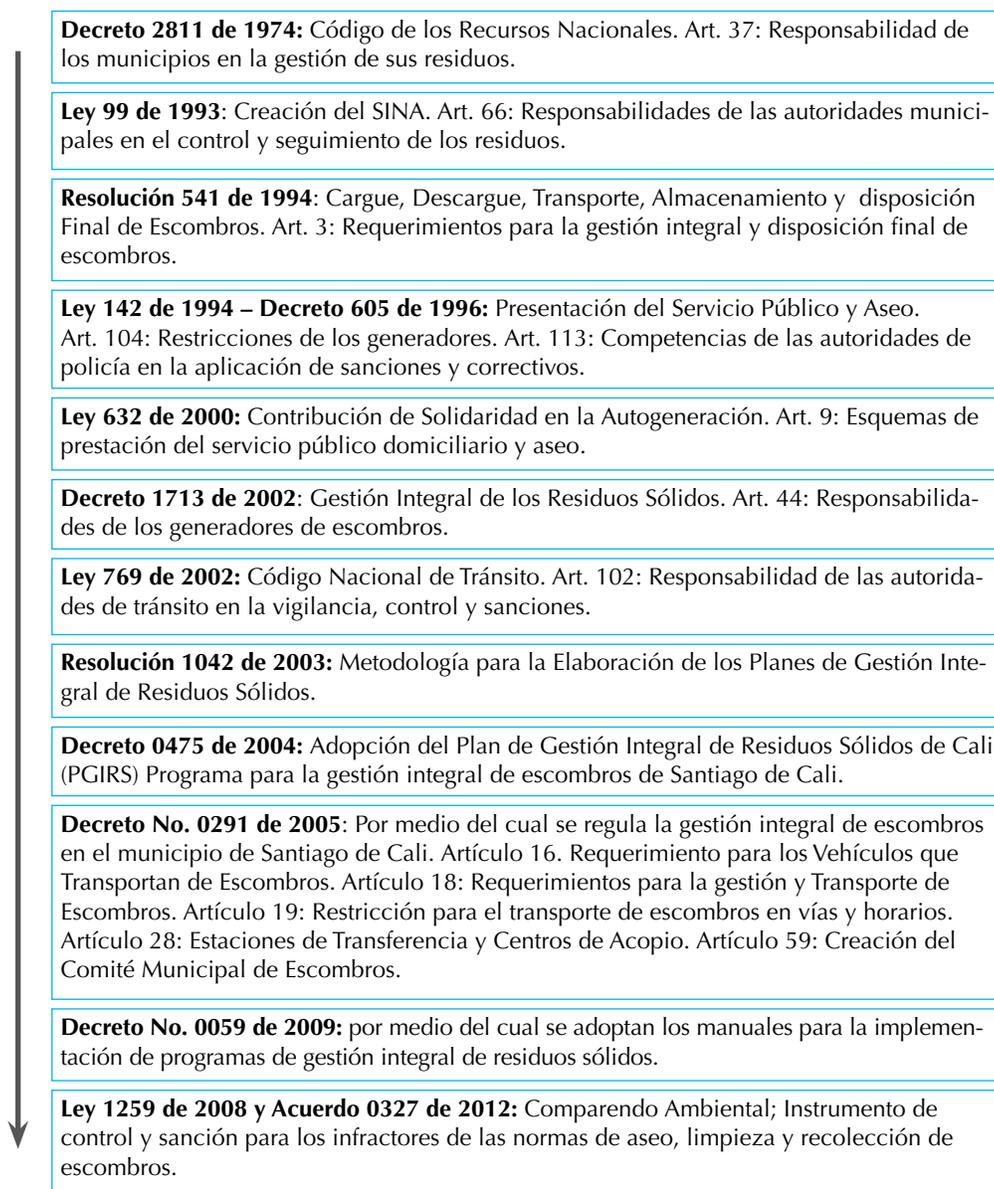


Figura 1. Antecedentes del marco normativo para el manejo de RC&D en la ciudad de Cali.

Fuente: elaboración propia.

DIAGNÓSTICO DE LA PROBLEMÁTICA ACTUAL DE LOS RC&D EN COLOMBIA

Actualmente en Colombia la gestión de los RC&D tiene como desenlace el vertimiento de estos residuos en escombreras, manejo que en contadas ocasiones es controlado; sin embargo, la disposición de estos residuos en sitios no autorizados

es hoy día una práctica muy frecuente en la mayoría de las ciudades colombianas, siendo hasta ahora la opción más sencilla de desechar estos residuos; no obstante, esta resulta ser una opción cíclica, económicamente inviable, no definitiva y con mayor impacto ambiental, pues el inminente agotamiento de los vertederos hace necesaria la búsqueda constante de nuevos lugares para la

disposición de estos residuos. Unido a esto, la escasez de cualquier alternativa de aprovechamiento que esté avalada técnicamente hace que el manejo de los RC&D resulte totalmente ineficiente, ya que en la actualidad estos no representan valor productivo alguno para la sociedad y se convierten en una problemática ambiental y social por su difícil manejo (Serrano & Ferreira, 2009).

Uno de los ejemplos que mejor ilustran esta problemática es el de la ciudad de Bogotá, en donde según la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos (UAESP) se producen cerca de 12 millones de toneladas de RC&D al año, de las cuales solo 333.000 toneladas tienen un manejo adecuado por parte de la UAESP, el resto presentan un manejo que es considerado ilegal, al ser vertidas de manera no controlada en alrededor de 94 sitios no autorizados, causando problemas sanitarios y ambientales a la ciudad; de ahí que la generación e implementación de leyes dirigidas a la regulación de los RC&D, como la Resolución No. 2397 de 2011, sea una prioridad en la gestión pública de la ciudad (*El Tiempo*, 2013) (Castaño *et al.*, 2013) (UAESP, 2012) (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2012) (*El Tiempo*, 2012).

Por otra parte, en Medellín los desechos resultantes de las actividades de construcción alcanzan una cifra cercana a 2.400 metros cúbicos; por esta razón la administración municipal, por medio de las Empresas Varias, ha implementado acciones como la recolección domiciliaria de los RC&D para promover el manejo adecuado de estos residuos. Además, continúa en la búsqueda de nuevos centros de acopio temporal para los mismos, así como la intención de poner en marcha todo un programa de aprovechamiento de los RC&D recolectados de manera formal en la ciudad con base en el PGIRS aprobado mediante el Acuerdo Municipal del Concejo de Medellín No. 062 de 2009 (Bedoya & Gonzales, 2003) (Hincapié & Aguja, 2003).

En general, la problemática de los RC&D en las diferentes ciudades colombianas es muy similar; sin embargo, este comportamiento está en función del número de sus habitantes, siendo más crítico en ciudades que superan 2 millones de habitantes,

como Bogotá, Medellín y Cali. No obstante, en ciudades más pequeñas esta problemática es cada vez más notoria debido al gran dinamismo que presenta el sector de la construcción. Tal es el caso de Cartagena, donde en los últimos años la actividad de la construcción ha aumentado considerablemente y se están generando anualmente alrededor de 190.000 metros cúbicos de RC&D, cuya disposición se hace en sitios que en su mayoría no son autorizados; de acuerdo con esta situación, el municipio requiere actualmente una escombrera con una capacidad de 2.900.000 metros cúbicos para disponer lo generado hasta el año 2018. Un caso similar al de Cartagena se está presentando en Ibagué, en donde se producen anualmente alrededor de 500.000 metros cúbicos de RC&D que generan problemas a nivel ambiental y social en diferentes sectores de la capital tolimense, razón por la cual la alcaldía de este municipio adelanta planes que ayuden a mitigar este problema y para ello aprobó la Resolución 2475 de 2010, que regula y controla la disposición final de estos residuos y sanciona a quienes incumplan su contenido (Eijaiek *et al.*, 2011).

RC&D EN LA CIUDAD DE CALI

Generación de RC&D en la ciudad de Cali

Como se mencionó antes, la capital vallecaucana genera actualmente un promedio de 2480 metros cúbicos diarios de RC&D. De este volumen, cerca de 76,6% (1900 metros cúbicos) es aportado por las constructoras y obras públicas en lo que se denomina “la generación formal” y 23,4% (580 metros cúbicos) restante son aportados por construcciones y remodelaciones particulares, y el llamado “sector informal” (Sánchez *et al.*, 2013). Los mayores productores de RC&D son las constructoras y las obras públicas; por esta razón, el desarrollo de proyectos urbanísticos como las 21 mega-obras y la construcción del Masivo Integrado de Occidente (MIO) han provocado un incremento significativo del volumen de RC&D generados anualmente en la ciudad de Cali desde

el año 2009 (figura 2), cuando se encontraban en ejecución las etapas finales de dichos proyectos. A partir de 2011 hasta la actualidad, la generación de RC&D se ha mantenido constante; sin embargo, la proyección puede variar para los próximos años, ya que el municipio tiene planeada la ejecución de una segunda fase de las mega-obras, con lo cual se espera que la cifra de generación de RC&D se vuelva a incrementar (Alcaldía de Santiago de Cali, 2012) (*El Tiempo*, 2012).

Gestión y manejo de los RC&D en la ciudad de Cali

Actualmente el manejo de los RC&D en la ciudad de Cali se divide en dos sectores; formal (constructoras) e informal (particulares); en este sentido existen tres alternativas para transportar los RC&D desde su lugar de origen hasta el sitio de disposición final o estación de transferencia, entre los cuales se encuentran: los volqueteros, los carretilleros y las empresas públicas de aseo (EMAS, Promoambiental, Ciudad Limpia, etc.) (El Tiempo, 2013) (Alcaldía de Santiago de Cali, 2005).

Se estima que dentro del sector informal cerca de 40% utiliza los operadores de aseo como el medio de transporte para sus residuos, esta práctica es quizás la que presenta mayor beneficio para el manejo de los RC&D en la ciudad debido a que estas empresas se rigen por las leyes establecidas por el municipio y disponen directamente estos residuos en las estaciones de transferencia de manera semi-controlada. No obstante, 60% restante hace uso de los carretilleros pagando un valor que oscila entre \$15.000 y \$25.000 para deshacerse de sus RC&D sin importar el destino, ya que al no representar estos materiales un beneficio económico para estos transportadores y en algunos casos las grandes distancias hacia las estaciones de transferencia, sumado a la escasez de cultura ambiental, justifica para estas personas el vertimiento indiscriminado de los RC&D en lugares no autorizados, tal como se puede observar en la figura 3. Por esta razón es fundamental incluir a los carretilleros en el proceso de reciclaje para motivar en ellos el adecuado manejo de los escombros de la construcción, y de este modo los desechos provenientes del sector informal también puedan ser aprovechados

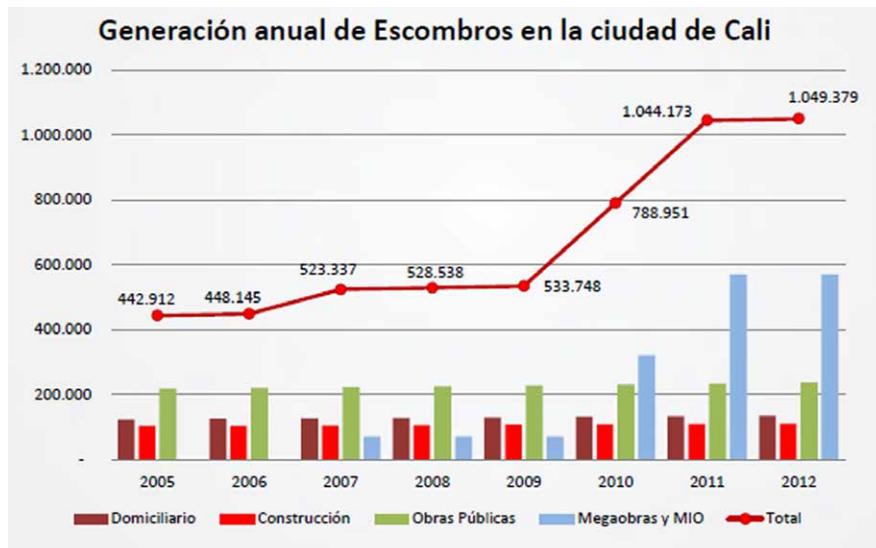


Figura 2. Generación anual (en toneladas) de RC&D en Santiago de Cali en los últimos años.

Fuente: (DAGMA, 2012).

dentro de un proceso de reutilización, contribuyendo de manera activa a que este tipo de residuos dejen de ser considerados una problemática ambiental para convertirse en una oportunidad laboral para la sociedad (Sánchez *et al.*, 2013).



Figura 3. Vertimiento ilegal de RC&D en Santiago de Cali.

Fuente: (Diario ADN, 2013).

Algunas constructoras (sector formal) prefieren contratar los volqueteros para transportar sus residuos, pero estos al no estar vinculados legalmente a una empresa en ocasiones los disponen de manera inadecuada, razón por la cual en el año 2013 el DAGMA adelantó un proceso sancionatorio a cerca de 42 constructoras en la ciudad (Sánchez *et al.*, 2013) (DAGMA, 2013). Por otra parte, las demás constructoras contratan a una empresa privada transportadora o aprovechadora de escombros, que en el caso de la ciudad de Cali es PROGEA DEL VALLE, quienes separan y disponen los residuos de manera controlada en áreas en donde antiguamente se explotaba material arcilloso en el municipio de Candelaria; no obstante, esta práctica le genera al municipio un costo adicional al ya definido para el manejo y gestión de los mismos.

En general, se calcula que a la ciudad le cuesta el manejo de 1 metro cúbico de RC&D aproximadamente \$20.577 pesos, en los cuales se incluyen los costos de transporte, cargue y descargue y disposición final. Sin embargo, a este valor se deben sumar otros que son difíciles de cuantificar pero que no dejarán de ser unos gastos para el municipio, como son los costos asociados a la limpieza periódica de las estaciones de transferencia, los costos de los operadores y su control logístico, y el costo del impacto ambiental que le genera el inadecuado manejo y gestión de los RC&D. Lo expuesto justifica el reciclaje de estos materiales como una oportunidad para la ciudad y una alternativa económicamente viable con respecto a la cuantificación de todos los gastos que representa la gestión que se realiza actualmente alrededor de los escombros (DAGMA, 2011).

Otra de las causas del inadecuado manejo de los RC&D que se analiza a diario en la ciudad es que el municipio no cuenta con un sitio de disposición final para estos residuos, esto sumado a que muchos de los carretilleros y empresas llevan los desechos de manera ilegal a sitios no autorizados, como parques, zonas verdes y vías, hace que la generación de focos de contaminación alrededor de la ciudad traiga como consecuencia problemas de

salubridad que afectan de manera directa a la población en general (DAGMA, 2014) (El País, 2008) (Diario El Pueblo, 2013). El DAGMA ha reportado que en la ciudad hay aproximadamente 109 botaderos de basura crónicos; entre ellos, 55 son sitios en donde se arrojan RC&D, de los cuales 36 siguen activos y 19 han sido intervenidos parcialmente por las autoridades de aseo, salud pública y medio ambiente de la ciudad, tal como se puede observar en la figura 4 (Sánchez *et al.*, 2013) (Alcaldía de Santiago de Cali, 2012).

A pesar de todos los esfuerzos, el manejo que se da hoy a los RC&D en la ciudad de Cali continúa siendo inapropiado, por lo que estos terminan siendo tratados como un desecho y contaminados desde la fuente con otros materiales, e incluso con materia orgánica (figura 5). Esta mala práctica hace imposible llevar a cabo la labor de reciclaje y aprovechamiento de los RC&D (actividades que en la ciudad son poco habituales) (Yaprak *et al.*, 2011). Por esta razón, antes de pensar en el aprovechamiento de estos materiales es

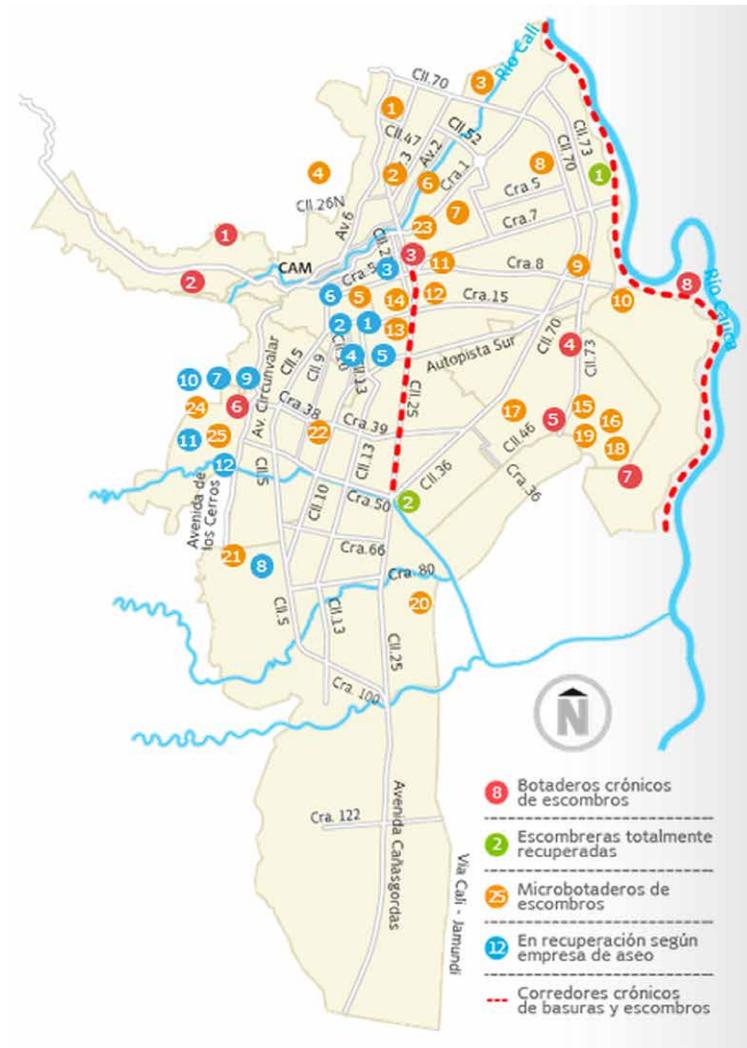


Figura 4. Distribución de los sitios de disposición de los RC&D en Santiago de Cali.

Fuente: (Sánchez *et al.*, 2013).

indispensable que el plan de gestión y manejo de los RC&D de la ciudad se cumpla a cabalidad desde la fuente que los origina hasta el lugar de disposición ya sea final o de transferencia. Esto con el fin de que estas se conviertan en un centro de acopio en donde se realicen labores de selección y separación de los materiales aprovechables, para posteriormente distribuirlos a los diferentes procesos de reutilización correspondiente a cada tipo de residuo.



Figura 5. Vertimiento no autorizado de RC&D contaminados en Santiago de Cali.

Fuente: Elaboración propia.

Barreras para el buen manejo y reciclaje de los escombros en Santiago de Cali

Se han identificado algunas barreras o dificultades para la implementación de los procesos de reciclaje de los RC&D y para el cumplimiento de la legislación actual, entre las cuales se encuentran: la falta de cultura ambiental y el comportamiento poco cívico en la población de Santiago de Cali, los bajos incentivos financieros para las empresas que efectúan buenas prácticas para el manejo de sus escombros, la escasa prioridad ambiental en la agenda pública, un mercado competitivo, la falta de conocimiento sobre el reciclaje de estos materiales, y la escasa articulación en la cadena del reciclaje de los carretilleros, volqueteros y operadores encargados de la recolección de los RC&D (Rakshvir & Barai, 2006) (Sriravindrarajah *et al.*, 2012).

Sin embargo, la barrera que quizá tiene mayor influencia y hace infructuosos los procesos de reciclaje de RC&D en Santiago de Cali y en la mayoría de ciudades colombianas es la inexistencia de normas técnicas que hayan sido avaladas por estudios e investigaciones científicas y que permitan el uso de materiales obtenidos a partir de escombros en obras de construcción civil y, sirvan a su vez como medio para brindar seguridad al consumidor de la calidad del producto obtenido. La falta de estas herramientas hace necesario el desarrollo de estudios y acciones que se enfoquen en el reciclaje de este tipo de materiales, para así establecer todo el soporte técnico y científico que permita generar normas técnicas y las medidas legislativas necesarias para incentivar y avalar la reutilización, reciclaje y aprovechamiento de los RC&D en la ciudad.

BENEFICIOS DE GESTIONAR Y RECICLAR LOS RC&D

Los beneficios al manejar adecuadamente y reutilizar los RC&D son diversos; por ejemplo, desde el punto de vista ambiental se generaría el mayor impacto, pues se reducirían los focos de contaminación alrededor de toda la ciudad y los problemas

de salubridad relacionados con esto (aire, suelo y agua contaminada) (Aldana & Serpell, 2012) (Jansen, 2005) (Thomas *et al.*, 2013). En cuanto el aspecto económico se podría lograr una reducción considerable en los costos de manejo y disposición final por parte de las autoridades municipales encargadas, además de una reducción en los gastos asociados a la limpieza por el vertimiento inapropiado de estos residuos alrededor de toda la ciudad (Valdéz & Rapimán, 2007) (Muller, 2005) (Salem *et al.*, 2003). Los beneficios sociales incluyen la disminución de botaderos de escombros no autorizados, reduciendo los riesgos ambientales y evitando la desvalorización de los predios cercanos a estos lugares. Por otra parte, al clasificar los RC&D podrían ser transformados en agregados reciclados de concreto (ARC) tanto gruesos como finos para la producción de mezclas de concreto y mortero, bases y sub-bases granulares y elementos prefabricados (Malasev *et al.*, 2012) (Deshpande *et al.*, 2011) (Xiao *et al.*, 2012) (Shima *et al.*, 2005) (Vázquez, 2005) (Lederle & Hiller, 2013). Se generaría así otro beneficio en cadena desde el punto de vista ambiental porque se lograría reducir la demanda y extracción de materias primas naturales como la grava y la arena para el uso en el sector de la construcción (Xiao *et al.*, 2012) (Seddik *et al.*, 2012) (Yang *et al.*, 2008).

CONCLUSIONES

Este artículo ha puesto de manifiesto las fuentes y causas de la generación de los RC&D en la ciudad de Cali, así como los intentos y estrategias que se han generado al nivel nacional y local para su reducción y control; sin embargo, se hace notoria la falta de integración de los municipios en el campo de la gestión de los RC&D al nivel nacional. En este sentido, la articulación de los hallazgos individuales obtenidos en los diferentes procesos que se llevan a cabo se hace indispensable, de tal forma que al unificarlos se promueva la generación de proyectos con el apoyo de la academia que apunten a la generación de herramientas prácticas

que solucionen paulatinamente los problemas de gestión, manejo y aprovechamiento de los RC&D en los diferentes municipios de Colombia.

Es necesario el desarrollo y la integración de múltiples estudios e investigaciones sobre el aprovechamiento de los diferentes materiales que componen los RC&D con el fin de adquirir todo el soporte técnico y científico necesario para la formulación de toda una legislación y normatividad que avalen el uso de los materiales obtenidos a partir del procesamiento de los RC&D en las ciudades colombianas. En primera instancia, estas normas deberán establecer los procedimientos a seguir para el procesamiento adecuado de los RC&D, así como las especificaciones que deberán cumplir, y los procesos y las proporciones óptimas de incorporación de los materiales obtenidos para poder ser utilizados en el sector de la construcción.

La generación de normas que avalen el uso de los RC&D debe ir acompañada con la formulación de medidas legislativas que promuevan su utilización e incorporación en obras de infraestructura; estas deberían incentivar o favorecer a aquellas entidades que las cumplan y sancionar a las que no las acaten. De esta forma se estará no solo promoviendo la reutilización y el reciclaje de estos materiales sino también una conciencia ambiental, dirigida al adecuado manejo de los RC&D, con el fin de no contaminarlos en la fuente para su posterior aprovechamiento.

Al darle un correcto aprovechamiento a los RC&D se les asignaría directamente un valor agregado, por lo que aquellas personas que trabajan alrededor de estos materiales serían favorecidas al lograr ser articulados en toda la cadena de reciclaje. Se obtendría así una cultura de recolección, manejo y vertimiento adecuado de los escombros, lo que permitiría que los RC&D representen un ingreso económico adicional al ya obtenido por transportarlo hacia los sitios autorizados. De esta manera se disminuirían los focos de contaminación generados por el sector informal que en este caso es el más complicado de controlar, sin llegar a poner en riesgo el derecho al trabajo de estas

personas. Además, teniendo en cuenta que en todo proceso de selección y separación de materiales la mano de obra se hace indispensable, y considerando que estas prácticas deben empezar por su fuente, esta se convierte en una alternativa adecuada para que la parte informal se integre a la cadena del reciclaje de estos residuos.

Es evidente la necesidad actual que tiene la ciudad de Cali de contar con una escombrera; sin embargo, también es fundamental contar con pequeñas estaciones de transferencia en algunos sectores de la ciudad que permitan no solo descentralizar el vertimiento de los RC&D en un solo lugar, sino que le permita al sector informal tener la posibilidad de acudir a ellos. Además de facilitar el manejo y la separación de los materiales potencialmente aprovechables al tener menores volúmenes acopiados en comparación con una escombrera. En la medida en que las prácticas de aprovechamiento en la ciudad se hagan más comunes, estos lugares dejarán de ser estaciones de transferencia para convertirse en estaciones de acopio y tratamiento de los RC&D.

AGRADECIMIENTOS

Los autores presentan sus agradecimientos al grupo de investigación materiales compuestos (GMC) de la Universidad del Valle; proyecto VRI C.I. 747 "Reciclar Escombros en Concreto", financiado por la Universidad del Valle, convocatoria 2-2013 de la Vicerrectoría de Investigaciones y al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e innovación (COLCIENCIAS) y su programa Jóvenes Investigadores e Innovadores "Virginia Gutiérrez de Pineda", convocatoria 566 de 2012, por su apoyo a esta investigación.

FINANCIAMIENTO

Esta investigación se realizó en el marco del proyecto VRI C.I. 747 "Reciclar Escombros en Concreto" financiado por la Universidad del Valle, convocatoria 2-2013 de la Vicerrectoría de Investigaciones,

y ejecutado por el Grupo de Investigación Materiales Compuestos (GMC) perteneciente al centro de excelencia en nuevos materiales (CENM) de la Universidad del Valle.

REFERENCIAS

- Adam, M., & Kurama, Y. (2013). Design of concrete mixtures with recycled concrete aggregates. *ACI Materials Journal*, 110(5), 483-493.
- Alcaldía de Santiago de Cali (31 de agosto de 2004). *Decreto No. 0475 de 2004 "por medio del cual se adopta el plan de gestión integral de residuos sólidos PGIRS del municipio de Santiago de Cali"*. Recuperado el 23 de mayo de 2013, de Alcaldía de Santiago de Cali: <http://www.cali.gov.co>
- Alcaldía de Santiago de Cali (17 de mayo de 2005). *Decreto No. 0291 de 2005 "Por medio del cual se regula la gestión integral de escombros en el municipio de Santiago de Cali"*. Recuperado el 7 de abril de 2013, de Alcaldía de Santiago de Cali: <http://www.cali.gov.co>
- Alcaldía de Santiago de Cali (23 de febrero de 2009). *Decreto 0059 de 2009 "por medio del cual se adoptan los manuales para la implementación de PGIRS en entidades públicas en el municipio de Santiago de Cali y se dictan otras disposiciones"*. Recuperado el 21 de junio de 2013, de Alcaldía de Santiago de Cali-Documents compartidos: <http://www.cali.gov.co>
- Alcaldía de Santiago de Cali (23 de abril de 2009). *Ley 1259 "por medio del cual se reglamenta la aplicación de la ley 1259 de 2008 del comparendo ambiental y se dictan otras disposiciones"*. Recuperado el 15 de mayo de 2013, de Alcaldía de Santiago de Cali-Proyecto de acuerdo: <https://www.concejodecali.gov.co>
- Alcaldía de Santiago de Cali (23 de abril de 2012). *Actualización del estudio de definición de áreas potenciales para la localización de sitios de disposición final de escombros para el municipio de Santiago de Cali*. Recuperado el 12 de mayo de 2013, de Alcaldía de Santiago de Cali: <http://www.cali.gov.co>

- Alcaldía de Santiago de Cali (25 de junio de 2012). *Acuerdo No. 0327 de 2012 "por medio del cual se modifica parcialmente el acuerdo 282 de 2009 y se dictan otras disposiciones"*. Recuperado el 2 de junio de 2013, de Alcaldía de Santiago de Cali–Boletín oficial No. 115: www.concejodecali.gov.co
- Alcaldía de Santiago de Cali (1 de abril de 2012). *Proyecto de acuerdo por medio del cual se adopta e plan de desarrollo 2012-2015 del municipio de Santiago de Cali*. Recuperado el 11 de abril de 2013, de Alcaldía de Santiago de Cali: www.planeacion.cali.gov.co
- Alcaldía Mayor de Bogotá (6 de agosto de 2002). *Decreto 1713 de 2002 "por el cual se reglamenta la ley 142 de 1994, la ley 632 de 2000 y la ley 689 de 2001, en relación con la presentación del servicio público de aseo, y el decreto 2811 de 1974 y la ley 99 de 1993"*. Recuperado el 3 de junio de 2013, de Alcaldía Mayor de Bogotá–*Diario oficial* 44893: <http://www.alcaldiabogota.gov.co>
- Alcaldía Mayor de Bogotá (25 de abril de 2011). *Resolución No. 2397 de 2011 "Por la cual se regula técnicamente el tratamiento y/o aprovechamiento de escombros en el distrito capital"*. Recuperado el 13 de julio de 2013, de Alcaldía Mayor de Bogotá, D.C: <http://www.secretariadeambiente.gov.co>
- Alcaldía Mayor de Bogotá (4-6 de diciembre de 2012). *Gestión y control de los residuos de la construcción y demolición (RCD): Programa basura cero-Escobros cero*. Recuperado el 20 de mayo de 2013, de Alcaldía Mayor de Bogotá, D.C: <http://ambientebogota.gov.co>
- Aldana, J., & Serpell, A. (2012). Topics and tendencies of construction and demolition waste: a meta-analysis. *Revista de la construcción*, 12(22), 4-16.
- Bedoya, C., & Gonzales, L. (2003). El concreto reciclado con escombros como generador de hábitas urbanos sostenibles en la ciudad como ecosistema semi-cerrado, una utopía cultural (tesis de maestría). Medellín: Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.
- Castaño, J.; Rodríguez, R.; Lasso, L.; Gómez, A., y Ocampo, S. (2013). Gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en Bogotá: Perspectivas y limitantes. *Revista Tecnura*, 17(38), 121-129.
- Congreso de Colombia (29 de diciembre de 2000). *Ley 632 de 2000 "por la cual se modifican parcialmente las leyes 142, 143 de 1994, 223 de 1995 y 286 de 1996"*. Recuperado el 2 de agosto de 2013, de Congreso de la República -Poder público rama legislativa: <http://www.fedevivienda.org.co>
- Congreso de Colombia (7 de agosto de 2002). *Ley 769 de 2002 "por la cual se expide el código nacional de tránsito terrestre y se dictan otras disposiciones"*. Recuperado el 5 de junio de 2013, de Congreso de Colombia–*Diario oficial* 44893 y 44932: <http://www.alcaldiabogota.gov.co>
- Congreso de la República (19 de diciembre de 2008). *Ley 1259 de 2008 "por medio de la cual se instaurara en el territorio nacional la aplicación del comparendo ambiental a los infractores de las normas de aseo, limpieza y recolección de escombros; y se dictan otras disposiciones"*. Recuperado el 10 de julio de 2013, de *Diario oficial*–Congreso de la República: http://190.147.213.68:8080/homepage/DIARIO_OFICIAL/2008/47208.pdf
- Consejo de Medellín (1 de enero de 2009). *Acuerdo Municipal No. 62 de 2009 "por medio del cual se establece una política pública para la gestión de escombros en la ciudad de Medellín"*. Recuperado el 12 de julio de 2013, de Consejo Municipal de Medellín–*Gaceta oficial* No. 3596: <http://www.medellin.gov.co>
- DAGMA (10 de noviembre de 2011). *Estudio de escombros en la ciudad de Cali*. Recuperado el 5 de junio de 2013, de Grupo de control de impactos al suelo; Alcaldía de Santiago de Cali: <http://www.cali.gov.co>
- DAGMA (5 de septiembre de 2012). *Marco normativo para el manejo de escombros de demoliciones y construcciones en la ciudad de Cali*. Recuperado el 15 de mayo de 2013, de Alcaldía de Santiago de Cali: www.dagma.gov.co
- DAGMA (28 de septiembre de 2013). *Dagma sensibilizó el comparendo ambiental en operativos de escombros en las comunas 13 y 21*. Recuperado el 2 de octubre de 2013, de Alcaldía de Santiago de

- Cali-Comunicaciones DAGMA: <http://www.cali.gov.co/dagma/publicaciones>
- DAGMA (03 de febrero de 2014). *Cali tendrá dos estaciones para la disposición final de escombros, en 2015*. Recuperado el 17 de febrero de 2014, de Alcaldía de Santiago de Cali-Comunicaciones DAGMA: <http://cali.gov.co/publicaciones>
- Deshpande, N.; Kulkarni, S., & Patil, N. (2011). Effectiveness of using coarse recycled concrete aggregate in concrete. *International Journal of Earth and Engineering*, 4(96), 913-919.
- Diario ADN (11 de julio de 2013). *Candelaria restringió evacuación de escombros de Cali*. Recuperado el 25 de agosto de 2013, de Diario ADN-Cali: <http://diarioadn.co/cali>
- Diario El Pueblo (07 de septiembre de 2013). *Los escombros, un problema crónico en Cali*. Recuperado el 20 de septiembre de 2013, de Diario El Pueblo: <http://elpueblo.com.co>
- Eijaiek, M.; Quiñones, E., y Mouthon, B. (2011). Aprovechamiento de los escombros generados en actividades de demolición de placas de pavimento en Cartagena-Colombia. *Hacia la sustentabilidad: Los residuos sólidos como fuente de energía y materia prima*, 554-562.
- El País (01 de marzo de 2008). *¿Hasta cuándo con los escombros?* Recuperado el 25 de junio de 2013, de periódico el País: <http://historico.elpais.com.co>
- El Tiempo (13 de abril de 2012). *¿Quién responde por estas montañas de escombros?/ Con nombre propio*. Recuperado el 17 de febrero de 2014, de periódico El Tiempo: <http://www.eltiempo.com>
- El Tiempo (05 de septiembre de 2012). *Cali busca una salida para sus escombros*. Recuperado el 3 de junio de 2013, de periódico El Tiempo: <http://www.eltiempo.com>
- El Tiempo (29 de diciembre de 2013). *Bogotá tiene 368 puntos críticos por cuenta de los escombros*. Recuperado el 17 de febrero de 2014, de periódico El Tiempo: <http://www.eltiempo.com>
- El Tiempo (04 de julio de 2013). *Pretenden acabar con montañas de escombros en Cali*. Recuperado el 10 de agosto de 2013, de periódico El Tiempo: <http://www.eltiempo.com>
- Hincapié, A., y Aguja, E. (2003). Agregado reciclado para mortero. *Revista Universidad EAFIT*, 39(132), 76-89.
- Janssen, G. (2005). General approach to reuse and recycling in construction. *Use of Recycled Materials (RILEM TC 198: Final report)*, 27-32.
- Lederle, R., & Hiller, J. (2013). Reversible shrinkage of concrete made with recycled concrete aggregate and other aggregate types. *ACI Materials Journal*, 110(4), 423-433.
- Limbachiya, M.; Koulouris, A.; Roberts, J., & Fried, A. (2004). Performance of recycled aggregate concrete. *RILEM International Symposium on Environment Conscious Materials*, 127-136.
- Lin, Y.; Tyan, Y.; Chang, T.-P., & Chang, C.-Y. (2004). An assessment of optimal mixture for concrete made with recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Research* (34), 1373-1380.
- Malasev, M.; Radonjanin, V., & Marinkovic, S. (2012). Recycled concrete as aggregate for structural concrete production. *Sustainability* (2), 1204-1225.
- Muller, A. (2005). Overview regarding construction and demolition waste in Germany. *Use of Recycled Materials (RILEM TC 198: Final Report)*, 3-5.
- Oikonomou, N. (2005). Recycled concrete aggregates. *Cement & Concrete Composites*, 27, 315-318.
- Poon, C., & Chan, D. (2007). The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong. *Resources, Conservation and Recycling*, 50, 293-305.
- Rakshvir, M., y Barai, S. (2006). Estudios sobre hormigón reciclado con áridos. *Waste Management & Research*(24), 225-233.
- Salem, R.; Burdette, E., & Jackson, M. (2003). Resistance to freezing and thawing of recycled aggregate concrete. *ACI Materials Journal*, 100(3), 216-222.
- Sánchez, D.; Ruiz, F.; Ortiz, H., & Silva, M. (25 de agosto de 2013). *Infografía: ¿De dónde vienen y dónde van a parar los escombros de Cali?* Recuperado el 29 de agosto de 2013, de periódico El País: <http://www.elpais.com.co>
- Seddik, M.; Ouchagour, Y., & Limbachiya, M. (2012). Performance of Portland/Silica fuem cement concrete produced with recycled concrete aggregate. *ACI Material Journal*, 109(1), 91-101.

- Serrano, G., y Ferreira, J. (2009). Aprovechamiento de los escombros para la producción de concreto. *Red de ingeniería en saneamiento ambiental (REDISA)*, 1-10.
- Shima, H.; Tateyashiki, H.; Matsuhashi, R., & Yoshida, Y. (2005). An advanced concrete recycling technology and its applicability assessment through input-output analysis. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 3(1), 53-57.
- Sriravindrarajah, R.; Wang, N., & Ervin, L. (2012). Mix desing for previous recycled aggregate concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 6(4), 239-246.
- Thomas, C.; Setién, J.; Polanco, J.; Alaejos, P., & Sanchez de Juan, M. (2013). Durability of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*(40), 1054-1065.
- Torgal, F., & Jalali, S. (2011). Eco-efficient construction and building materials. *Springer Verlag London Limited*, 51-74.
- UAESP (12 de enero de 2012). *Escombros cero; Manejo integral de los escombros en la ciudad de Bogotá*. Recuperado el 20 de junio de 2013, de Alcaldía Mayor de Bogotá; Unidad administrativa de servicios públicos: <http://www.secretariadeambiente.gov.co>
- Valdéz, G., y Rapimán, J. (2007). Propiedades físicas y mecánicas de bloques de hormigón compuestos con áridos reciclados. *Información Tecnológica*, 18(3), 81-89.
- Vázquez, E. (2005). Overview regarding construction and demolition waste in Spain. *Use of Recycled Materials (RILEM TC 198-URM: Final report)*, 26-26.
- Xiao, J.; Li, W., & Huang, X. (2012). An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996-2011). *Construction and Building Materials*(31), 364-383.
- Xiao, J.; Tawana, M., & Huang, X. (2012). Review of studies on structural performance of recycled aggregate concrete in China. *Science China; Technological Sciences*, 55(10), 2727-2739.
- Yang, K.; Chung, H., & Ashour, A. (2008). Influence of type and replacement level of recycled aggregates on concrete properties. *ACI Materials Journal*, 105(3), 289-297.
- Yaprak, H.; Aruntas, H.; Demir, I.; Sissek, O., & Durmus, G. (2011). Effects of the fine recycled concrete aggregates on the concrete properties. *International Journal of the Physical Sciences*, 6(10), 2455-2461.





Obtención de modelos de carga compuestos en sistemas de potencia para análisis dinámico: revisión y aplicación

Composite load models in power systems for dynamical analysis: review and application

Sandra Milena Pérez Londoño*, Luis Fernando Rodríguez García**, Juan José Mora Flórez***

Fecha de recepción: 12 de marzo de 2014

Fecha de aceptación: 19 de enero de 2015

Citation / Para citar este artículo: Pérez Londoño, S. M., Rodríguez García, L. F., & Mora Flórez, J. J. (2015). Obtención de modelos de carga compuestos en sistemas de potencia para análisis dinámico: revisión y aplicación. *Revista Tecnura*, 19(44), 171-189. doi:<http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.2.a13>

Resumen

En este artículo se presenta una revisión de las metodologías principales empleadas en la obtención de modelos de carga compuestos en sistemas eléctricos de potencia. Como estrategia de presentación de esta investigación, inicialmente se realiza la descripción y clasificación de las metodologías empleadas para obtener los modelos de carga compuestos, de sus diferentes modificaciones y de la utilización de nuevas herramientas durante los últimos años, de acuerdo con la información disponible en más de 60 referencias encontradas en las principales bases de datos. Las ventajas del modelo de carga compuesto se comprueban en la parte final del artículo, en donde se compara su comportamiento con el modelo de carga estático y se hace un análisis de la capacidad de generalización ante diferentes perturbaciones del sistema de potencia. Este trabajo sirve como una referencia útil en la discusión relacionada con aplicaciones del modelado de carga en los sistemas eléctricos de potencia.

Palabras clave: estimación de parámetros, modelo de carga, simulación de sistemas de potencia, sistemas eléctricos de potencia.

Abstract

This paper is oriented to present a review of different approaches commonly applied to obtain composite load models used in electric power system studies. As presentation strategy, there is initially a detailed description and classification of the methodologies used to obtain composite load models, their different modifications and the use of new tools during the last years, according to the available information from more than 60 references found in databases. The advantages of composite load model are evaluated and highlighted at the final part of this paper, where its behavior is compared to the static load model and an analysis of the generalization capability considering different power system disturbances is presented.

* Ingeniera electricista, magíster en Ingeniería Eléctrica, doctora en Ingeniería. Docente de la Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia. Contacto: saperez@utp.edu.co

** Ingeniero electricista, magíster en Ingeniería Eléctrica. Investigador de la Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia. Contacto: luferrdriguez@utp.edu.co

*** Ingeniero electricista, magíster en Potencia Eléctrica, magíster en Tecnologías de la Información, doctor en Tecnologías de la Información; docente de la Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia. Contacto: jjmora@utp.edu.co

This research work is a useful reference in the discussion associated to applications of load modeling in electric power systems.

Keywords: electric power systems, load modeling, parameter estimation, power system simulation.

INTRODUCCIÓN

En los sistemas eléctricos de potencia el modelado de la carga representa un gran desafío, debido a su naturaleza compleja y variante en el tiempo, comparativamente con otros componentes como generadores o líneas de transmisión, para los cuales existen modelos ampliamente analizados y empleados satisfactoriamente.

En los últimos treinta años se ha realizado una considerable cantidad de investigaciones en el área del modelado de carga, incluyendo tres recomendaciones del grupo de trabajo en modelado de IEEE (IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performances, 1993) (IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performances, 1995a) (IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performances, 1995b), además de muchos artículos en donde se han presentado diversas propuestas en cuanto a modelos matemáticos, enfoques y metodologías. Aun así, esta sigue siendo un área de constante y vigente investigación. Actualmente, la inclusión de nuevos tipos de cargas en los sistemas eléctricos de potencia (cargas electrónicas, generación distribuida, entre otras), también ha influido en que esta sea un área de creciente interés por parte de los investigadores, para definir modelos que se adapten a las características propias de este tipo de cargas (Department of Energy and Climate Change (DECC), 2010).

Para la definición de los modelos de carga se han considerado tanto las características de las cargas (estáticas o dinámicas), como las metodologías que se han empleado para su obtención (enfoque basado en componentes o en mediciones) (Kundur, 1993). Para el caso específico del modelado dinámico de carga, se han empleado los modelos de recuperación exponencial y el modelo

compuesto, siendo este último uno de los más analizados, debido a que más de 60% de la potencia total demandada en los sistemas eléctricos de potencia corresponde a los motores y, por tanto, es razonable incluir su comportamiento dinámico en el modelo de la carga para estudios de estabilidad en sistemas eléctricos (Ornata & Uemura, 1998) (Ma, He, & Hill, 2006).

En el transcurso de los últimos años se han empleado diversas técnicas para el modelado de carga, desde metodologías que abordan la inteligencia artificial (Chen & Mohler, 2003) (Wang, Li, Su, & Xia, 2006) (Abdelaziz, Badr, & Younes, 2007) (Li, Wang, & Li, 2008), hasta metodologías de optimización (Wu, Wen, Nuttall, Shimmin, & Cheng, 2003) (Wen, Jiang, Wu, & Cheng, 2003) (Shi & He, 2003) (Knyazkin, Cañizares, & Söder, 2004) (Ju, y otros, 2007), que mejoran las propuestas clásicas empleadas en la implementación de los modelos. Sin embargo, del trabajo de revisión (Milanovic, Yamashita, Martinez, Djokie, & Korunovic, 2013), se observa cómo la utilización de los modelos de carga dinámicos es bastante baja, comparativamente con los modelos estáticos, a pesar de que su imposibilidad de reflejar las condiciones reales de la carga ya ha sido analizada y reportada en una gran cantidad de artículos (Mauricio & Semlyen, 1972).

Por otra parte, debido al auge de los sistemas de monitorización de área amplia (WAMS), la tendencia en el modelado de carga está encaminada a la incorporación de la información recopilada por estos sistemas para el desarrollo y perfeccionamiento de los modelos de carga en los sistemas eléctricos. La disponibilidad de estas mediciones en los sistemas eléctricos de potencia permite monitorizar permanentemente el comportamiento de las cargas ante los eventos que ocurren en la operación del sistema. Sin embargo, estas mediciones también se

pueden utilizar para propósitos de sintonización de modelos de carga, empleando metodologías de estimación. En la representación de la carga para propósitos de análisis dinámico, los modelos compuestos siguen siendo ampliamente aplicados y aceptados, dado que sus resultados presentan mejor precisión en comparación con otros modelos de carga, como los modelos con ecuaciones de diferencia (Shi, Peng, & Liu, 2012).

Ante este panorama, es importante contar con un análisis completo de la bibliografía disponible, que recoja información sobre el estado del arte de las diferentes metodologías empleadas en la obtención de modelos de carga dinámicos, con el fin de proponer nuevas estrategias que suplan o refuercen los enfoques tradicionales. Para tal fin, en este artículo se hace una revisión actualizada sobre las diferentes metodologías empleadas en la obtención de modelos dinámicos de carga, específicamente relacionadas con el modelo de carga compuesto. Además, y como complemento de la investigación, se presenta la aplicación de una metodología basada en mediciones para obtener un modelo de carga compuesto, basada en un algoritmo evolutivo; el desempeño del modelo obtenido se compara con un modelo de carga estático y adicionalmente se analiza su capacidad de generalización ante diferentes condiciones de operación.

CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE MODELOS DE CARGA

Definición de carga

De acuerdo con (Rifaat, 2004), un elemento de carga se define como un dispositivo o componente de un sistema de potencia que consume, genera o controla la potencia real o reactiva; es sensible ante variaciones transitorias, dinámicas o de estado estable en la tensión de la barra donde se encuentra conectada con otros elementos, y este a su vez a una fuente de energía eléctrica. Es importante tener en cuenta que la carga no solo la conforman

los dispositivos (como lámparas, motores, sistemas de aire acondicionado, por mencionar algunos), sino también hacen parte los transformadores a nivel de sub-transmisión, alimentadores primarios y secundarios, capacitores en paralelo y reguladores de tensión, entre otros.

Clasificación de modelos de carga

Para representar el comportamiento de la carga se emplean modelos, que mediante expresiones matemáticas describen las características de la potencia activa y reactiva de la carga respecto a la variación de la tensión y la frecuencia en la barra donde se encuentra conectada (Choi B. , y otros, 2006). Por simplificación, en varios estudios la frecuencia se considera constante y por tanto, los modelos solo dependen de la tensión (Kundur, 1993). De acuerdo con la forma de las expresiones matemáticas, los modelos de las cargas se clasifican en modelos estáticos y modelos dinámicos. El comportamiento en el dominio del tiempo de las cargas estáticas se representa adecuadamente por una función algebraica de la tensión y/o la frecuencia. De esta forma, se describen los modelos exponencial y polinomial o ZIP (Z, impedancia constante, I, corriente constante I y P, potencia constante) (Kundur, 1993). Las cargas dinámicas requieren un modelado explícito con ecuaciones que reflejen la dependencia de las variables con el tiempo, como en el caso de motores de inducción y síncronos. Generalmente para su representación se utilizan ecuaciones de diferencia y/o diferenciales, como el modelo utilizado en la ecuación (1).

$$\begin{aligned} T_p \frac{dx}{dt} &= P_s(V) - xP_t(V), \\ T_q \frac{dy}{dt} &= Q_s(V) - yQ_t(V) \end{aligned} \quad (1)$$

donde P_s y Q_s representan las potencias real y reactiva de la carga en estado estable como función de la tensión V . A su vez, P_t y Q_t representan las potencias en estado transitorio como función de la tensión. T_p y T_q son las constantes de tiempo para

las potencias activa y reactiva, x e y son las variables de estado para las potencias activa y reactiva, respectivamente.

Entre los modelos de carga dinámicos se encuentran el de recuperación exponencial y el modelo compuesto (Kundur, 1993). De acuerdo con la naturaleza y características de las cargas, el primero se emplea generalmente para cargas que no responden inmediatamente ante variaciones en la tensión como equipos de calefacción e iluminación, y el segundo se aplica para cargas con un considerable número de motores de inducción (Maitra, Gaikwad, Pourbeik, & Brooks, 2008) (Choi B. , y otros, 2006). En los sistemas eléctricos de potencia, la mayoría de componentes dinámicos son motores de inducción, los cuales representan un alto porcentaje de la potencia total consumida por las cargas. Por tanto, una representación mediante modelos compuestos puede aproximarse a la composición real de la carga, dado que el modelo compuesto hace parte de aquellos modelos que tienen un claro significado físico (al incluir en su composición un motor de inducción conectado en paralelo con una carga estática), comparativamente con modelos de carga de tipo “caja negra”, que no lo hacen (Song, Cotilla-Sanchez, & Brekken, 2013). Por otra parte, las aplicaciones desarrolladas con el modelo compuesto, han demostrado una buena descripción del comportamiento dinámico de la carga, específicamente para la respuesta de la potencia reactiva en estudios relacionados con estabilidad, comparativamente con modelos dinámicos de carga típicos (Peng, Yan-hong, Guo-qiang, & Rui, 2005). Las razones anteriores hacen del modelo de carga compuesto uno de los más empleados y por tanto, esta revisión bibliográfica se centra en su estudio.

Este modelo, a diferencia de los otros modelos dinámicos de carga, ha sido uno de los más utilizados, debido a que tiene un claro significado físico. En su estructura combina un modelo ZIP, para representar el comportamiento estático de la carga, con un modelo de tercer orden de motor de

inducción que representa el componente dinámico de la carga, que generalmente se conectan en paralelo, como se ilustra en la figura 1.

Modelo de carga compuesto (Shi & He, 2003)

Un modelo de carga compuesto combina en paralelo un modelo estático ZIP con un modelo de tercer orden de motor de inducción, como se ilustra en la figura 1, y se define como modelo de carga ZIP-IM. Es importante aclarar que a nivel de distribución, en la revisión bibliográfica se encuentra la definición de un modelo compuesto como una combinación solamente de potencia constante, corriente constante e impedancia constante (Kalesar & Seifi, 2010) (Abul'Wafa, 2012). El modelo considerado en este artículo se centra en la definición inicial.

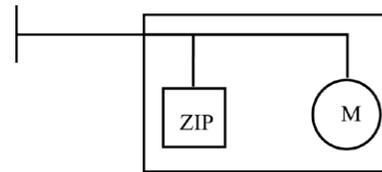


Figura 1. Modelo compuesto de carga.

Fuente: (Shi & He, 2003).

La potencia total consumida en la barra de carga de la figura 1 se puede calcular como una combinación de una parte estática y una dinámica del modelo, según la ecuación (2).

$$\begin{aligned} P_0 &= P_{motor0} + P_{baseZIP}, \\ Q_0 &= Q_{motor0} + Q_{baseZIP} \end{aligned} \quad (2)$$

Con P_0 y Q_0 corresponden a la carga activa y reactiva inicial de la barra respectivamente, y P_{motor0} y Q_{motor0} son las potencias activa y reactiva inicial consumida por el motor.

La componente estática puede ser modelada a partir de la ecuación (3).

$$\begin{aligned} P_{ZIP} &= P_{baseZIP} \left[a_0 + a_1 \left(\frac{V}{V_0} \right) + a_2 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right], \\ Q_{ZIP} &= Q_{baseZIP} \left[b_0 + b_1 \left(\frac{V}{V_0} \right) + b_2 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (3)$$

Donde $P_{baseZIP}$, $Q_{baseZIP}$ representan la potencia activa y reactiva de la carga estática en estado estacionario, V_0 es la tensión de la carga en estado estacionario, a_0 y b_0 son las componentes asociadas a carga de potencia constante, a_1 y b_1 son las componentes asociadas a carga de corriente constante y a_2 y b_2 son las componentes asociadas a carga de impedancia constante. Adicionalmente, se debe cumplir la ecuación (4).

$$a_0 + a_1 + a_2 = 1 \quad b_0 + b_1 + b_2 = 1 \quad (4)$$

Para la componente dinámica del modelo se emplea un modelo de tercer orden de un motor de inducción, cuyas ecuaciones se presentan en la ecuación (5).

$$\begin{aligned} \frac{dE'_d}{dt} &= -\frac{1}{T'} [E'_d + (X - X')I_q] - (\omega - 1)E'_q \\ \frac{dE'_q}{dt} &= -\frac{1}{T'} [E'_q - (X - X')I_d] + (\omega - 1)E'_d \\ \frac{d\omega}{dt} &= -\frac{1}{2H} [T_0 - (E'_d I_d + E'_q I_q)] \end{aligned} \quad (5)$$

Donde las corrientes de eje d y eje q y algunos parámetros se presentan en la ecuación (6).

$$\begin{aligned} I_d &= \frac{1}{R_s^2 + X'^2} [R_s(U_d - E'_d) + X'(U_q - E'_q)] \\ I_q &= \frac{1}{R_s^2 + X'^2} [R_s(U_q - E'_q) - X'(U_d - E'_d)] \end{aligned} \quad (6)$$

$$T' = \frac{X_r + X_m}{R_r}, \quad X = X_s + X_m, \quad X' = X_s + \frac{X_m X_r}{X_m + X_r}$$

Donde E'_d es la fuerza electromotriz interna en el eje directo d , E'_q es la fuerza electromotriz interna en el eje en cuadratura q , ω es la velocidad del rotor, I_d e I_q son las corrientes del estator en el eje

d y q respectivamente, U_d y U_q son las tensiones en terminales del eje d y del eje q . R_s , X_s , X_m , R_r y X_r son la resistencia del estator, la reactancia del estator, reactancia de magnetización, resistencia del rotor y reactancia del rotor respectivamente, y finalmente, H corresponde al coeficiente de inercia.

La potencia activa y reactiva consumida por el motor puede calcularse según la ecuación (7).

$$\begin{aligned} P_{motor} &= V_d I_d + V_q I_q \\ Q_{motor} &= V_q I_d - V_d I_q \end{aligned} \quad (7)$$

De acuerdo con las ecuaciones (2) a (7), el modelo de carga compuesto requiere 11 parámetros para su definición [R_s , X_s , X_m , R_r , X_r , H , T_0 , a_0 , a_1 , a_2 , b_0 , b_1 , b_2], los cuales se pueden obtener mediante algoritmos de estimación que emplean mediciones de tensiones o potencias del sistema o se definen *a priori* empleando parámetros típicos (Pereira, y otros, 2002) (IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performances, 1995b). A continuación se presenta una revisión bibliográfica en donde se resaltan las metodologías más representativas basadas en mediciones, empleadas para la obtención del modelo de carga descrito.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL MODELO DE CARGA COMPUESTO

Evolución del modelo de carga compuesto

Ante la pobre representatividad y la mala precisión de los modelos de carga estáticos empleados para reproducir el comportamiento dinámico en los sistemas reales, surgieron diferentes modelos, entre ellos el modelo compuesto. Esta situación se evidenció en los estudios de validación realizados sobre los eventos del 10 de agosto de 1996 y el 4 de agosto de 2000 ocurridos en Estados Unidos. Ambos eventos estuvieron relacionados con la aparición de oscilaciones no amortiguadas, después de la salida de algunos elementos del sistema (líneas, generadores) y una serie de eventos en cascada, que condujeron posteriormente a un colapso y al

aislamiento de grandes partes del sistema. Dichos eventos demostraron la necesidad de replantear los modelos de generadores y de modelos de carga estáticos existentes en el WSCC (Western Systems Coordinating Council), por modelos dinámicos, ya que con la representación original no es posible obtener una correlación entre los registros de datos y las simulaciones (Kosterev, Taylor, & Mittelstadt, 1999) (Pereira, Kosterev, Mackin, Davies, Undrill, & Zhu, 2002). En (Pereira, y otros, 2002) se propuso un modelo de carga compuesto (80% parte estática y 20% motor de inducción), el cual fue adoptado y utilizado para todas las cargas en el sistema WSCC. Los autores concluyen que la utilización de este modelo no se puede generalizar y que es susceptible de ser mejorado. La actualización del modelo anterior se hizo unos años más tarde en (Kosterev & Meklin, 2006) y (Kosterev, y otros, 2008), por parte del WECC (Western Electricity Coordinating Council, sucesor del WSCC). Allí se presenta un mejoramiento sustancial respecto al modelo anterior, en cuanto a la representación detallada de los componentes de carga en una barra dada. Entre sus ventajas más representativas se encuentra la inclusión en el modelo, de una impedancia para representar la distancia eléctrica entre la barra de transmisión y el usuario final. Adicionalmente, se considera la representación de la diversidad en la composición y en las características dinámicas de varios equipos, mediante la inclusión de cuatro tipos de motores. En la figura 2 se ilustra la estructura del modelo mejorado.

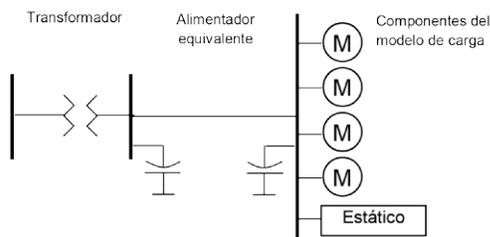


Figura 2. Estructura del modelo de carga compuesto WECC mejorado.

Fuente: Kosterev & Melkin, 2006.

Existen numerosas referencias en donde se ha empleado el modelo de carga compuesto, así como también muchas metodologías empleadas para su ajuste. Por ejemplo, se ha empleado el enfoque basado en componentes o en mediciones para obtener los parámetros del modelo compuesto (Kundur, 1993). Para obtener un modelo de carga empleando el enfoque basado en componentes se requiere conocer en forma detallada la composición y la mezcla de la carga, lo cual generalmente es difícil de obtener. Por otra parte, el enfoque basado en mediciones es mucho más versátil, debido a que emplea las medidas obtenidas en el sistema para estimar los parámetros de una estructura definida previamente. A continuación se presentan algunas de las referencias más sobresalientes, que han empleado el enfoque basado en mediciones en la obtención de los modelos de carga compuestos, en los últimos años.

Obtención del modelo de carga compuesto empleando mediciones

En este enfoque se utilizan las mediciones adquiridas de la barra de carga para obtener el modelo. Inicialmente se selecciona una estructura para representar el comportamiento de la carga, cuyos parámetros son desconocidos. Posteriormente se emplea una metodología de estimación para determinar los parámetros mediante la minimización de la diferencia entre la respuesta del modelo estimado y las mediciones de la barra de carga (IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performances, 1993) (Kundur, 1993). Las metodologías que se han empleado para estimar los parámetros del modelo compuesto de carga han sido numerosas, tanto lineales como no lineales, entre ellas se encuentran: algoritmos de mínimos cuadrados, técnicas de optimización lineal y no lineal, algoritmos evolutivos (Ju, y otros, 2007), entre otros. A continuación se presentan algunas de ellas.

Empleando el enfoque basado en mediciones y una metodología mixta de técnicas de identificación no lineal con modelos de predicción del error,

en (Wang, Jiang, Chang, & Liu, 1994) se desarrolló un modelo de carga compuesto dependiente de la frecuencia, cuyos componentes son un circuito RC en paralelo con un circuito equivalente de un motor de inducción. Sin embargo, en este artículo no se hizo una comparación del desempeño entre el modelo compuesto dependiente de la frecuencia y el modelo convencional compuesto ante grandes excursiones de frecuencia, tensión y corriente, impidiendo verificar la validez del modelo.

En (Kao, 2001) se analiza el impacto de diversos modelos de carga (modelo dinámico de carga, compuesto y exponencial), sobre el amortiguamiento de las oscilaciones inestables de baja frecuencia ocurridas en el sistema de potencia de Taiwán, mediante el análisis de los valores propios. Allí se demuestra que el modelo compuesto, en comparación con los otros modelos, permite un mayor amortiguamiento de las oscilaciones.

Ante la influencia de los motores de inducción en el comportamiento dinámico y transitorio de los sistemas eléctricos, se han empleado técnicas para modelar un conjunto de estos elementos, mediante la obtención de un modelo equivalente por medio de la agregación de motores (Nozari, Kankam, & Price, 1987). Pero aun así, no se ha documentado por qué, mediante la representación de la carga dinámica por un motor de inducción o la combinación de este con una impedancia constante en paralelo, no se consigue una respuesta dinámica adecuada de la potencia reactiva (Xin-ran, Ren-mu, & Zhou, 1999) (Wei-guo, Ren-mu, & Tie-Qiang, 2002). Por esta razón, los autores en (Shi & He, 2003) proponen un modelo de carga compuesto mejorado, en donde consideran para la parte estática un modelo ZIP, junto con un modelo de un motor de inducción, que se valida con datos obtenidos de registros de perturbaciones transitorias.

En (De Tuglie, Patrono, & Torelli, 2005) se identifican los parámetros de un modelo compuesto de carga heterogéneo en su composición (carga dependiente del voltaje como parte estática y un motor de inducción como parte dinámica), utilizando mediciones de tensión en los nodos de carga para

el modelo adaptativo, desarrollado de acuerdo con la teoría de la sensibilidad. La metodología requiere que el sistema de potencia sea excitado por perturbaciones derivadas de eventos normales del sistema y por contingencias.

Uno de los primeros artículos en donde se construye un modelo de carga compuesto (ZIP y motor de inducción) mejorado, basado en mediciones de campo corresponde a (He, Ma, & Hill, 2006), ya que la mayoría de las aplicaciones del modelo empleaban parámetros por defecto, obtenidos generalmente del software LOADSYN (General Electric Company, 1987). La metodología que se propone determina los parámetros del modelo empleando la técnica de identificación multi-curva y adicionalmente se analiza la capacidad de generalización de este modelo, mediante la técnica de validación cruzada.

En (Choi B.-K. , y otros, 2006) se presenta el desarrollo de tres modelos de carga compuestos, GZIP (modelo genérico ZIP – motor de inducción de tercer orden), Exp-IM (modelo exponencial – motor de inducción) y Z-IM (carga estática como impedancia constante y motor de inducción), cuyos parámetros fueron estimados con el algoritmo de mínimos cuadrados no lineal. Los autores concluyen que existen ciertos parámetros que se ven afectados por las condiciones de carga del motor de inducción, por lo cual es necesaria su actualización ante diferentes condiciones de operación. Aunque los tres modelos reproducen satisfactoriamente los comportamientos de potencia activa y reactiva, el modelo GZIP entrega los mejores resultados.

Uno de los problemas y retos que se presentan con el enfoque basado en mediciones en la obtención del modelo de carga radica en la gran cantidad de información que se registra y concentra en las bases de datos del sistema. Por tanto, es necesario disponer de herramientas de depuración que permitan reducir el esfuerzo computacional. En (Ma, He, & Hill, 2006), los autores proponen un modelo de carga basado en vectores de soporte que permiten obtener modelos con una gran

capacidad de generalización, a partir de solo un pequeño subconjunto de las bases de datos.

En (Maitra, Gaikwad, Pourbeik, & Brooks, 2008), se empleó una metodología paramétrica no lineal, para definir estructuras compuestas del tipo (ZIP + motor de inducción). Los autores concluyen que los modelos estáticos no son apropiados para capturar la respuesta real del sistema; a su vez, que los modelos de carga obtenidos en una misma sub-estación, en el mismo instante del día e igual estación no presentan mayores variaciones entre sí.

Adicionalmente, se presenta en (Ma, Zheng, Tang, & Dong, 2009) la validación del modelo compuesto (ZIP + motor de inducción de tercer orden) obtenido mediante mediciones de campo, en donde los autores concluyen que el tamaño de la perturbación incide en gran manera en la validez del modelo de carga para determinados análisis. Se emplea un algoritmo de identificación multi-curva para minimizar los efectos del ruido sobre los resultados.

A la fecha, se han publicado muchos artículos sobre modelado de carga compuesta; sin embargo, casi todos se fundamentan en ecuaciones de carga cuyos parámetros pueden ser estimados mediante ajuste de curvas, como ya se mencionó. Debido a la complejidad asociada con las actuales cargas electrónicas, en las cuales existe una relación no lineal entre la potencia con la tensión y la frecuencia, en (Keyhani, Lu, & Heydt, 2004) se propone un modelo compuesto de carga basado en redes neuronales recurrentes. Para lograr la adecuada representación del comportamiento de las cargas empleando redes neuronales, es preciso disponer de una base de datos extensa, y por esta razón los autores entrenan con datos de simulación, que se complementan posteriormente con mediciones en línea.

Una de las conclusiones relevantes acerca de la aplicación de las redes neuronales artificiales (RNA) sobre el modelado de cargas se encuentra en (Li, Wang, & Li, 2008), donde los autores señalan que no son adecuadas para describir las características dinámicas del modelo de carga

compuesto, debido a las características del algoritmo y a la estructura de la red. Por esto, los autores proponen un modelo de carga compuesto basado en la red artificial *Elman* con una estructura interna de realimentación.

Como ya se mencionó, una de las limitaciones que presenta el enfoque basado en mediciones es el esfuerzo computacional requerido en la estimación de modelos de carga que contengan una gran cantidad de parámetros, considerando además el tamaño actual de los sistemas de potencia y el número de cargas. El número de parámetros por determinar tiene un impacto significativo en la precisión de la metodología de estimación. Para resolver este problema, se han aplicado técnicas basadas en sensibilidad para determinar cuáles parámetros del modelo permanecen invariantes ante diversas perturbaciones, lo que permite reducir el número total de parámetros por identificar, mejorando la velocidad y precisión en la estimación como en (Xu, Si, & Qian, 2011) y (Ju, Qin, Wu, Xie, & Ning, 2011). En (Chen, Ju, Shao, & Wu, 2007) se propone la identificación de los parámetros de un modelo compuesto que comprende la red de distribución y la potencia de carga. Los autores concluyen que la constante de inercia tiene poco efecto sobre la estimación de los otros parámetros clave, en comparación con la reactancia de la red de distribución. En (Ju, y otros, 2007), los autores basados en análisis de sensibilidad del modelo de carga compuesto concluyen que los parámetros tales como porcentaje del motor en la carga total, reactancia de dispersión del estator y el deslizamiento inicial del rotor juegan un papel importante tanto en la dinámica del modelo como en la del sistema de potencia y, por tanto, es necesario estimarlos. En cambio, otros parámetros asociados al circuito del rotor o a la característica mecánica de la carga pueden considerarse constantes, debido a su poca influencia sobre la dinámica del motor, como se concluye en (Chen, y otros, 2010). Como una alternativa al esfuerzo computacional que representa la estimación de parámetros de un modelo de carga no lineal, en (Li, Xie, Yan, & Han, 2007)

se propone la utilización del modelo Volterra y de patrones de clasificación, para realizar una rápida identificación en línea de los parámetros dominantes de un modelo de carga compuesto. En el año 2008, mediante mediciones de campo (Ma, Han, He, Dong, & Hill, 2008), demuestra cómo reducir el número de parámetros a estimar para mejorar la eficiencia del modelo de carga, empleando el método de la perturbación para determinar las trayectorias de sensibilidad de los parámetros del motor equivalente. Un enfoque alternativo para la reducción de esfuerzo computacional se propone en (Guoping, Jun, & Xiangsheng, 2011), a partir de métodos de agrupamiento como el algoritmo *C means* difuso, para la clasificación de barras e identificación de modelos de carga. Como referencia reciente, en (Son, y otros, 2014), los autores determinan cuáles parámetros del modelo de carga compuesto pueden ser ajustados en valores fijos, mediante un análisis de sensibilidad basado en las matrices Hessianas necesarias para aplicar el método de Levenberg—Marquardt.

En el área de las microredes, en (Díaz, González, Gómez, & Díez, 2010), se analiza la influencia del modelo de carga compuesto en el comportamiento oscilatorio de las mismas; adicionalmente, se comparan los resultados con los obtenidos al considerar solo modelos de carga estáticos. Una de las conclusiones obtenidas en este artículo resalta la reducción que se presenta en el margen de cargabilidad de la microred al incluir motores de inducción en el modelo de carga.

Con la creciente penetración de energías renovables, la estructura de las redes de distribución se hace más dinámica y esto puede representar una mayor complejidad en el análisis de sistemas de gran dimensión. Como una alternativa a esto, en (Zali & Milanovic, 2013) se propone un modelo equivalente dinámico de estas redes, que presente características similares al sistema original y permita reducir el tamaño de las redes actuales para el caso de estudios específicos. La estructura del modelo equivalente dinámico seleccionada es un conjunto generador-convertidor (para representar

microturbinas o turbinas eólicas) en paralelo con un modelo de carga compuesto.

Por otra parte, la aplicación de algoritmos evolutivos no ha sido ajena a la obtención de los modelos de carga compuestos, debido a que han demostrado ser una herramienta útil para dar solución a problemas de optimización en otras áreas (McDonnell, Reynolds, & Fogel, 1995) (Yu & Gen, 2010) (Lee, Gonzales, Periaux, & Srinivas, 2011). Específicamente, para el modelado de carga compuesto se encuentran las siguientes referencias:

En (Ma, He, & Hill, 2006) se empleó una metodología híbrida entre algoritmos genéticos (AG) y el método de búsqueda Simplex, para determinar un conjunto óptimo de parámetros del modelo compuesto. Inicialmente, con el AG se obtienen unos valores óptimos de los parámetros iniciales y posteriormente se emplea el método de búsqueda Simplex para construir el modelo. En (Ma, He, & Hill, 2007) se utilizan los AG para estimar trece parámetros de un modelo de carga compuesto basado en mediciones, el cual fue comparado después con un modelo obtenido con el método de mínimos cuadrados no lineales. Con mediciones en el sistema de transmisión, se presenta en (Zhang & Bai, 2008) la obtención de modelos de carga compuestos. Como el problema de estimación de parámetros para este caso es no lineal, se emplea un método con algoritmos genéticos, en el cual se mejora la dirección de búsqueda óptima, la forma de mantener a los mejores individuos y una estrategia de emigración que permite evitar la convergencia a soluciones locales. Se comparan los resultados obtenidos respecto a los entregados con el método de Levenberg-Marquardt (LM). Los autores concluyen que se debe ser prudente con la propuesta realizada, ya que aunque los resultados numéricos entregados por el algoritmo genético son una buena aproximación, este requiere más tiempo computacional que el algoritmo LM. Para redes eléctricas a gran escala, se muestra en (Han, Ma, He, & Dong, 2009) el desarrollo de un modelo de carga basado en mediciones de campo. Inicialmente se hace una clasificación de los nodos para determinar la

ubicación adecuada de los dispositivos de medición. Después se estiman los parámetros de un modelo ZIP en paralelo con un motor de inducción, empleando un híbrido entre AG y método de búsqueda Simplex. El algoritmo genético se aplica inicialmente para determinar las regiones en las que se puede encontrar el óptimo (definido como el conjunto de parámetros) y posteriormente se emplea el método de búsqueda Simplex para determinar su valor. En (Choi, Chiang, & Yu, 2009) se muestra la estimación de los parámetros de un modelo de carga compuesto, mediante optimización basada en *Trust-Tech*. La estimación de parámetros se plantea como un problema de optimización no lineal con restricciones. Los autores concluyen que la metodología se puede aplicar exitosamente en la estimación de parámetros del modelo compuesto planteado, ya que la técnica permite obtener múltiples mínimos locales, de los cuales se puede determinar el valor óptimo. Los autores en (Choi & Chiang, 2009) proponen como alternativas al problema de múltiples soluciones que se pueden presentar, reducir el número de parámetros del modelo de carga (ZIP o exponenciales), mediante la formulación de un problema de programación cuadrática con restricciones lineales, más que como mínimos cuadrados no lineales. En (Wang, Han, & Ma, 2010) se hace un análisis de sensibilidad sobre los parámetros; aquellos más sensibles son identificados utilizando AG y los menos sensibles son ajustados a valores fijos.

Además de la aplicación de AG, se encuentran técnicas nuevas como el *Harmony Search Algorithm* que están siendo adaptadas para su aplicación al modelado de carga compuesta en redes de distribución (Alinejad, Akbari, & Kazemi, 2012). Por otra parte, debido a la disponibilidad de mediciones sincronizadas, se proponen nuevos enfoques en (Najafabadi & Alouani, 2012), para el desarrollo de modelos a partir de la estimación en línea, para suplir los problemas de la estimación convencional fuera de línea (requerimientos de esfuerzo computacional y memoria).

Como una aplicación de PSO (Particle Swarm Optimization) en la obtención de modelos de carga compuestos, se encuentra (Rodríguez, Perez, & Mora, 2013), en donde se propuso una modificación al algoritmo original, consiguiendo mejorar las soluciones obtenidas por este. El algoritmo genera una población inicial, la cual se desplaza a través del espacio de soluciones a partir de la información de las mejores soluciones encontradas por cada partícula y por el enjambre en su conjunto. Una dificultad del algoritmo PSO original es que las velocidades de desplazamiento de las partículas en el espacio de soluciones decrecen a medida que avanza el proceso iterativo; en este escenario, el algoritmo se enfoca en una búsqueda local; sin embargo, se limita para encontrar soluciones en regiones no exploradas. Por tanto, se implementa un mecanismo denominado *reinicio de velocidad*, que permite generar un conjunto nuevo de velocidades cuando estas son menores a una tolerancia, lo que finalmente ayuda al algoritmo a determinar posibles soluciones óptimas en otras regiones del espacio de soluciones.

Como referencias actuales se encuentra (Aree, 2014), en donde se presenta una metodología para incorporar las características no lineales de las cargas reales en el análisis de flujo de carga, mediante modelos compuestos. En contraste con el cálculo convencional de flujos de carga, en esta propuesta se obtienen mejores resultados debido al reajuste en forma separada de las potencias activa y reactiva de cada motor y carga estática, ante variaciones de tensión durante el proceso iterativo.

Por último, se aprecia en la revisión de la literatura un reciente interés por considerar el efecto de los motores de inducción en la estabilidad a corto plazo, debido a su rápida tendencia de restauración de potencia consumida ante un evento. Es así como en (Xu, y otros, 2014) se propone una metodología para determinar la ubicación óptima de compensación dinámica de reactivos, considerando cargas compuestas.

APLICACIÓN DE MODELADO DE CARGA COMPUESTA BASADO EN MEDICIONES

Desarrollo de un modelo de carga compuesto a partir de mediciones

Con el fin de validar la respuesta del modelo de carga compuesto, ampliamente analizada en la revisión bibliográfica de este artículo, en esta sección se presentan los resultados del modelo estimado, al utilizar los datos obtenidos de las simulaciones realizadas sobre el sistema IEEE de 30 barras (University of Washington, 1999). Con el fin de simular un efecto dinámico en la respuesta de la carga, el sistema IEEE de 30 barras se modifica mediante la inclusión de motores de inducción (con torque mecánico constante), en la barra 29 del sistema. Los parámetros del modelo de carga se estiman empleando el algoritmo mejorado de optimización por enjambre de partículas (PSO) presentado en (Rodríguez, Perez, & Mora, 2013) y explicado en la sección anterior. Para estimar los parámetros del modelo se utiliza la información de la magnitud y el ángulo de tensión, potencia activa y reactiva en la barra de carga, obtenidos en el caso de una falla trifásica de 200 ms en la línea

que conecta las barras 25 y 27. Se considera la presencia de ruido en las mediciones, con el fin de representar condiciones cercanas a las reales en los equipos de medición. La señal de ruido que se agrega es una señal aleatoria, generada mediante una distribución normal, la cual tiene media cero y desviación estándar de 0,005.

Los resultados de la estimación y su comparación con las mediciones de la respuesta de la carga se muestran en la figura 3. Para cuantificar el error en la estimación se emplea la ecuación (8).

$$error = \frac{1}{N} \left(\sum_{k=1}^N \left| \frac{x_{real}(k) - x_{estimado}(k)}{x_{real}(k)} \right| * 100\% \right) \quad (8)$$

Donde N es el número de muestras de la ventana de tiempo a analizar, $x_{real}(k)$ corresponde a la medición en el instante k y $x_{estimado}(k)$ corresponde a la estimación del modelo de carga en el instante k . Este indicador se calcula de manera independiente para la potencia activa y reactiva.

Los resultados de la estimación muestran que la respuesta del modelo de carga compuesto se ajusta de manera satisfactoria a los datos adquiridos del sistema de potencia, y la presencia de ruido en estos no presenta efectos considerables en la

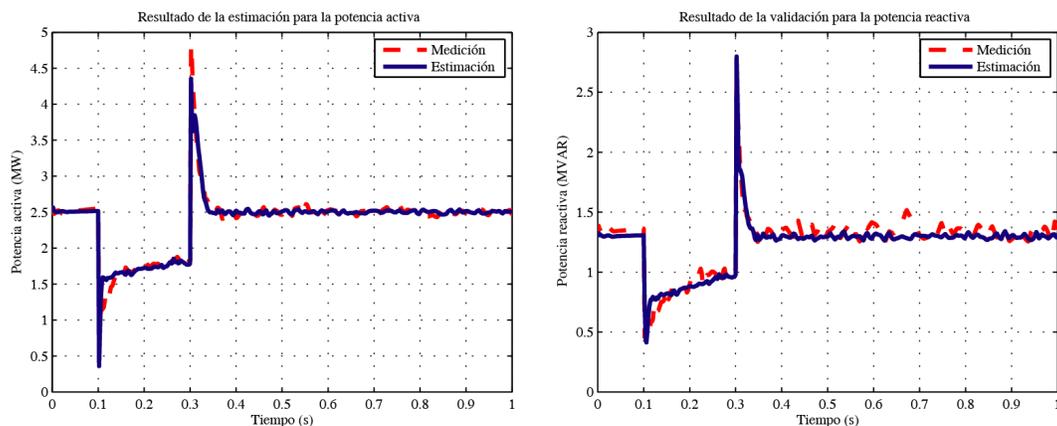


Figura 3. Resultado de la estimación para la potencia activa y reactiva usando el modelo compuesto.

Fuente: elaboración propia.

respuesta del modelo de carga. En la tabla 1 se presenta el conjunto de parámetros que se obtienen al final del proceso de optimización.

Para mostrar la importancia de la utilización de modelos dinámicos de carga, se propone a modo de comparación la estimación de un modelo de carga estático del tipo ZIP para emular la respuesta de la carga en la barra 29. Los resultados de la estimación se muestran en la figura 4 y el conjunto de parámetros obtenidos, en la tabla 2.

A diferencia del modelo de carga compuesta, el desempeño del modelo ZIP es deficiente para reproducir el comportamiento dinámico de la carga, específicamente en su parte transitoria, ya que la respuesta del modelo depende únicamente de la tensión instantánea del modelo de carga y no tiene en cuenta otros tipos de variables dinámicas que caracterizan las cargas. La tabla 3 presenta un comparativo del desempeño del modelo compuesto y el modelo ZIP empleando en la ecuación (8).

Tabla 1. Parámetros estimados para el modelo compuesto y error de estimación.

| Parámetro | R_s | X_s | X_m | R_r | X_r | H | T_0 | a_0 | a_2 | b_0 | b_2 |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Valor | 0,12492 | 0,14589 | 0,78523 | 0,15747 | 0,03199 | 0,00778 | 0,44229 | 0,02931 | 0,17106 | 1,17402 | 0,27570 |

Fuente: elaboración propia.

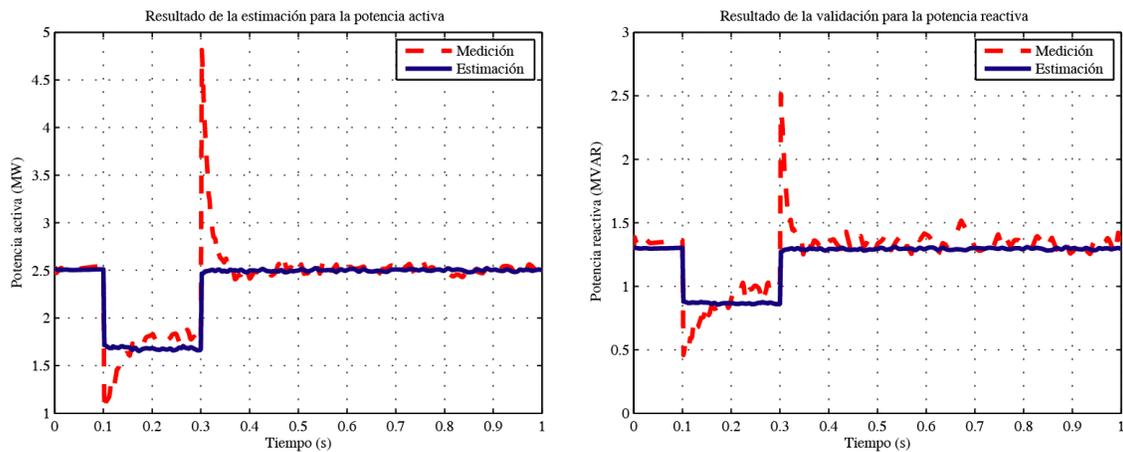


Figura 4. Resultado de la estimación para la potencia activa y reactiva usando el modelo ZIP.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Parámetros estimados para el modelo ZIP y error de estimación.

| Parámetro | a_0 | a_2 | b_0 | b_2 |
|-----------|------------|------------|-----------|------------|
| Valor | 0,20550106 | 0,00021584 | 0,4957375 | 0,50420803 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Comparación de errores de estimación entre modelo compuesto y modelo ZIP.

| | Modelo compuesto | Modelo ZIP |
|-------------------|-------------------------|-------------------|
| Potencia activa | 5,0980 % | 10,2926 % |
| Potencia reactiva | 6,3034 % | 13,5944 % |

Fuente: elaboración propia.

El indicador de error demuestra el resultado visualizado en la figura 4, en donde los errores en el modelo ZIP se duplican en comparación con el modelo compuesto, tanto para potencia activa como potencia reactiva. Esto confirma como ya se ha reportado en algunas referencias (Kundur, 1993), (Choi B.-K. , y otros, 2006), que la utilización del modelo ZIP no es apropiado para representar respuestas dinámicas significativas de la carga ante perturbaciones en el sistema.

Validación de la capacidad de generalización del modelo compuesto

Una de las principales preguntas que se hacen al obtener un modelo de carga está relacionada con su capacidad de generalización, es decir, si el modelo es válido para otras condiciones de operación diferentes a las cuales fue ajustado. Para analizar esta característica del modelo de carga compuesto obtenido, se hace una prueba de validación cruzada para comprobar la precisión del modelo. Se obtienen mediante simulación datos de la respuesta de la carga de la barra 29 en magnitud de tensión, ángulo de tensión, potencia

activa y potencia reactiva, ante 4 diferentes perturbaciones (falla trifásica, salida de transformador, pérdida de excitación de un generador y salida de línea). La prueba de validación cruzada se desarrolló de la siguiente manera.

Inicialmente se obtiene el modelo de carga utilizando el conjunto de datos de la primera perturbación. Una vez desarrollado el modelo, se valida su respuesta con los datos de las demás perturbaciones, obteniendo para cada caso un error de validación. El procedimiento se repite desarrollando el modelo con el siguiente conjunto de datos y luego validando su respuesta con los conjuntos de datos restantes. La tabla 4 resume los errores obtenidos durante el desarrollo de los modelos de carga con cada uno de los conjuntos de datos de perturbaciones.

En la tabla 4, los datos 1 y 3 corresponden a perturbaciones severas (falla trifásica y pérdida de excitación), mientras que los datos 2 y 4 corresponden a perturbaciones leves (salida de transformador y salida de línea). El ajuste del modelo es mejor cuando los efectos transitorios son suaves, como es el caso de las perturbaciones pequeñas; sin embargo, errores bajos no garantizan que el modelo responda satisfactoriamente ante diversas condiciones de operación, esto es, no garantiza su capacidad de generalización. En las tablas 5 y 6 se presentan los errores de validación cruzada para cada conjunto de datos de entrenamiento. Las filas representan los datos empleados para la obtención del modelo, y las columnas representan el error de validación del modelo con los otros conjuntos de datos.

Tabla 4. Errores de estimación en el entrenamiento para potencia activa y reactiva.

| | Datos 1 | Datos 2 | Datos 3 | Datos 4 |
|--------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Potencia activa | 2,1322149 | 0,74114368 | 6,83498064 | 0,07323944 |
| Potencia reactiva | 3,30730961 | 0,43700275 | 7,76004199 | 0,06123138 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Resumen de prueba de validación cruzada para la potencia activa.

| | Errores de validación cruzada | | | |
|-----------------|-------------------------------|------------|------------|------------|
| | Datos 1 | Datos 2 | Datos 3 | Datos 4 |
| Modelo 1 | - | 0,74379037 | 15,1383012 | 0,23793644 |
| Modelo 2 | 29,6720447 | - | 73,6895098 | 0,43863483 |
| Modelo 3 | 6,21731128 | 2,02123752 | - | 0,43629987 |
| Modelo 4 | 5,00922389 | 0,55579777 | 17,755908 | - |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Resumen de prueba de validación cruzada para la potencia reactiva.

| | Errores de validación cruzada | | | |
|-----------------|-------------------------------|------------|------------|------------|
| | Datos 1 | Datos 2 | Datos 3 | Datos 4 |
| Modelo 1 | - | 14,7292292 | 74,2718209 | 3,76716357 |
| Modelo 2 | 28,3867015 | - | 29,8524849 | 3,63057651 |
| Modelo 3 | 24,6317905 | 13,0677513 | - | 3,58974936 |
| Modelo 4 | 16,9809783 | 7,7344506 | 14,4729041 | - |

Fuente: elaboración propia.

De las tablas 5 y 6, se observa que los errores en los modelos obtenidos con datos de perturbación severa (modelos 1 y 3), cuando se validan con datos de perturbación leve (datos 2 y 4) son menores en comparación con la situación contraria, en donde los modelos desarrollados con datos de perturbación leve (modelos 2 y 4) se validan con datos de perturbación severa (datos 1 y 2). Esta afirmación se puede corroborar cualitativamente con los siguientes casos puntuales de las pruebas de validación. Inicialmente, se ilustra el caso de la validación con los datos de perturbación leve (conjunto de datos 4), cuando el modelo se obtiene con los datos de perturbación severa (conjunto de datos 1). La figura 5 muestra la respuesta en potencias activa y reactiva cuando se efectúa la salida de la línea 27-30; además se presenta la respuesta del modelo de carga. También se observa en este caso que la respuesta se ajusta de manera adecuada a los datos y la respuesta se aproxima al comportamiento transitorio de la carga.

Sin embargo, es importante analizar la situación contraria. Ahora se muestra el caso de la prueba de validación con una perturbación severa (conjunto de datos 3), cuando el modelo se obtiene con datos de una perturbación leve (conjunto de datos 4). La figura 6 presenta la respuesta del modelo de carga y del sistema, cuando se pierde la excitación del generador síncrono. En este caso, la perturbación es severa considerando la magnitud de la desviación en las potencias.

De acuerdo con las figuras anteriores, así como con los resultados de las tablas 5 y 6, es evidente que existen errores considerables entre los datos adquiridos del sistema con la respuesta del modelo de la carga. Debido a que el entrenamiento se hace con datos de una perturbación leve, el modelo de carga no captura el comportamiento dinámico que presenta la carga cuando las variaciones de tensión son severas. Por tanto, la validación presenta errores superiores en comparación con el caso anterior. A partir de la prueba de validación,

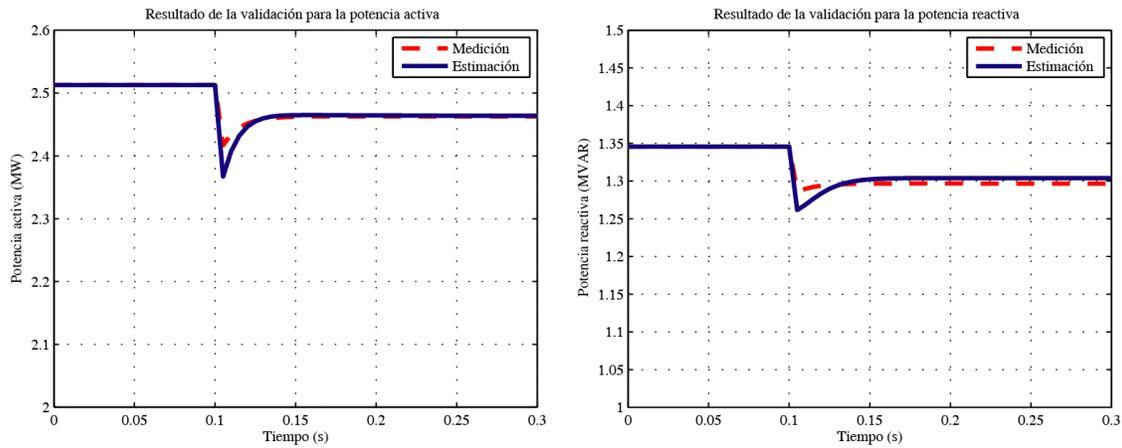


Figura 5. Resultado de la estimación para la potencia activa y reactiva usando el modelo compuesto ante perturbación leve.

Fuente: elaboración propia.

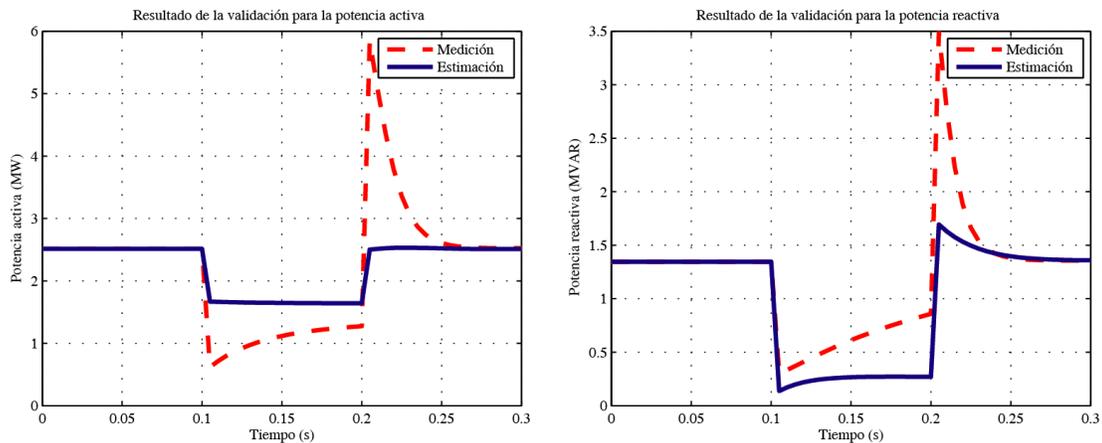


Figura 6. Resultado de la estimación para la potencia activa y reactiva del modelo compuesto ante perturbación severa.

Fuente: elaboración propia.

se destaca la importancia de la utilización de datos adecuados de la respuesta real de la carga en el sistema de potencia, con el fin de que el modelo represente mejor su comportamiento. Las mediciones por emplear dependen también de la estructura del modelo de carga, aunque en el caso del modelo compuesto es deseable utilizar mediciones de perturbaciones en donde las variaciones de tensión sean superiores a 20% de la tensión

nominal, de acuerdo con los resultados presentados en la tabla 4.

CONCLUSIONES

En este documento se presenta una recopilación de algunas de las metodologías utilizadas para la obtención de modelos de carga compuestos, con el fin de facilitar el análisis de las tendencias en

cuanto a enfoques y nuevas propuestas en la temática de estudio. Esta área de investigación, aunque ha sido tratada hace más de tres décadas, continúa vigente debido a que involucra características dinámicas y complejas del sistema de potencia y de su creciente necesidad de mejor representación de fenómenos físicos.

Como aporte adicional, se presentó un modelo compuesto basado en mediciones (datos obtenidos bajo simulación), que permite reproducir satisfactoriamente la respuesta de una carga dinámica ante una perturbación, comparativamente con un modelo estático. Posteriormente, se comprueba que la capacidad de generalización del modelo compuesto obtenido depende del tipo y magnitud de la perturbación que fue empleado para la estimación. Cuanto mayor sea la variación de tensión empleada en la estimación, el modelo presentará más posibilidades de representar las características de la carga bajo otras variaciones. Esta conclusión obliga a considerar una limitación que presentan los modelos de carga compuestos, que emplean las mediciones obtenidas en condiciones operativas normales y, por tanto, es preciso disponer de herramientas de monitorización permanente en el sistema para lograr capturar respuestas transitorias de mayor magnitud. Esto puede conseguirse mediante la utilización masiva de la información suministrada por los sistemas de monitorización de área amplia en los sistemas de potencia.

REFERENCIAS

- Abdelaziz, A.; Badr, M., & Younes, A. (Nov. 2007). Dynamic load modeling of an Egyptian primary distribution system using neural networks. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 29(9), 637-649.
- Abul'Wafa, A. (2012). A network-topology-based load flow for radial distribution networks with composite and exponential load. *Electric Power Systems Research*, 91, 37-43.
- Alinejad, B.; Akbari, M., & Kazemi, H. (2012). PMU-based distribution network load modelling using Harmony Search Algorithm. *Proceedings of 17th Conference on Electrical Power Distribution Networks*, pp. 1-6.
- Aree, P. (2014). Power Flow Computation Considering Nonlinear Characteristics of Composite Load Model. *Proceedings of the International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, pp. 1-4.
- Chen, D., & Mohler, R. (July 2003). Neural-Network-Based Load Modeling and its Use in Voltage Stability Analysis. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 11(11), 460-470.
- Chen, Q.; Ju, P.; Shao, Z.-Y., & Wu, F. (2007). Electrical Load Modeling with Considering Distribution Network. *Proceedings of 2007 iREP Symposium Bulk Power System Dynamics and Control*, pp. 1-6.
- Chen, Q.; Ju, P.; Shi, K.; Tang, Y.; Shao, Z., & Yang, W. (2010). Parameter estimation and comparison of the load models with considering distribution network directly and indirectly. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 32(9), 965-968.
- Choi, B., & Chiang, H. (May 2009). Multiple Solutions and Plateau Phenomenon in Measurement-Based Load Model Development: Issues and Suggestions. *IEEE Transactions on Power Systems*, 24(2), 824-831.
- Choi, B.; Chiang, H., & Yu, D. (2009). Trust-Tech based Parameter Estimation and its Application to Power System Load Modeling. *Proceedings of IEEE PES General Meeting*. Calgary.
- Choi, B.; Chiang, H.; Li, Y.; Li, H.; Chen, Y.; Huang, D., & Lauby, M. (Aug. 2006). Measurement-based Dynamic Load Models: Derivation, Comparison and Validation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 21(3), 1276-1283.
- Choi, B.-K.; Chiang, H.-D.; Li, Y.; Chen, Y.-T.; Huang, D.-H., & Lauby, M. (2006). Development of Composite Load Models of Power Systems using On-line Measurement Data. *Proceedings of IEEE PES General Meeting*. Montreal.
- De Tuglie, E.; Patrono, G., & Torelli, F. (2005). A sensitivity-based approach for static and dynamic load

- parameter estimation. *Proceedings of IEEE Russia Power Tech*. St. Petersburg.
- Department of Energy and Climate Change (DECC). (2010). *Energy Trends: Electricity and Electricity Consumption in the UK*. National Statistics Publications.
- Diaz, G.; González, C.; Gómez, J., & Diez, A. (2010). Composite Loads in Stand-Alone Inverter-Based Microgrids-Modeling Procedure and Effects on Load Margin. *IEEE Transactions on Power Systems*, 25(2), 894-905.
- General Electric Company (1987). *EPRI Final Report EL-5003: Load modeling for powerflow and transient stability computer studies*.
- Guoping, S.; Jun, L., & Xiangsheng, L. (2011). Load clustering and synthetic modeling based on an improved fuzzy C means clustering algorithm. *Proceedings of 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, pp. 859-865. Shandong.
- Han, D.; Ma, J.; He, R.-M., & Dong, Z.-Y. (2009). A Real Application of Measurement-Based Load Modeling in Large Scale Power Grids and Its Validation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 24(4), 1756-1764.
- He, R.-M.; Ma, J., & Hill, D. (May 2006). Composite Load Modeling via Measurement Approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, 21(2), 663-672.
- IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performances. (May 1993). Load representation for dynamic performance analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, 8(2), 472-482.
- IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performances. (Feb. 1995a). Bibliography on load models for power flow and dynamic performance simulation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 10(1), 523-538.
- IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performances. (Aug. 1995b). Standard Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1302-1313.
- Ju, P.; Qin, C.; Wu, F.; Xie, H., & Ning, Y. (2011). Load modeling for wide area power system. *Electrical Power and Energy Systems*, 33, 909-917.
- Ju, P.; Wu, F.; Shao, Z.-Y.; Zhang, X.-P.; Fu, H.-J.; Zhang, P.-F.; . . . Han, J.-D. (Sept. 2007). Composite load models based on field measurements and their applications in dynamic analysis. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 1(5), 724-730.
- Kalesar, B., & Seifi, A. (2010). Fuzzy load flow in balanced and unbalanced radial distribution systems incorporating composite load model. *Electrical Power and Energy Systems*, 17-23.
- Kao, W. (Aug. 2001). The Effect of Load Models on Unstable Low-Frequency Oscillation Damping in Taipower System Experience w/wo Power System Stabilizers. *IEEE Transactions on Power Systems*, 16(3), 463-472.
- Keyhani, A.; Lu, W., & Heydt, G. (2004). Composite Neural Network Load Models for Power System Stability Analysis. *Proceedings of IEEE Power Systems Conference & Exposition*, pp. 1159-1163.
- Knyazkin, V.; Cañizares, C., & Söder, L. (May 2004). On the Parameter Estimation and Modeling of Aggregate Power System Loads. *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(2), 1023-1031.
- Kosterev, D., & Meklin, A. (2006). Load Modeling in WECC. *Proceedings of Power Systems Conference and Exposition PSCE*, pp. 576-581.
- Kosterev, D.; Meklin, A.; Undrill, J.; Lesieutre, B.; Price, W.; Chassin, D., . . . Yang, S. (2008). Load Modeling in Power System Studies: WECC Progress Update. *Proceedings of PES General Meeting*, pp. 1-8.
- Kosterev, D.; Taylor, C., & Mittelstadt, W. (Aug. 1999). Model validation for the August 10, 1996 WSCC system outage. *IEEE Transactions on Power Systems*, 14(3), 967-979.
- Kundur, P. (1993). *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill.
- Lee, D.; Gonzales, L.; Periaux, J., & Srinivas, K. (Apr. 2011). Efficient hybrid-game strategies coupled to evolutionary algorithms for robust multidisciplinary design optimization in aerospace engineering. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 15(2), 133-150.
- Li, L.; Xie, X.; Yan, J., & Han, Y. (2007). Fast Online Identification of the Dominant Parameters of Composite Load Model Using Volterra Model and Pattern

- Classification. *Proceedings of IEEE PES General Meeting*, pp. 1-8.
- Li, X.; Wang, L., & Li, P. (2008). The Study on Composite Load Model Structure of Artificial Neural Network. *Proceedings of 3rd International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*. Nanjing, pp. 1564-1570.
- Ma, J.; Han, D.; He, R.-M.; Dong, Z.-Y., & Hill, D. (2008). Reducing Identified Parameters of Measurement-Based Composite Load Model. *IEEE Transactions on Power Systems*, 23(1), 76-83.
- Ma, J.; He, R., & Hill, D. (May 2006). Load Modeling by Finding Support Vectors of Load Data from Field Measurements. *IEEE Transactions on Power Systems*, 21(2), 726-735.
- Ma, J.; He, R.-M., & Hill, D. (2007). Measurement-based Load Modeling using Genetic Algorithms. *Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp. 2909-2916.
- Ma, J.; Zheng, X.-Y.; Tang, Y.-H., & Dong, Z.-Y. (2009). Validating Measurement-Based Composite Load Model. *Proceedings of 8th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management*, pp. 1-6.
- Maitra, A.; Gaikwad, A.; Pourbeik, P., & Brooks, D. (2008). Load Model Parameter Derivation Using an Automated Algorithm and Measured Data. *Proceedings of IEEE PES Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, pp. 1-7.
- Mauricio, W., & Semlyen, A. (Nov. 1972). Effect of load characteristics on the dynamic stability of power systems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 14(3), 2295-2304.
- McDonnell, J.; Reynolds, J., & Fogel, D. (1995). *Special Session on Applications of evolutionary computation to biology and biochemistry*. MIT Press.
- Milanovic, J.; Yamashita, K.; Martinez, S.; Djokic, S., & Korunovic, L. (Aug. 2013). International Industry Practice on Power System Load Modeling. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(3).
- Najafabadi, A., & Alouani, A. (2012). Real time estimation of sensitive parameters of composite power system load model. *Proceedings of 2012 IEEE Power and Energy Society Transmission and Distribution Conference and Exposition*. Orlando, pp. 1-8.
- Nozari, F.; Kankam, M., & Price, W. (Nov. 1987). Aggregation of Induction Motors for Transient Stability Load Modeling. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2(4), 1096-1103.
- Ornata, T., & Uemura, K. (Nov. 1998). Aspects of Voltage Responses of Induction Loads. *IEEE Transactions on Power Systems*, 13(4), 1337-1344.
- Peng, W.; Yan-hong, W.; Guo-qiang, H., & Rui, M. (2005). Study on the Reduction of Identified Parameters of the Power Load's Aggregated Motor Model with the Aim of Sustaining Its Representability. *Proceedings of IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific*.
- Pereira, L.; Kosterev, D.; Mackin, P.; Davies, D.; Undrill, J., & Zhu, W. (Nov. 2002). An Interim Dynamic Induction Motor Model for Stability Studies in the WSCC. *IEEE Transactions on Power Systems*, 17(4), 1108-1115.
- Rifaat, R. (2004). On Composite Load Modeling for Voltage Stability and Under Voltage Load Shedding. *Proceedings of IEEE PES General Meeting*, pp. 1603-1610.
- Rodriguez, L.; Perez, S., & Mora, J. (2013). Particle Swarm Optimization applied in Power System Measurement-Based Load Modeling. *Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp. 2368-2375. Cancún.
- Shi, G.; Peng, G., & Liu, X. (2012). Comparative Research on Power Load Modeling Method in Power Electrical System. *Proceedings of Fifth International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA)*, pp. 455-458.
- Shi, J., & He, R. (2003). Measurement-based load modeling-model structure. *Proceedings of IEEE Power-Tech Conference*. Bologna.
- Son, S.; Lee, S.; Choi, D.; Song, K.; Park, J.; Kwon, Y., . . . Park, J. (2014). Improvement of Composite Load Modeling Based on Parameter Sensitivity and Dependency Analyses. *IEEE Transactions on Power Systems*, 242-250.

- Song, J.; Cotilla-Sanchez, E., & Brekken, T. (2013). Load Modeling Methodologies for Cascading Outage Simulation Considering Power System Stability. *1st IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech)*, pp. 78-85.
- University of Washington. (1999). *Electrical Engineering*. Obtenido de <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>
- Wang, J.; Han, M., & Ma, J. (2010). A New Identification Strategy for Improving Convergence Stability of Load Model Parameters. *Proceedings of International Conference on Electrical and Control Engineering*, pp. 45-148.
- Wang, J.; Jiang, H.; Chang, C., & Liu, A. (Feb. 1994). Development of a frequency-dependent composite load model using measurement approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, 9(3), 1546-1556.
- Wang, J.; Li, X.; Su, S., & Xia, X. (2006). Research on Dynamic Load Modeling Using Back Propagation Neural Network for Electric Power System. *Proceedings of International Conference on Power System Technology*, pp. 1-4.
- Wei-guo, W.; Ren-mu, H., & Tie-Qiang, W. (2002). The induction motor model to reflect dynamic mechanism of synthetic load. *Automation of Electric Power Systems*, 26(4), 23-27.
- Wen, J.; Jiang, L.; Wu, Q., & Cheng, S. (2003). Power System Load Modeling by Learning Based on System Measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18(2), 364-371.
- Wu, Q.; Wen, J.; Nuttall, K.; Shimmin, D., & Cheng, S. (2003). Power System Load Modeling by Evolutionary Computation Based on System Measurements. *Electric Power Components and Systems*, 31(5), 423-439.
- Xin-ran, L.; Ren-mu, H., & Zhou, W. (1999). The General Induction Motor Model and its description ability for synthetic loads for electric power system. *Journal of North China Electric Power University*, 26(1).
- Xu, Y.; Dong, Z.; Meng, K.; Yao, W.; Zhang, R., & Wong, K. (2014). Multi-Objective Dynamic VAR Planning Against Short-Term Voltage Instability Using a Decomposition-Based Evolutionary Algorithm. *IEEE Transactions on Power Systems*, 29(6), 2813-2822.
- Xu, Y.; Si, D., & Qian, Y. (2011). Research on Feasibility of Composite Load Modeling Based on WAMS. *Proceedings of 2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, pp. 1-4. Wuhan.
- Yu, X., & Gen, M. (2010). *Introduction to Evolutionary Algorithms (Decision Engineering)*. London: Springer-Verlag.
- Zali, S., & Milanovic, J. (2013). Generic Model of Active Distribution Network for Large Power System Stability Studies. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(3), 3126-3133.
- Zhang, P., & Bai, H. (2008). Derivation of Load Model Parameters using Improved Genetic Algorithm. *Proceedings of International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, pp. 970-977.





Formulations to overcome the divergence of iterative method of fixed-point in nonlinear equations solution

Formulaciones para superar la divergencia del método de iteración de punto fijo en la solución de ecuaciones no lineales

Wilson Rodríguez Calderón*, Myriam Rocío Pallares-Muñoz**

Fecha de recepción: 25 de febrero de 2014

Fecha de aceptación: 19 de enero de 2015

Citation / Para citar este artículo: Rodríguez Calderón, W., & Pallares Muñoz, M. R. (2015). Formulations to overcome the divergence of iterative method of fixed-point in nonlinear equations solution. *Revista Tecnura*, 19(44), 191-199. doi:<http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.2.a14>

Abstract

When we need to determine the solution of a nonlinear equation there are two options: closed-methods which use intervals that contain the root and during the iterative process reduce the size of natural way, and, open-methods that represent an attractive option as they do not require an initial interval enclosure. In general, we know open-methods are more efficient computationally though they do not always converge. In this paper we are presenting a divergence case analysis when we use the method of fixed point iteration to find the normal height in a rectangular channel using the Manning equation. To solve this problem, we propose applying two strategies (developed by authors) that allow to modifying the iteration function making additional formulations of the traditional method and its convergence theorem. Although Manning equation is solved with other methods like Newton when we use the iteration method of fixed-point an interesting divergence situation is presented which can be solved with a convergence higher than quadratic over the initial iterations. The proposed strategies have been tested

in two cases; a study of divergence of square root of real numbers was made previously by authors for testing. Results in both cases have been successful. We present comparisons because are important for seeing the advantage of proposed strategies versus the most representative open-methods.

Keywords: divergence, fixed point, linear convergence, open methods, quadratic convergence, root equations.

Resumen

Cuando se requiere encontrar la solución de una ecuación no lineal existen dos grandes alternativas: los métodos cerrados que usan intervalos que contienen la raíz y durante su proceso iterativo reducen su tamaño de manera natural, y los métodos abiertos que son una buena opción por no requerir un intervalo inicial que la encierre. En general, se sabe que los métodos abiertos son más eficientes computacionalmente aunque no siempre convergen. Este trabajo presenta el estudio de uno de los casos de divergencia cuando se usa el método abierto de iteración de punto fijo; se trata de una

* Civil Engineer, Master on Numerical Methods in Engineering, Universidad Cooperativa de Colombia, Bogotá, Colombia. Contact: wilson.rodri-guezca@campusucc.edu.co

** Civil engineer, Master on Numerical Methods in Engineering, Surcolombiana University, Neiva, Colombia. Contact: myriam.pallares@usco.edu.co

aplicación típica de hidráulica de canales cuando se requiere calcular el tirante normal en un canal rectangular haciendo uso de la fórmula clásica de Manning. Para solucionar el problema de divergencia se proponen dos estrategias (desarrolladas por los autores) que permiten modificar la función de iteración realizando formulaciones adicionales que parten del método original y su teorema de convergencia. Aunque la ecuación de Manning se resuelve con otros métodos como el de Newton, cuando se usa el de iteración de punto fijo se presenta una situación interesante de divergencia que puede

solucionarse y además obtener convergencia superior a la cuadrática en las iteraciones iniciales. Situaciones de divergencia monótonica como la que se presenta en este artículo han sido estudiadas con las estrategias propuestas con resultados satisfactorios. En el artículo se presentan comparaciones para reconocer las ventajas de las estrategias propuestas frente a los métodos abiertos más representativos.

Palabras clave: convergencia cuadrática, convergencia lineal, divergencia, métodos abiertos, punto fijo, raíces de ecuaciones.

INTRODUCTION

When we want to determine the roots or zeros of an equation, that is, values of x which cause $f(x) = 0$, it is possible using two ways: analytical direct methods that are restricted to particular cases such as classical quadratic equation, or numerical methods which covering a broad spectrum, for example, solving algebraic equations, transcendental and polynomial. In general, there are two philosophies work for finding roots of equations: closed and open methods (Akai, 2004) (Nakamura, 1997) (Chapra & Canale, 2007).

Intervals that enclose or contain the root are used by closed methods. These methods reduce the work interval using a particular criterion for each method; such is the case of the bisection methods and false position or false rule. These methods perform so well, however, we know their convergence is too slow even in some cases is deficient. Therefore, we cannot generalize about the benefits of a method over another. Rather than have a large battery of methods that can be used in case of failure or improper behavior of convergence. There is also the possibility of finding new methods including modifications to existing.

Iterations of closed methods always generate approximations ever closer to the root; therefore, we say they are convergent because they are

progressively closer to the root as they advance calculation cycles. Meanwhile, the open methods are based on iteration formulas requiring only a starting point or pair of values that need not necessarily enclose the root. This quality provides important advantages; however, a difficulty arises that is related to the divergence of the methods, so it is necessary to plan alternatives to face the problem, especially when we know it is worth doing, since, in general, when the open methods converge, they do so more quickly than closed methods (Press, Teukolski, & Vetterling, 2012).

Open methods using a general strategy of successive substitutions. Examples of these methods are Newton, Secant and the method of fixed point iteration. On this last method the attention of this article focuses, as there is a whole mystique around the divergence of this method and the alternatives for improvement (Heath, 2002). Perhaps the easiest way to overcome this divergence is another method but worth undertaking efforts to get it to work, as its advantages of simplicity and flexibility make it an interesting method for apply in real cases.

METHODOLOGY

The term "*method of successive substitutions*" refers to a broad class of iterative schemes for nonlinear

equations. However, the interest of this work focuses on the method of fixed point iteration.

If starting the basic equation $f(x) = 0$ may be written as equation (1),

$$x = g(x) \quad (1)$$

so we could write an iterative scheme in terms of equation (2),

$$x_{i+1} = g(x_i) \quad (2)$$

where the iteration index $i = 0, 1, 2, \dots$ and x_0 is the initial estimate of the root. This method is called fixed point iteration and its great advantage is the simplicity and the flexibility to choose the form of

$g(x)$. However, it has serious difficulties in cases where the iterative formula does not always converge for $g(x)$ chosen arbitrarily.

To ensure convergence of the iterative scheme for the interval containing the root, $|g'(x)| < 1$ condition must be satisfied.

Figures 1 to 4 illustrate how $g'(x)$ affects the convergence of the method such that: if $0 < g'(x) < 1$ is asymptotic convergence, and if $-1 < g'(x) < 0$ is oscillatory convergence. Otherwise, the method diverges. By extension of this analysis it can be demonstrated that the convergence speed increases as $g'(x)$ approaches zero.

Resolving divergences shown in figures 3 and 4 is interesting. For this, two strategies which are applied to a particular case are proposed.

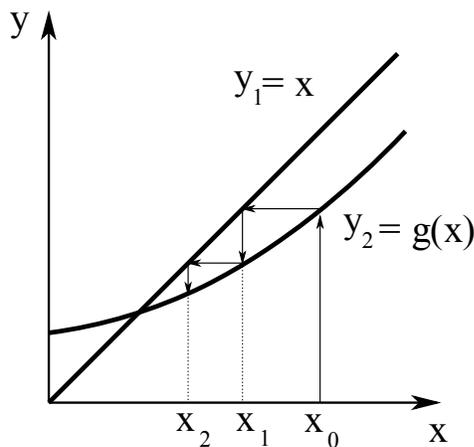


Figure 1. Convergence for $0 < g'(x) < 1$ (monotone behavior).

Source: own work.

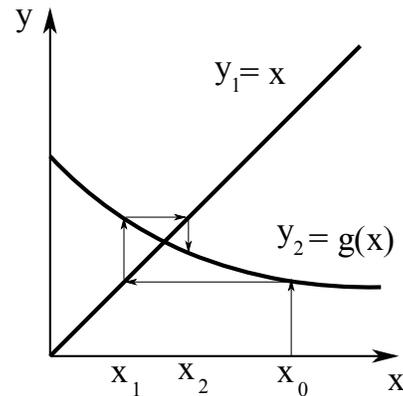


Figure 2. Convergence for $-1 < g'(x) < 0$ (oscillatory behavior).

Source: own work.

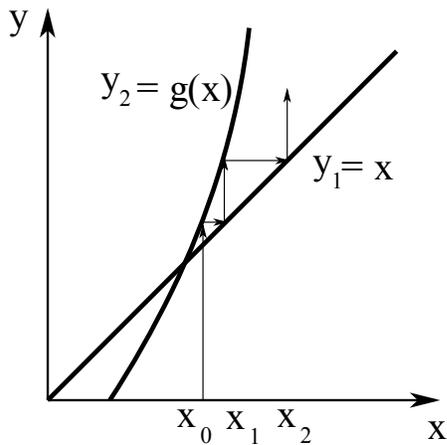


Figure 3. Divergence for $g'(x) > 1$ (monotone behavior).

Source: own work.

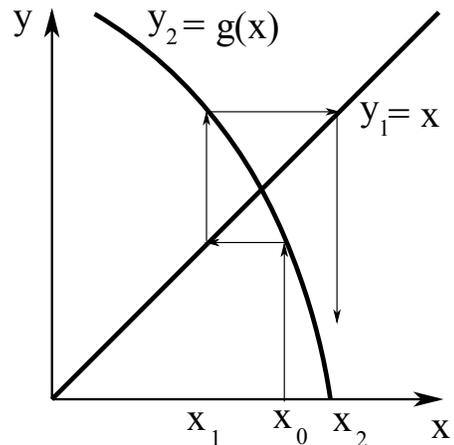


Figure 4. Divergence for $g'(x) < -1$ (oscillatory behavior).

Source: own work.

Proposed strategies

Strategy number 1. Nonorthogonal linesearch

Based on the case of figure 3, we propose use non-orthogonal linesearch instead using the search orthogonal directions as in the method of fixed-point iteration. This strategy should aim to generate a convergent iterative scheme.

From figure 5 we can observe graphically that the strategy in principle has the possibility to converge and that the proposed method can enclose to the root at least intuitively (intersection of y_1 and y_2) as shown.

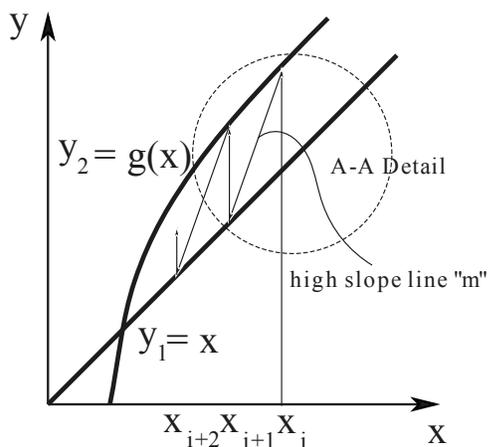


Figure 5. Convergence of nonorthogonal linesearch strategy (monotone behavior).

Source: own work.

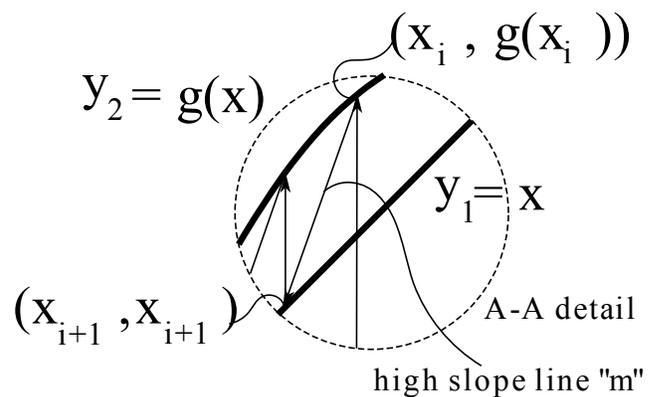


Figure 6. A-A detail.

Source: own work.

From figure 6 an expression for m is obtained in the form of equation (3),

$$m = \frac{x_{i+1} - g(x_i)}{x_{i+1} - x_i} \quad (3)$$

Starting from equation (3) it is possible to get x_{i+1} by means of the equation (4),

$$x_{i+1} = \frac{mx_i - g(x_i)}{m-1} \quad (4)$$

Equation (4) represents the generalized iteration formula to overcome the problems of divergence in the cases of figures 3 and 4, according to the following recommendations:

1) If a positive value m (figure 3) is required, we must use $m > 1$, preferably beginning to test values $m = 2, 3, \dots$. If a positive value m (figure 3) is required, use $m > 1$, preferably beginning to test values $m = 2, 3, \dots$, because we must search a high slope higher than the slope of y_1 line ($m = 1$) and large enough to cross the line y_1 in a point before the intersection between y_1 and y_2 , as shown in figure 6.

2) If a negative value m (figure 4) is required, we must use $m \leq 1$, preferably beginning to test with values $m = -1, -2, -3, \dots$, because a high slope must be found. In this case using linesearch with slope $m = -1$ is not prohibited because these would be perpendicular to y_1 , therefore, intersection with y_1 is guaranteed.

These two recommendations have been drawn from simple approaches and have been implemented in several examples to establish its performance.

Strategy number 2. Rotation of reference system XY and determination of iteration formulas in the new system (Strategy of rotated axes)

In this case we take an arbitrary point (x, y) in the coordinate system XY and we seek a relationship with the coordinates of the point in a system rotated an angle θ .

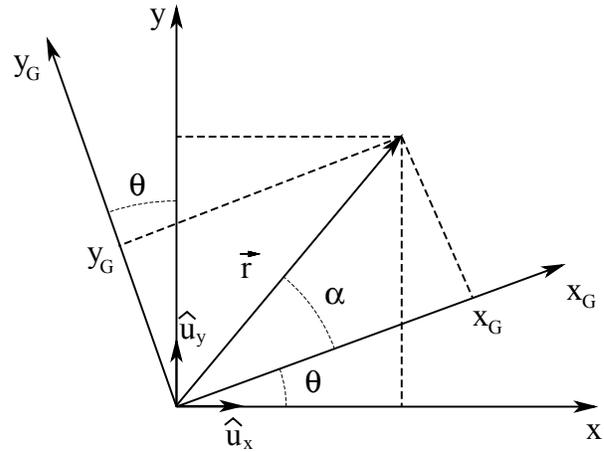


Figure 7. Transforming orthogonal coordinate system.

Source: own work.

According to figure 7 we can see that vector ' r ' can be represented by equation (5).

$$\vec{r} = x_G \vec{i} + y_G \vec{j}, \quad (5)$$

and the unit vectors u_x and u_y are expressed by equations (6) and (7) respectively.

$$\hat{u}_x = (\cos \theta) \vec{i} - (\sin \theta) \vec{j} \quad (6)$$

$$\hat{u}_y = (\sin \theta) \vec{i} + (\cos \theta) \vec{j}. \quad (7)$$

Equations (8) and (9) are obtained from the projection of a vector,

$$x = \vec{r} \cdot \hat{u}_x \quad (8)$$

$$y = \vec{r} \cdot \hat{u}_y \quad (9)$$

Equations (10) and (11) are obtained operating appropriately,

$$x = (\cos \theta) x_G - (\sin \theta) y_G \quad (10)$$

$$y = (\text{sen } \theta)x_G + (\text{cos } \theta)y_G. \quad (11)$$

Writing equations (10) and (11) in matrix form, the system of equations (12) is obtained.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{cos } \theta & -\text{sen } \theta \\ \text{sen } \theta & \text{cos } \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_G \\ y_G \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Establishing the inverse relationship in the form of equation (13) is possible because they are orthogonal systems.

$$\begin{bmatrix} x_G \\ y_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{cos } \theta & \text{sen } \theta \\ -\text{sen } \theta & \text{cos } \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Equations (14) and (15) are obtained when we apply an arbitrary point on the line

$$x = \frac{x_G}{\text{cos } \theta + \text{sen } \theta}, \quad (14)$$

$$y = \frac{y_G}{\text{cos } \theta - \text{sen } \theta}. \quad (15)$$

Knowing that equations (14) and (15) correspond to the line $y = x$ we can establish relationships between x_G and y_G in the rotated system through matching. Equation (16) demonstrates this consideration.

$$\frac{x_G}{\text{cos } \theta + \text{sen } \theta} = \frac{y_G}{\text{cos } \theta - \text{sen } \theta} \quad (16)$$

Solving for x , equation (17) is obtained.

$$x_G = y_G \frac{\text{cos } \theta + \text{sen } \theta}{\text{cos } \theta - \text{sen } \theta} \quad (17)$$

However, if the classic strategy of root finding for method of fixed point iteration is developed in the rotated system, we have $y_{Gi+1} = g(x_{Gi})$, where the superscripts indicate the iteration and the subscripts indicate the reference coordinate system. An iteration formula is obtained when we apply this reasoning to equation (17). This expression can be used in the rotated system also in the original system using equation (10).

Equation (18) shows the final iteration expression obtained in the coordinate system when is rotated an angle ' θ '.

$$x_G^{i+1} = g(x_G^i) \left[\frac{\text{cos } \theta + \text{sen } \theta}{\text{cos } \theta - \text{sen } \theta} \right]. \quad (18)$$

The factor in square brackets can be set as a constant called FT because the angle A is a constant. So the expression (18) can be simplified and we can get the equation (19).

$$x_G^{i+1} = FT * g(x_G^i). \quad (19)$$

The results of equation (19) can be transferred to the XY system to get the value of the root, even if $g(x)$ does not meet the convergence condition described above; however, when we moved to the system rotated coordinate we are doing a transformation and a reformulation and this allows convergence.

RESULTS AND DISCUSSION

In order to present evidence about the performance of the proposed methods we developed one of the cases where we found divergence problems with the method of fixed point iteration. This is the Manning equation that is a problem where the analyst solves the normal height in rectangular open-channel-flow.

The starting equation is of the form described by equation (20):

$$f(x) = 0 = AR_h^{2/3} - \frac{Qn}{\sqrt{S_0}} \quad (20)$$

In (20) equation (20), A is the channel area; also $A = bx$, where b is the base of channel and x is the normal height. Meanwhile:

$Q =$ channel flow

$$R_h = \frac{bx}{b + 2x} = \text{hydraulic radius}$$

S_0 = channel slope

N = Manning coefficient rugosity

In general, Q , n and S_0 are constants. One particular solution for this equation is obtained when $Q = 5\text{m}^3/\text{s}$, $n = 0.015$, $S_0 = 0.003$, $b = 3\text{ m}$.

Equation (21) provides $g(x)$ in general form as $g(x) = f(x)+x$, so,

$$g(x) = \frac{3^{2/3} x^{5/3}}{(2x + 3)^{2/3}} - 0.4564 + x \quad (21)$$

Using previous testing by Newton's method we can get the root $x = 0.7323$. Substituting this value in the scheme of fixed-point iteration we can know $g(x)$ is divergent and therefore, seeking a solution to the problem is necessary.

The results of the two proposed strategies are described. The implementation of the formulations was developed in a spreadsheet.

The most interesting analysis that can probably be done is the convergence curve vs. other classical methods mentioned in the introduction that

can be reviewed in references (Mathews & Fink, 2011), (Burden & Faires, 2011). Figures 8 and 9 show these curves, these are used as a performance comparison of the methods.

The methods exhibit similar behavior in the convergence when we use the approximate error which is calculated at an each iteration taking the value of the previous iteration. Comparison is important to look over the advantage of proposed strategies versus the most representative methods.

Figure 8 shows how the two alternatives evaluated far exceed the speed of convergence of the methods of bisection and False Rule.

We can see that the proposed alternatives exceed the convergence of Secant method and Newton's method in the first iterations. Note these methods are known for having high speed of convergence. However, in the end, Newton's method exhibits lower relative error than the proposed strategies, although the orders of magnitude of the errors are very low. So, we can say that the proposed strategies are very competitive.

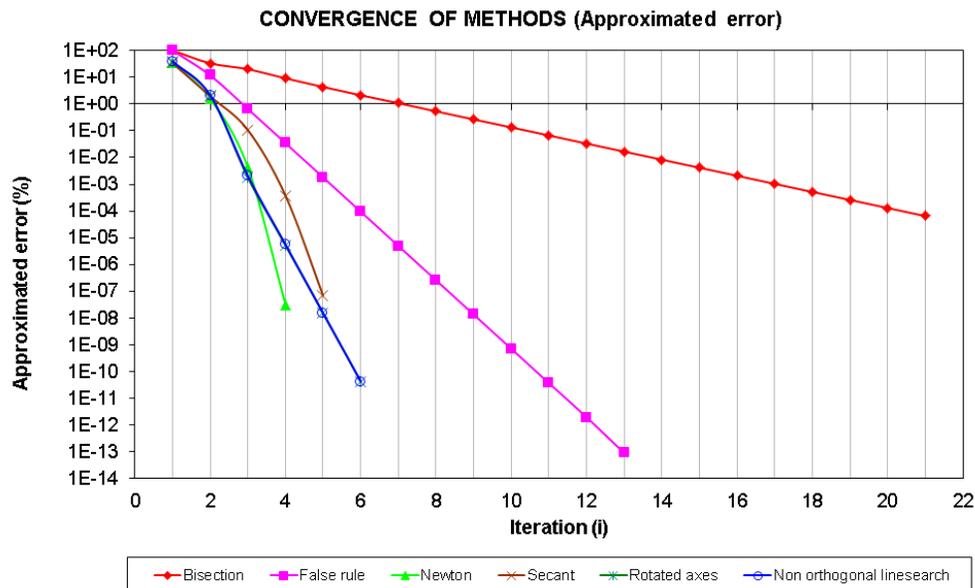


Figure 8. Comparison of convergence of the strategies evaluated with classical methods (calculations are based on the estimated error).

Source: own work.

Similar situation is presented when $g(x)$ is the function who allows getting the square root of a number. A study of divergence in this case was made previously by authors for testing about the proposed strategies.

The behavior of the nonorthogonal linesearch strategy is explained by figure 9.

Figure 9 indicates that event of divergence reported in figure 3 is presented when $m = 0$, however, when we use $m = 1.5$ the curvature is inverted.

Meanwhile, the curve $g(x)$ tends to become straight and nearest to line $y = x$ when higher values of 'm' are used. We can say, there is an optimum value of 'm' (in present case is 1,9) which was used for the calculation. The reason is, insofar as $g(x)$ tends to have horizontal slope in the vicinity of the fixed point (that is, it tends to the root of $f(x)$) the optimum condition of iteration fixed point ($g'(x) = 0$) is reached.

In table 1 the results of the first four iterations of the methods are recorded.

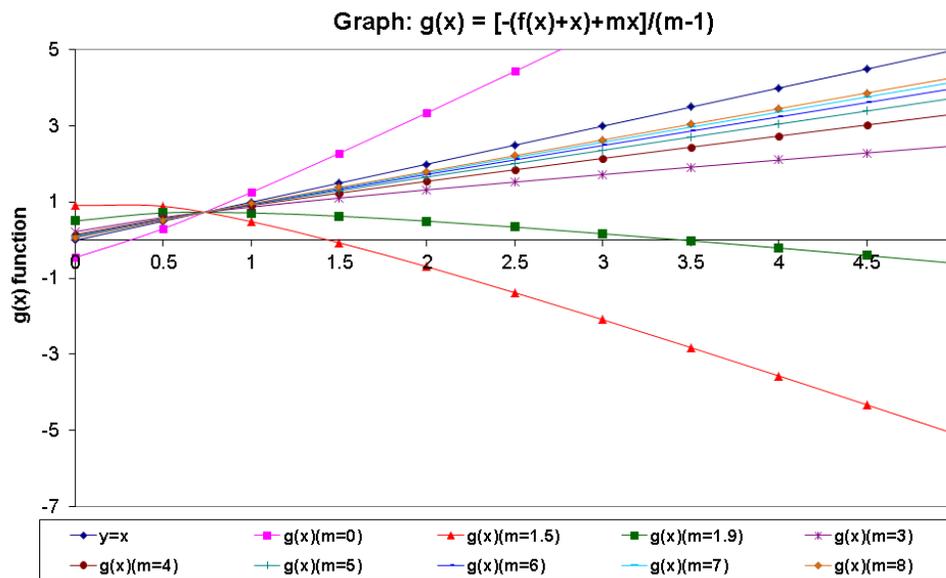


Figure 9. $g(x)$ function using different values of parameter 'm'. Nonorthogonal linesearch strategy.

Source: own work.

Table 1. Results of strategies compared to the Newton method. (exact value =1.4142135623731)

| Iteration | Nonorthogonal linesearch (m=1.9) | Rotated axes ($\theta=62.24^\circ$) | Newton |
|-----------|----------------------------------|---------------------------------------|-------------|
| 0 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0,716690377 | 0,71665341 | 0,743979367 |
| 2 | 0,732251608 | 0,732253468 | 0,732298616 |
| 3 | 0,73226679 | 0,732266787 | 0,732266749 |
| 4 | 0,732266749 | 0,732266749 | 0,732266749 |

Source: own work.

CONCLUSIONS

From the results in table 1 we can see that the proposed strategies are working properly. Just look at the insignificant differences when comparing the results with those of Newton method.

We present comparisons because are important for seeing the advantage of proposed strategies versus the most representative open-methods.

The proposed strategies have been tested in two cases. A study of divergence of square root of real numbers was made previously by authors for testing. Results in both cases have been successful.

The strategies developed show significant advantages in both implementation and precision-accuracy. Most importantly is, they solve the divergence properly and they fit to convergence rates that are very attractive for solving problems in science and engineering.

An interesting advantage of the proposed search strategies is that it isn't necessary to know the derivatives of the function or enclose the desired root likewise the computational cost is certainly lower than of Newton and Secant methods.

We hope make an extended study to characterize more functions. The goal will be enlarge the understanding of proposed strategies to known its adaptability in different situations. Later a study of convergence generalized must be developed.

ACKNOWLEDGMENT

Thanks to Cooperativa University and Surcolombiana University for the support given to this research.

REFERENCES

- Akai, T. J. (2004). *Métodos Numéricos Aplicados a la Ingeniería*. México: Limusa Willey.
- Burden, R. L., & Faires, D. J. (2011). *Análisis Numérico*. México: Cengage Learning Editores S.A.
- Chapra, S. C., & Canale, P. R. (2007). *Métodos Numéricos para Ingenieros*. México: McGraw-Hill.
- Heath, M. T. (2002). *Scientific Computing: An Introductory Survey*. Boston: McGraw-Hill.
- Mathews, J. H., & Fink, K. D. (2011). *Métodos Numéricos con Matlab*. México: Cengage Learning Editores S.A.
- Nakamura, S. (1997). *Análisis Numérico y Visualización Gráfica con Matlab*. México: Pearson Education.
- Press, W. H.; Teukolski, S. A., & Vetterling, W. T. (2012). *Numerical Recipes In C: The Art Of Scientific Computing*. London: Cambridge University Press.





La ética en la formación del ingeniero de minas: representaciones sociales de actores educativos

Ethics in the formation of the mining engineer: social representations of educational actors

Raimundo Alonso Pérez Gómez*, Audin Aloiso Gamboa Suárez**,
César Augusto Hernández Suárez***

Fecha de recepción: 1 de marzo de 2014

Fecha de aceptación: 19 de enero de 2015

Financiamiento: Fondo de Investigaciones de la Universidad Francisco de Paula Santander (Cúcuta – Colombia)

Citation / Para citar este artículo: Pérez Gómez, R. A., Gamboa Suárez, A. A., & Hernández Suárez, C. A. (2015). La ética en la formación del ingeniero de minas: representaciones sociales de actores educativos. *Revista Tecnura*, 19(44), 201-208. doi:<http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.2.a15>

Resumen

El presente artículo muestra los resultados de una investigación cualitativa que buscó comprender las representaciones sociales de docentes y estudiantes sobre la ética en una institución de educación superior en Cúcuta, Colombia. Se utilizó el método hermenéutico, lo cual posibilitó comprender un tipo de conocimiento que se construye en el diálogo, la interacción, la intersubjetividad y la cotidianidad. La muestra fue intencional y la conformaron 25 estudiantes y 2 profesores. Los resultados del estudio evidencian que para los actores educativos la ética está relacionada con los valores de los sujetos, los cuales son aprendidos del entorno. Relacionan la ética con la sociedad y la definen como una ciencia que les da a las personas ciertos parámetros que deben seguir para cumplir con las buenas acciones dentro de la sociedad.

Palabras clave: ética profesional, formación humanística, práctica moral, representaciones sociales.

Abstract

This article shows the results of a qualitative research aimed to understand the social representations of teachers and students concerning ethics in an institution of higher education in Cúcuta, Colombia. The hermeneutic method was used which allowed to understanding a kind of knowledge that is built on dialogue, interaction, intersubjectivity and everyday life. The sample was intentional and formed by 25 students and 2 teachers. The study results show that for the educational actors ethics is related to the values of the subjects, which are learned from the environment. They relate ethics to

* Ingeniero en Minas, especialista en Gerencia de Empresas, especialista en Derecho Ambiental, magíster en Práctica Pedagógica. Docente de la Universidad Francisco de Paula Santander. Cúcuta, Colombia. Contacto: planingminas@ufps.edu.co

** Licenciado en Música, magíster en Pedagogía, candidato a doctor en Ciencias de la Educación; docente de la Universidad Francisco de Paula Santander. Cúcuta, Colombia. Contacto: audingamboa@ufps.edu.co

*** Licenciado en Matemáticas y Computación, especialista en Computación para la Docencia, especialista en Práctica Pedagógica Universitaria, magíster en Enseñanza de las Ciencias Básicas – Matemáticas, doctorando en Educación. Docente de la Universidad Francisco de Paula Santander. Cúcuta, Colombia. Contacto: cesaraugusto@ufps.edu.co

society and define it as a science that gives people certain parameters that must be followed to comply with good actions within society.

Keywords: humanistic formation, moral practice, professional ethics, social representations.

INTRODUCCIÓN

La sociedad actual ha sido calificada como una sociedad de consumo, cientificista, tecnócrata, sociedad de masas en la que por diversos factores el hombre se ha convertido en un ser estandarizado y despersonalizado. En esta sociedad el desarrollo no se contempla en forma integral y holístico sino parcial, en el que priman la tecnología, lo científico, lo económico, lo urbano y lo individual. Pocos conciben y trabajan en la tónica de un auténtico desarrollo integral en el que se conceda la prioridad a lo humano-social, que se subordinen la ciencia, la tecnología, la economía, la administración y, en general, todas las disciplinas aplicadas.

La educación superior en nuestro medio, como lo plantean Restrepo, Amésquita, Arenas y Castañeda (2006), viene desempeñando un papel secundario en el componente humanista de los programas académicos. La educación está orientada al desarrollo de las destrezas, pero se ha descuidado el aspecto más importante que es la formación humana.

En este sentido, la ética se constituye en elemento fundamental de la formación humanista del profesional y ciudadano que requiere la sociedad actual, dado que contribuye a la asimilación y apropiación de normas y patrones de conductas que regulan las relaciones entre las personas, constituyendo un sistema de valores universales e individuales que le permite insertarse activamente en su contexto, desde su propio perfil ocupacional (Pérez, 2006).

Su inclusión en el ámbito educativo, sin duda, debe realizarse porque la formación humanista constituye uno de los retos de la educación que se ofrece en las universidades, ya que es necesario que los profesionales, en tanto intermediarios

entre la ciencia, la tecnología y las humanidades respecto de la sociedad, sean conscientes de las posibilidades de utilización del conocimiento teórico y práctico en función del bienestar social (De Lira, 2006). De igual forma, es una herramienta importante para que en el proceso educativo (además de las habilidades de saber y saber hacer), se pueda considerar el desarrollo de otras habilidades como la promoción de valores y la ética, tendientes a una formación integral, que permita una visión global de las condiciones del ámbito económico, político y social dentro del cual desarrolla su profesión (Agüero, 2008).

La ética tiene sentido en relación con los grupos humanos ya que es en ellos donde la persona estructura sus conceptos normativos y sus prácticas morales. La ética se construye mediante la interacción de sus individuos.

En el contexto kantiano, la ética tiene como aspiración el bien del sujeto en sí y de la comunidad en la cual el individuo interactúa con base en las acciones bajo la norma de las máximas universalizables y de la voluntad como ejercicio de la libertad (Kant, 2006). De igual manera, en los trabajos de Kohlberg, Power y Higgins (2008) se puede evidenciar que el ejercicio libre de tal voluntad se va estructurando mediante el análisis de los dilemas morales y situaciones reales a nivel escolar con el fin de alcanzar una comunidad normativa en la cual cada individuo valora las instituciones en sí mismas y estas a su vez imponen sus normas y sus responsabilidades al grupo entero.

La ética es esencialmente social y su proceso de formación surge a partir de la universalización de las costumbres que mejoran las condiciones de bienestar de los grupos. No obstante, la declaración de los códigos de comportamiento no es suficiente para lograr una comunidad con cultura

moral; es necesario que cada individuo haya interiorizado el imperativo categórico con el cual valorará sus acciones en función de su propio bienestar y el de su grupo. No puede entonces concebirse un individuo cuyas acciones estén determinadas a lograr su bienestar usufructuando el bienestar de la sociedad, ni tampoco esta puede determinar su bienestar a costa de alguno de sus miembros.

La práctica minera es un buen ejemplo de la relación entre lo social y lo individual. Es interesante analizar que la propiedad privada cede paso a la propiedad pública en lo referente a los bienes obtenidos del subsuelo. El Código colombiano de Minas, ley 685 de 2001, en el artículo 5 expresa que los minerales de cualquier clase y ubicación yacentes en el suelo o el subsuelo son de la exclusiva propiedad del Estado, sin consideración a que la propiedad, posesión o tenencia de los correspondientes terrenos sean de otras entidades públicas, de particulares o comunidades o grupos. Al analizar el fin de la ética como una construcción de la armonía y de la convivencia social como la gran aspiración de todos los grupos humanos, es posible encontrar un sustento a la legislación mencionada y fundamentar el principio ético según el cual el bien social prima sobre el bien particular.

De este modo, este trabajo pretende comprender los discursos de los actores educativos referente a los elementos axiológicos de formación en la universidad que dan cuenta de la fundamentación en los valores necesarios para la generación de un profesional autónomo, integral, con la sensibilidad social para asumir el rol y compromiso en los procesos de concertación, convivencia, tolerancia y paz que con urgencia requiere nuestro país en particular, y en general el mundo globalizado actual.

METODOLOGÍA

El presente estudio es de enfoque cualitativo-hermenéutico, pues intenta hacer una aproximación global de las situaciones sociales para explorarlas, describirlas y comprenderlas (Bonilla & Rodríguez, 2005).

La exploración de las representaciones de los estudiantes y profesores del plan de estudios de Ingeniería de Minas de la Universidad Francisco de Paula Santander sobre el aprendizaje y la enseñanza de la ética posibilita un tipo de conocimiento que se construye en el diálogo, la interacción, la intersubjetividad y la cotidianidad. En ese sentido, los estudios de orden cualitativo reivindican las realidades subjetiva e intersubjetiva como objetos legítimos de conocimiento científico y la vida cotidiana, como el escenario básico de construcción, constitución y desarrollo de los distintos planos que configuran e integran dichas realidades como dimensiones específicas del mundo humano. Se considera que la investigación cualitativa constituye la metodología apropiada para comprender las formas como los estudiantes y docentes participantes en este estudio, conciben el aprendizaje y la enseñanza de la ética.

La técnica de recolección de información fue la entrevista en profundidad que sigue el modelo de plática entre iguales, encuentros reiterados cara a cara entre el investigador y los informantes (Taylor & Bogdan, 1990), lo cual permitió indagar las representaciones sociales sobre ética de los actores educativos.

La muestra fue intencional y estuvo determinada por 25 estudiantes; 5 de género masculino y 20 de género femenino que cursaban la asignatura de ética profesional durante el segundo semestre de 2012, y 2 profesores que orientan esta asignatura en la Universidad Francisco de Paula Santander (Cúcuta).

Para el análisis de la información se utilizó la teoría de Strauss y Corbin (2002) que consiste en “hacer las conceptualizaciones, definir las categorías y desarrollarlas en términos de sus propiedades y dimensiones para luego relacionarlas por medio de hipótesis o afirmaciones que establezcan relaciones” (p. 133).

Con apoyo del software ATLAS.Ti 6.0 se hizo la división de contenidos narrativos en unidades hermenéuticas, efectuando simultáneamente triangulación de fuentes. Posteriormente se procedió a la clasificación de la información existente en las

unidades hermenéuticas con relación a las subcategorías realizando la codificación axial (Muñoz & Gamboa, 2012).

CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

A continuación se mostrarán los resultados del estudio interpretados desde tres categorías de análisis: una visión de la ética en el campo profesional, factor de inspiración para hacer siempre lo correcto y conjunto de valores y principios para la convivencia en sociedad.

Una visión de la ética en el campo profesional

Las representaciones sociales sobre la ética en estudiantes dan cuenta de esta como una norma primordial desde los procesos educativos y propiamente la norma ética concreta de sus carreras. Surgen voces que manifiestan “es lo que nos va a medir el desempeño porque podemos ser muy buenos profesionales, podemos saber mucho, pero igual, si no tenemos ética, si no tenemos criterio es muy difícil salir adelante en un ámbito laboral complejo”.

En este mismo sentido, un docente consideró que “la ética se manifiesta en aplicar flexibilidad, comprensión, receptividad y buen juicio en el quehacer”; así mismo, expresó que “la inflexibilidad de las normas debe ceder a la consideración de las personas sin llegar a la permisividad”, y sustenta estas aseveraciones argumentando que “trato de hacer las cosas correctamente, trato en lo posible de apegarme a las normas, de repente hay algunos momentos en que la normas son inflexibles y le dan importancia al procedimiento, a la fecha, a la letra más que a la persona; trato de conciliar eso para que el ser humano siempre esté en primera instancia; trato de apoyar a mis estudiantes, en lo posible ser comprensiva, sin llegar al punto de ser permisiva, tratando de escuchar siempre a la gente, sea en lo personal, sea en lo profesional, tratando de no prejuzgar, tratando de que la

gente sienta que puede hablar, que puede ser ella misma, que puede expresarse con libertad y ser la persona que en el fondo realmente es”.

Se empieza a vislumbrar en estos relatos elementos que configuran la educación del ingeniero. Al respecto Kohlberg, Power e Higgins (2008) afirman que la calidad de la enseñanza dependerá de que los educadores consideren la disciplina y otras cuestiones propias de las instituciones de educación como problemas humanos cuya solución requiere la participación de todos sus miembros y en este sentido se debe dar lugar a un enfoque más democrático y comunitario. Se hace necesaria una reforma pedagógica basada no en el avance tecnológico sino de los ideales morales de justicia, democracia y comunidad.

De este modo, Frisancho (2001) interpreta que en la educación se debe dar prioridad a los valores personales y sociales y a lograr que el alumno reflexione libremente en torno a estos valores, los asuma y posteriormente los lleve a la acción. Así mismo el autor señala que:

los valores juegan un papel central en las propuestas educativas, pues ayudan a fundamentar determinadas conductas que se reconocen como deseables por encima de otras y, en consecuencia, toda propuesta educativa se fundamenta en valores y trata de organizarse alrededor de ellos. (p. 14).

En este punto es importante señalar las reflexiones hechas por Bolívar (2005), quien manifiesta que la formación profesional universitaria tiene entre sus objetivos fundamentales formar profesionales competentes al servicio de la ciudadanía y, en consecuencia, debe responder a las expectativas y necesidades de la sociedad que aspira a contar con un desempeño adecuado de los egresados no solo en el ejercicio de las funciones inherentes a su profesión. Además el mismo autor argumenta que:

El objetivo de la formación ética que se debe impartir en las facultades universitarias es que los estudiantes sean personas con criterio, esto es, que

tengan la capacidad de reconocer las variables a considerar en el momento de afrontar un problema de tipo ético y saber distinguir lo que está bien de lo que está mal y que estén dispuestas a optar siempre por la vía de una actuación correcta de acuerdo con su conciencia y apegados a los principios de verdad, libertad y justicia. (p. 118).

La ética tiene sentido en relación con los grupos humanos ya que es en ellos donde la persona estructura sus conceptos normativos y sus prácticas morales. La ética se construye mediante la intersubjetividad y alteridad de los individuos.

En el contexto kantiano la ética tiene como aspiración el bien del individuo en sí y de la comunidad en la cual el individuo interactúa con base en las acciones bajo la norma de las máximas universalizables y de la voluntad como ejercicio de la libertad. En este sentido, la ética es esencialmente social y su proceso de formación surge a partir de la universalización de las costumbres que mejoran las condiciones de bienestar de los grupos. No obstante, la sola declaración de los códigos de comportamiento no es suficiente para lograr una comunidad con cultura moral, es necesario que cada individuo haya interiorizado el imperativo categórico con el cual valorará sus acciones en función de su propio bienestar y el de su grupo. No puede entonces concebirse un individuo cuyas acciones estén determinadas a lograr su bienestar usufructuando el bienestar de la sociedad, ni tampoco esta puede determinar su bienestar a costa de alguno de sus miembros.

La práctica minera es un buen ejemplo de la relación entre lo social y lo individual. Es interesante analizar que la propiedad privada cede paso a la propiedad pública en lo referente a los bienes obtenidos del subsuelo. El Código Colombiano de Minas, Ley 685 de 2001, en el artículo cinco (5) expresa que

los minerales de cualquier clase y ubicación yacentes en el suelo o el subsuelo, son de la exclusiva propiedad del estado, sin consideración a que

la propiedad, posesión o tenencia de los correspondientes terrenos, sean de otras entidades públicas, de particulares con comunidades o grupos. (p. 2).

Al analizar el fin de la ética como una construcción de la armonía y de la convivencia social como la gran aspiración de todos los grupos humanos, es posible encontrar un sustento a la legislación mencionada y fundamentar el principio ético según el cual el bien social prima sobre el bien particular.

Factor de inspiración para hacer lo correcto siempre

Esta frase idealista al parecer representa una representación utópica de la ética. Con relación a esto los estudiantes señalaron que “la ética es lo que impulsa al ser humano a siempre hacer las cosas correctas”. Fundamentaron esta representación aduciendo que “la ética es tratar de hacer lo correcto siempre, tratando también de ver la parte moral” y teniendo en cuenta “los principios de lo bueno o lo que debemos hacer correcto pero en cuanto a nuestros pensamientos y nuestras convicciones”. Así mismo argumentaron que la ética “es ese pensamiento que cada vez que estamos haciendo algo que conocemos que es indebido nos reclama ... en la conciencia, en la representación de saber actuar para las demás personas, saber que uno debe tener un compromiso con los demás y con uno mismo con el fin de que se hagan las cosas correctas”.

Estas representaciones de los estudiantes coinciden con la de los docentes en el sentido de que estos consideran la ética como el soporte en el que deben apoyarse todas nuestras actividades para perseguir el bien de los demás haciendo lo correcto y causando el mínimo daño posible a las personas del entorno. Esta aseveración los docentes la argumentan expresando que “la ética debe ser la vía, el soporte en el cual se apoyen absolutamente todas nuestras actividades para tomar conciencia de orientarnos hacia el bien, hacia lo correcto,

hacia tratar de ser felices, porque esa es la razón fundamental de ser del hombre, perseguir ser feliz, pero procurando causar el mínimo daño posible, tanto al otro como al mundo en que vivimos”.

De este modo, se puede evidenciar que los participantes visibilizan la ética como un actuar, que en términos de González (2005) se traduce en la siguiente afirmación: el ser humano se realiza, finalmente en y por la acción. La acción, entendida en su sentido más amplio y comprensivo como un componente holístico del hombre. Es decir, que la existencia del hombre se basa en la acción ya que él asegura su perfección en la perfección de su acción. Sin embargo, el mismo autor manifiesta que hay acciones que resultan destructivas, degradantes o despersonalizantes. Para que una acción sea personalizadora debe promover la realización del hombre en todas sus dimensiones. La acción plenamente humana debe transformar la naturaleza, perfeccionar al agente y facilitar la liberación.

Conjunto de valores y principios para la convivencia en sociedad

Para un gran número de estudiantes la ética está relacionada con los valores que la persona tiene, los cuales son aprendidos del entorno. Relacionan la ética con la sociedad y la definen como una ciencia que les da a las personas ciertos parámetros que debe seguir para cumplir con las buenas acciones dentro de la sociedad.

Pareciera entenderse que la ética está directamente ligada con el amplio espectro de los valores humanos. Estos, según Ratat, Harmib y Simon (1967), son cualidades que dan sentido a la vida; en algunos casos estas cualidades son inclinaciones íntimas y personales; algunos autores las consideran instintivas, otros creen que son adquiridos y que se va perfeccionando con las diversas actividades de la vida. Se hace evidente en los relatos de los estudiantes cuando afirman que la ética se relaciona con los valores, señalando que: “la ética son valores que se relacionan con la humildad, la sencillez, la solidaridad, el respeto por los demás, la comprensión y la honestidad”.

Es importante entonces resaltar que es deber de las instituciones de educación superior fomentar en los estudiantes el desarrollo de una visión y sentido ético para orientar su ejercicio profesional reflejando en sus acciones un conjunto de valores como los manifestados por los sujetos. De este modo y como lo advierte Schön (1992): “la preparación de los profesionales debería reconsiderar su diseño desde la perspectiva de una combinación de la enseñanza de la ciencia aplicada con la formación de una enseñanza a la reflexión en la acción” (p. 9). De esta manera se podría contribuir a la educación para la ciudadanía preparando profesionales competentes que posan el sentido ético de la profesión y que, en consecuencia, actúan con ética profesional, ya que el ejercicio profesional va a constituir la principal aportación ciudadana de estos profesionales (Cobo, 2003).

En este punto de la discusión cobra una importancia relevante la relación docente-estudiante como factor que puede llegar a favorecer o entorpecer la formación integral de profesionales y ciudadanos íntegros. Al respecto Vélez (2006) manifiesta que la relación del profesor y el estudiante debe ser una relación personal – didáctica, donde se adquieren y se refuerzan valores como la honestidad intelectual, la exactitud y el rigor, la curiosidad promotora del estudio, la constancia en el trabajo y la persistencia a pesar de las dificultades. Se resalta aquí la postura de Hortal (1995) al expresar que:

Enseñar ética no es lo único que se puede hacer desde el contexto universitario para favorecer la formación ética de los futuros profesionales. No hay nada que contribuya más a la formación de personas morales que el que estas crezcan, se formen y vivan entre personas morales. (p. 62).

Se puede concluir entonces que en las representaciones sociales de estudiantes y docentes se muestra la importancia de la ética como normas o reglas que deben ser tenidas en cuenta, tanto en

la vida personal como en el desempeño profesional para regular las relaciones humanas en una sociedad o comunidad de tal forma que aseguren la convivencia y el orden entre los individuos, sin que los intereses particulares atenten contra los intereses comunes.

Desde la mirada de los docentes la ética se manifiesta en aplicar flexibilidad, comprensión, receptividad y buen juicio en el quehacer, de tal manera que la inflexibilidad de las normas debe ceder a la consideración de las personas, sin llegar a la permisividad, por lo cual, en el proceso educativo se debe dar prioridad a los valores personales y sociales y a lograr que el estudiante reflexione libremente en torno a estos valores, los asuma y posteriormente los lleve a la acción.

Para los actores educativos la ética está relacionada con los valores de los sujetos, los cuales son aprendidos del entorno. Relacionan la ética con la sociedad y la definen como una ciencia que les da a las personas ciertos parámetros que deben seguir para cumplir con las buenas acciones dentro de la sociedad.

En la medida en que el ser humano en su proceso formativo adquiere la conciencia de sus actos, podrá ejecutar acciones reguladas por la ética y la moral y desarrollará la capacidad de discernir y priorizar adecuadamente las situaciones críticas o de conflicto que se puedan presentar en las relaciones sociales con sus pares, de tal forma que se favorezcan las posibilidades de tomar decisiones en consenso tendientes a lograr soluciones justas y equitativas y no unilaterales.

Para terminar, es fundamental señalar que futuras investigaciones aborden la formación humanística y particularmente la ética en campos del conocimiento como la matemática, la física, la biología y otras áreas de la ingeniería, para que el profesional no se convierta en un simple productor y reproductor de objetivos, sino que considere su formación vital como sujeto, el cual requiere no solo el aporte de aspectos científicos y técnicos sino de elementos artísticos, culturales, éticos y estéticos.

FINANCIAMIENTO

Artículo derivado de la investigación titulada "Formación humanística en educación superior: La ética en la Ingeniería de Minas", avalado por el Fondo de Investigación de la Universidad Francisco de Paula Santander (Colombia) y el Grupo de Investigación en Estudios Sociales y Pedagogía para la Paz –GIESPPAZ- (Categoría B COLCIENCIAS).

REFERENCIAS

- Agüero, M. (2008). *El reto de la formación profesional de los administradores. Contaduría y administración*. México: Universidad Autónoma de México.
- Bolívar, A. (2005). El lugar de la ética profesional en la formación universitaria. *Revista mexicana de investigación educativa*, 10 (24), 93-123.
- Bonilla, E., & Rodríguez, P. (2005). *Más allá del dilemas de los métodos*. Bogotá: Norma.
- Cobo, J. (2003). Formación universitaria y educación para la ciudadanía. *Revista de educación del Ministerio de Educación de España*, 75(59), 359-375.
- Congreso de la República (2001). Código Colombiano de Minas Ley 685. Recuperado de: http://www.ani.gov.co/sites/default/files/ley_0685_de_2001_codigo_de_minas.pdf
- De Lira, B. (2006). *Ciencia y humanismo en formación universitaria*. México: Universidad Autónoma de Aguas Calientes.
- Frisancho, S. (2001). *Educación y desarrollo moral*. Lima: Ministerio de Educación del Perú.
- González, L. (2005). *Ética*. Bogotá: El Búho.
- Hortal, A. (1995). *La ética del profesional en el contexto universitario*. Bilbao: Universidad de Deusto.
- Kant, I. (2006). *Teoría y práctica*. Madrid: Tecnos.
- Kohlberg, L.; Power, C., & Higgins, A. (2008). *La educación moral según Lawrence Kohlberg*. Barcelona: Gedisa.
- Muñoz, P., & Gamboa, A. (2012). Escuela y educación política: una mirada a los imaginarios de actores educativos. *Pedagogía y saberes*, 1 (36), 57-68.

- Pérez, I. (2006). *La formación humanista y la ética profesional*. La Habana, Cuba: Universidad de Cienfuegos.
- Ratas, L.; Harmib, M., & Simon, S. (1967). *El sentido los valores y la enseñanza*. México: Hispanoamericana.
- Restrepo, J.; Amésquita, M.; Arenas, J., & Castañeda, I. (2006). Cómo formar en humanismo y no morir en el intento. *Revista Lassallista de Investigación*, 3 (1), 66-72.
- Schön, D. (1992). *La formación de profesionales reflexivos. Hacia un nuevo diseño de la enseñanza y el aprendizaje en los profesionales*. Barcelona: Paidós.
- Strauss, A., & Corbin, J. (2002). *Bases de la investigación cualitativa. Técnicas y procedimientos para desarrollar la teoría fundamentada*. Medellín: Universidad de Antioquia.
- Taylor, S. J., & Bodgan, R. (1990). *Introducción a los métodos cualitativos de investigación*. Barcelona: Paidós.
- Vélez, O. (2006). La relación profesor-alumno en el aula como espacio de formación ética en la universidad. *Revista digital de investigación en docencia universitaria*, 2 (1), 2-21.





UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

INSTRUCCIONES PARA LOS AUTORES

Revista *TECNURA* Universidad Distrital Francisco José de Caldas Facultad Tecnológica

CONTENIDO

- Alcance y política editorial de la revista
- Tipos de artículos aceptados
- Formato del artículo
- Envío de artículos
- Procedimiento para la publicación
- Arbitraje de artículos
- Contacto

1. ALCANCE Y POLÍTICA EDITORIAL DE LA REVISTA

La revista *Tecnura* es una publicación institucional de la Facultad Tecnológica de la Universidad Francisco José de Caldas, de carácter científico-tecnológico con periodicidad trimestral, que se publica los meses de enero, abril, julio y octubre. Su primer número apareció en el segundo semestre del año 1997 y hasta la fecha ha mantenido su regularidad.

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

La revista *Tecnura* está dirigida a docentes, investigadores, estudiantes y profesionales interesados en la actualización permanente de sus conocimientos y el seguimiento de los procesos de investigación científico-tecnológica, en el campo de las ingenierías. Tiene como misión divulgar resultados de proyectos de investigación realizados en el área de las ingenierías, a través de la publicación de artículos originales e inéditos, realizados por académicos y profesionales pertenecientes a instituciones nacionales o extranjeras del orden público o privado. Los artículos presentados deben ser trabajos inéditos escritos en español o inglés; sin embargo, tendrán preferencia los artículos que muestren conceptos innovadores de gran interés, que traten sobre asuntos relacionados con el objetivo y cobertura temática de la revista.

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

e-Revistas (España), DOAJ (Suecia), Ulrich de Proquest (Estados Unidos) y CABI (Reino Unido)

Tecnura es una revista arbitrada mediante un proceso de revisión entre pares de doble ciego. La periodicidad de la conformación de sus comités Científico y Editorial está sujeta a la publicación de artículos en revistas indexadas internacionalmente por parte de sus respectivos miembros.

La Universidad Distrital Francisco José de Caldas, sus directivas, el Editor, el Comité Editorial y Científico no son responsables por la opinión 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:

1. Envío del artículo acompañado de la carta de presentación y el formato de información por parte de los autores.
2. Notificación al autor de correspondencia de la recepción del artículo.
3. Verificación del tema del artículo con respecto a las áreas de interés de la revista.
4. Verificación de las normas de presentación por parte del monitor de la revista.
5. Notificación al autor de correspondencia de la evaluación de las normas de presentación.

6. Envío de las correcciones realizadas por los autores con respecto a la evaluación de las normas de presentación.
7. Envío del artículo a los árbitros seleccionados.
8. Notificación del inicio del proceso de arbitraje del artículo.
9. Notificación a los autores de la decisión tomada por el Comité Editorial y de las evaluaciones hechas por los árbitros.
10. Envío de las correcciones realizadas por los autores con respecto a las evaluaciones de los árbitros.
11. Estudio de la versión final del artículo y de las evaluaciones de los árbitros por parte del Comité Editorial.
12. Envío por parte de los autores de la carta de cesión de derechos al editor de la revista.
13. Envío de la versión con corrección de estilo y diagramada a los autores.
14. Verificación de errores y aprobación final de la versión con corrección de estilo y diagramada por parte de los autores.
15. Publicación del artículo en el número correspondiente de la revista *Tecnura*.
16. Notificación a los autores de la publicación del número de interés.
17. Envío de un ejemplar de la revista a cada autor del artículo publicado.

6. PROCESO DE ARBITRAJE DE ARTÍCULOS

Considerando la periodicidad trimestral de la revista, el Comité Editorial realiza cuatro convocatorias anuales para la recepción de artículos, aproximadamente en los meses de febrero, mayo, agosto y noviembre. Los artículos serán recibidos hasta la fecha máxima establecida en cada convocatoria.

Una vez recibidos los artículos el monitor de la revista realizará una primera evaluación de forma para verificar que cumplan con todos los elementos mencionados en esta guía de instrucciones a los autores. Luego de recibir nuevamente el artículo con las correcciones de forma solicitadas por el

monitor de la revista, este será sometido a evaluación por tres pares académicos (paulatinamente se espera incorporar un mayor número de pares externos que participen en el proceso).

Cada artículo remitido a la revista *Tecnura* es revisado por dos pares académicos externos a la institución de los autores, mediante un proceso de "revisión entre pares" (*Peer-review*) de doble-ciego, garantizando el anonimato de los autores y evaluadores; se considera confidencial todo trabajo recibido y así se le exige a sus evaluadores.

Las posibles conclusiones de los resultados de la evaluación por parte de los árbitros son únicamente tres: publicar el artículo sin modificaciones, publicar el artículo con modificaciones o no publicar el artículo.

Posteriormente, el Comité Editorial toma la decisión de publicar o no los artículos, con base en los resultados de las evaluaciones realizadas por los árbitros asignados. En caso de existir contradicciones en las evaluaciones con respecto a la publicación de un artículo, el Comité Editorial enviará el artículo a un tercer árbitro y se inclinará por las dos evaluaciones que tengan el mismo concepto respecto a la publicación del artículo.

En cada convocatoria el autor de correspondencia debe sugerir al menos cuatro posibles evaluadores externos a su institución laboral, los cuales deben ser especialistas en el tema específico del artículo remitido, tener al menos maestría y por lo menos dos deben ser internacionales. Los posibles evaluadores pueden pertenecer a una universidad o industria, pública o privada; de estos se debe proporcionar el nombre completo, su formación académica más alta, su afiliación institucional y su correo electrónico. Estos cuatro potenciales

evaluadores serán analizados por el Comité Editorial a fin de ampliar la base de datos de los árbitros de la revista *Tecnura*.

El Comité Editorial de la revista *Tecnura* se reserva los derechos de impresión, reproducción total o parcial del artículo, así como el de aceptarlo o rechazarlo. Igualmente, se reserva el derecho de hacer cualquier modificación editorial que estime conveniente; en tal caso el autor recibirá por escrito recomendaciones de los evaluadores. Si las acepta, deberá entregar el artículo con los ajustes sugeridos dentro de las fechas fijadas por la revista para garantizar su publicación dentro del número programado.

6. CONTACTO

Para cualquier solicitud de información adicional puede comunicarse a través del correo electrónico de la revista *Tecnura*: tecnura@udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com, o por mensajería con el Ing. Cesar Augusto García Ubaque, Director y Editor de la revista *Tecnura*, a la dirección:

Revista *Tecnura*

Sala de Revistas, Bloque 5, Oficina 305.

Facultad Tecnológica

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Transversal 70 B N. 73 a 35 sur

Teléfono: 571 – 3238400 Extensión: 5003

Celular: 57–3153614852

Bogotá D.C., Colombia

Email: tecnura@udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com

Página web: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

Tecnura journal District francisco José de caldas university Faculty of technology

CONTENT

- **Scope and editorial policy of the journal**
- **Type of accepted articles**
- **Article format**
- **Article submission**
- **Publication procedure**
- **Arbitration of article process**
- **Contact**

1, SCOPE AND EDITORIAL POLICY OF THE JOURNAL

Tecnura journal is an institutional publication of the Faculty of Technology from University Francisco José de Caldas. It is a scientific and technological publication with quarterly periodicity, which is published in January, April, July and October. The first issue appeared in the second semester of 1997 and up to now it has maintained its regularity.

The areas of interest of *Tecnura journal* are focused on all engineering fields such as electronics, telecommunications, electricity, systems, industrial, mechanics, cadastral, civil, environmental, among others. However, it is not restricted to those; it also has room for education and health issues, as long as they are related to engineering. The journal will only publish concerning scientific and technological research, reflection and revision. In consequence, during the initial editorial evaluation, short articles and case reports will be rejected.

Tecnura Journal is addressed for professors, researchers, students and professionals interested in permanent update of their knowledge and follow-up of scientific-technologic processes in the field of engineering. *Tecnura Journal* has as mission to disseminate results of research projects in

the areas of engineering, through the publication of original and unpublished articles, conducted by academics and professionals accredited by public or private national or foreign institutions. Articles submitted to *Tecnura journal* must be unpublished works written in Spanish or English; nevertheless, preference will be given to articles that show innovative concepts of great interest, related to the objective and scope of the journal.

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

Tecnura is a journal arbitrated by a revision process among double blind peers. The schedule of the conformation of its scientific and editorial committee is subject to the publication of articles in internationally indexed journals by their members.

District University Francisco José de Caldas, its directors, the editor, the editorial and scientific committee are not responsible for the opinions and the criteria expressed in the content of the articles

and they are published under the exclusive responsibility of the authors and do not necessarily reflect the ideas of the editorial committee.

In addition to the printed version, Tecnura journal also has a digital version available in its web page: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/index>

2. TYPE OF ARTICLES ACCEPTED

According to the classification of the Scientific and Technological Publications National Index (Publindex-Colciencias), *Tecnura* journal receives nominations of unpublished articles on the following topics:

- ***Scientific and technological research articles:*** document that presents, in a detailed manner, the original results of research projects. The generally used structure contains four main parts: introduction, methodology, results and conclusions.
- ***Reflection articles:*** document that presents research results from an analytic, interpretative or critic perspective from the author, dealing with a specific topic and adopting original sources.
- ***Review article:*** document that results from a research where the results of published or unpublished research on a science or technology field are analyzed, systematized and integrated, in order to state the advances and tendencies in development. It is characterized for presenting a careful bibliographical review of at least 50 references.

3. ARTICLE FORMAT

3.1 About the appropriate language and style for articles writing

- Authors must use simple sentence structures, avoiding those too long or complex.
- The vocabulary used must be basic and common. Technical language must be briefly explained; also, the meaning of the acronyms must be given the first time they appear in the text.
- The authors are responsible for their work to be conducted in a professional and ethic manner.

3.2 About the length of articles

The articles should not exceed 25 pages in letter size and double space, with symmetric margins of 3 cm. Only in the case of review articles, these 25 pages do not include references.

3.3 About the presentation format

Submitted articles must be unpublished works written in Spanish or English, and must be typed in Microsoft Word (2003 and beyond), complying with the following indications:

- *Times New Roman* letter, 12 point (except it is required for some sections).
- One column, double-spaced.
- All the margins 3 cm.
- Paragraphs should be justified without spaces between consecutives and without cutting words.
- Do not include page breaks or section finals.
- If you want to emphasize words or phrases from the text, do not use bold letters but italic.
- Decimals should be pointed with comma (,) and not with period (.).
- Thousands and millions should be pointed with a fine space.
- Avoid footnotes.
- Arabic nomenclature must be used only until the third level.

3.4 About the article structure

The papers must have the following structure and comply with the following requirements:

Composition of an article

All the articles submitted for evaluation and possible publication by the Tecnura Journal must have at least the following components:

- Title in Spanish and English.
- Information about the authors.

- Abstract in Spanish and English.
- Key words in Spanish and English.
- Introduction.
- Conclusions.
- Future work (optional).
- Acknowledgements (optional).
- Bibliographical references.

If the article is related to scientific and technological research must have, in addition to the above, the following components:

- Methodology.
- Results.
- Financing.

Title

The title of the article must be short or divided in title and subtitle, attractive for the potential reader and written in capital letters. It should appear centered between the margins, written in *Times New Roman* letter, in bold, font size 18. The title of the article has to be in Spanish and English separated by double space. Maximum 20 words.

Authors

After the title the complete name(s) of the author(s) must be written, with their basic biographical data: undergraduate degree, graduate degree, occupation or position, institutional affiliation (institution where they work), dependency, city, country and e-mail. The above information must be immediately below the author's name.

Abstract

The scope and purpose of the work must be established giving a clear and concise description of the methodology, results presented and the conclusions obtained. Maximum of 250 words.

Keywords

Between three and ten keywords must be chosen, written in English with *Times New Roman* letter in bold and italic.

Key words must be written in alphabetic order and must be as standard as possible, for which it is suggested the use of international databases according to the area of knowledge. For example, in the area of Electrics and Electronics it is suggested to use the IEEE thesaurus and World Bank thesaurus that can be accessed at the following web pages respectively:

http://www.ieee.org/documents/2009Taxonomy_v101.pdf,

<http://multites.net/mtsql/wb/site/default.asp>

Abstract in Spanish

Translation to the Spanish language of the text that appears in the abstract, it must be correct and precise.

Keywords in Spanish

Translation to the English language of the keywords in Spanish, they must be correct and precise.

Keywords must be written in the order of the English version and must be as standard as possible, for which it is suggested the use of international databases according to the area of knowledge. For example, in the area of Electrics and Electronics it is suggested to use the UNESCO thesaurus that can be found at the following web pages:

<http://databases.unesco.org/thessp>

Introduction

The general idea of the work must be described, its context, backgrounds, state of the art of the topic, objectives and possible scope of the work.

Methodology

The writing of this part must allow any specialized professional in the topic to replicate the research.

Results

Explanation and interpretation of the findings. If necessary, a brief discussion focused on the interpretation of the results can be presented.

Conclusions

Implication of the results and their relation to the proposed objective.

Financing

Mention the associated research from which the article was derived and the entity that endorsed and financed the research.

Acknowledgments

They should preferably be brief and include the essential contributions for the development of the paper.

Equations

Equations must appear centered with respect to the main text. They must be referenced with consecutive numbers (written in parenthesis close to the right margin). Equations are cited in the main text employing the word equation, and followed by the number in parenthesis. Equations must be made in an appropriate equation editor and compatible with "InDesign" software, as for example the equation editor of Windows.

Tables

In the case of implementation of tables, it is recommended that these are not inserted as images, considering that in that format they cannot be modified. The title of each table must include the word table (in italic) followed by the corresponding consecutive number and a brief name of the table. The heading must be written in TNR letter, italic and font size 9.

Charts are not presented but tables and they should be automatically raised from the text processor. Tables should be named and referenced in the article, in strict order. Every table must have at the bottom the source from which it was taken, or to mention self-authorship if it is the case.

Figures

All the figures or pictures have to be sent in JPG or PNG format with a minimum resolution of 300 DPI, adapted to gray scale.

The footnote or name of each figure must include the word figure (in italic) followed by the corresponding consecutive number and a brief description of the content of the figure. The footnote of the figure must be written in *Times New Roman* letter, italic and font size 9. Figures must be named and referenced in the article, in strict order. Every figure must have at the bottom the source from which it was taken, or to mention self-authorship if it is the case.

Symbols

The symbols of the constants, variables and functions in Latin or Greek letters –included in the equations- must be in italic; the mathematical symbols and the numbers do not go in italic. The symbols must be identified immediately after the equation. Units, dimensions and symbols of the international system must be used

When using acronyms or abbreviations, the complete equivalence should be written first, followed by the corresponding acronym or abbreviation in parenthesis and from there it is only written the respective acronym or abbreviation.

Bibliographic references

The adopted reference citation style by *Tecnura* journal is APA sixth edition. The cites, bibliographic references and infography are included in the last part of the article. The bibliographic references must be alphabetically ordered according to the author's first surname, without numbering.

There should only appear the cited references in the main body of the work, in tables or in figures. It means, in the list there should not appear other references although they have been consulted by the authors for the work preparation. We suggest using tools such as: Cites and bibliography from Microsoft Word (for APA sixth edition version 2013 or superior), Zotero, Mendeley, among others.

The call for a bibliographic reference is inserted in the text, at the pertinent point, under certain characteristics:

- If the sentence includes the author's surname, it should only be written the date into a parenthesis, for instance:

Cuando Vasco (2012), analizó el problema de presentado en

- When the author is not included in the sentence, surname and date must be into a parenthesis.

La investigación de materiales dio una visión en el área (Martínez, 2012).

- If the document or work has more than two authors, the first cite must include all the surnames.

1990. (Fernández Morales, Villa Krieg & Caro de Villa, 2008)

- In the following mentions, it must only be written the author's first surname, followed by "et al.".

En cuanto al estudio de las aguas, Fernández Morales et al. (2008) encontraron que ...

- When the document or work has more than six authors, it must be used from the first mention "et al.".

Next it is described a series of examples of the more used references, according to the reference style adopted by *Tecnura* journal:

Periodical Publications:

Basic Form

Surnames, A. A., Surnames, B. B. & Surnames, C. C. (Date). Article's title. *Title of the publication*, volume (number), pp. xx-xx. doi: xx.xxxxxxx

Basic article

Guevara López, P., Valdez Martínez, J., Agudelo González, J., & Delgado Reyes, G. (2014). Aproximación numérica del modelo epidemiológico SI para la propagación de gusanos informáticos, simulación y análisis de su error. *Revista Tecnura*, 18(42), 12 -23. doi:<http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.4.a01>

Web article

Rodríguez Páez, S., Fajardo Jaimes, A., & Páez Rueda, C. (2014). Híbrido rat-race miniaturizado

para la banda ISM 2,4 GHZ. *Revista Tecnura*, 18(42), 38-52. Recuperado de <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/article/view/8059/9675>

Books:

Basic Form

Surnames, A. A. (Year). *Title*. City: Editorial.

Surnames, A. A. (Year). *Title*. Recovered from <http://www.xxxxxx.xxx>

Surnames, A. A. (Year). *Title*. doi: xx.xxxxxxxx

Surnames, A. A. (Ed.). (Year). *Title*. City: Editorial.

Book with author

Goleman, D. (2000). *La inteligencia emocional: Por qué es más importante que el cociente intelectual*. México: Ediciones B.

Book with editor:

Castillo Ortiz, A. M. (Ed.). (2000). *Administración educativa: Técnicas, estrategias y prácticas gerenciales*. San Juan: Publicaciones Puertorriqueñas

Book electronic version:

Montero, M. & Sonn, C. C. (Eds.). (2009). *Psychology of Liberation: Theory and applications*. [Versión de Springer]. doi: 10.1007/978-0-387-85784-8

T

echnical report:

Basic Form

Surnames, A. A. (Year). *Title*. (Report No. xxx). City: Editorial

Report with authors

Weaver, P. L., & Schwagerl, J. J. (2009). *U. S. Fish and Wildlife Service refuges and other nearby reserves in Southwestern Puerto Rico*. (General Technical Report IITF-40). San Juan: International Institute of Tropical Forestry.

Report from a Government agency

Federal Interagency Forum on Child and Family Statistics. *America's Children: Key National Indicators of Well-Being, 2009*. Washington, DC: U.S.

Government Printing Office. Recuperado de <http://www.childstats.gov/pubs/index.asp>

Thesis

Basic form

Surnames, A. A. (Year). Title. (Unpublished master or doctorate thesis). Institution name, Location.

Unpublished thesis, printed

Muñoz Castillo, L. (2004). *Determinación del conocimiento sobre inteligencia emocional que poseen los maestros y la importancia que le adscriben al concepto en el aprovechamiento de los estudiantes*. (Tesis inédita de maestría). Universidad Metropolitana, San Juan, PR.

Commercial database thesis

Santini Rivera, M. (1998). *The effects of various types of verbal feedback on the performance of selected motor development skills of adolescent males with Down syndrome*. (Tesis doctoral). Disponible en la base de datos ProQuest Dissertations and Theses. (AAT 9832765).

Web thesis

Aquino Ríos, A. (2008). *Análisis en el desarrollo de los temas transversales en los currículos de español, matemáticas, ciencias y estudios sociales del Departamento de Educación*. (Tesis de maestría, Universidad Metropolitana). Recuperado de http://suagm.edu/umet/biblioteca/UMTESIS/Tesis_Educacion/ARAquinoRios1512.pdf

Standards or patents

Basic form

Surnames, A. A. Title of the patent. Country and number of the patente. Classification of the patent, date of official license. Number and date of patent request, pagination.

Hernández Suárez, C. A., Gómez Saavedra, V. A., & Peña Lote, R. A. Equipo medidor de indicadores de calidad del servicio de energía eléctrica para usuario residencial. Colombia., 655. G4F 10/0, 15 de Marzo 2013. 27 de Octubre 2011, 147

4. ARTICLE SUBMISSION

Authors must submit their articles through the application Open Journal System in digital format, attaching the cover letter and the article-authors format.

4.1 Cover letter

The article must be submitted with a cover letter addressed to the director and editor of the journal, Engineer Cesar Augusto Garcia Ubaque, including:

- Specific request to consider your article to be published in Tecnura journal.
- Full title of the article.
- Full names of all the authors of the paper.
- Certification of the originality and unpublished character of the paper.
- Exclusivity of submission to Tecnura journal.
- Authoring confirmation with signature of all the authors.

This letter must be signed by all the authors, scanned and sent with the remaining requested documents.

4.2 Article-authors information format

The article has to be submitted with an information format about the article and its authors which can be downloaded from the web page of Tecnura journal <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/index>, in the section "Forms and Documents". It is important to complete all the fields of information requested, some of them have comments to clarify better what is being requested. The format must not be scanned.

4.3 Article

Article in digital format (Word 2003 and later editions) that complies with all the presentation rules described in chapter three, "Article structure", of this guide of instructions for authors.

5. PUBLICATION PROCEDURE

The procedure to be followed by Tecnura journal for the evaluation and possible publication of the papers sent by the authors is the following in chronological order:

1. Delivery of the article with the cover letter and the information format by the authors.
2. Notification to the author about the reception of the article.
3. Verification of the presentation rules by the monitor of the journal.
4. Notification to the author about the evaluation of the presentation rules.
5. Submission of corrections made by the authors related to the evaluation of presentation rules.
6. Submission of the articles to the selected arbitrators.
7. Notification of the beginning of the arbitration process of the article.
8. Notification to the authors about the decision made by the editorial committee, and about the evaluations made by the arbitrators.
9. Delivery of the corrections made by the authors with respect to the evaluations made by the arbitrators.
10. Study of the final version of the article and the evaluations of the arbitrators by the editorial committee.
11. Delivery by the authors of the letter that surrenders right to the editor of the journal.
12. Submission of the version with style corrections and diagrammed to the authors.
13. Verification of errors and final approval of the version with style corrections and diagrammed by the authors.
14. Publication of the article in the corresponding number of Tecnura journal.
15. Notification to the authors of the number of interest.
16. Delivery of a copy of the journal to each one of the authors of the published article.

6. ARTICLE ARBITRATION PROCESS

Considering the quarterly periodicity of the journal, the Editorial Committee makes four calls every year for the submission of articles, approximately in the months of February, May, August and November. The articles will be received until the date established in the call.

Once received the articles, the monitor of the journal will make an initial form evaluation to verify the completion of the elements mentioned in this guide of instructions to authors. After receiving again the article with the requested corrections by the journal's monitor, the paper will be submitted to evaluation by three academic peers (through time it is expected to include more external peers to participate in the process).

Each article sent to Tecnura journal is checked by two expert academic peers external to the institution of the authors, by a process of "Peer-review" of double blind, guaranteeing the anonymity of authors and evaluators; every paper sent is considered confidential and so it is demanded to evaluators.

Possible conclusions of the result of the evaluation by the judges are only three: publish the article without modifications, publish the article with modifications and not publish the article.

Subsequently, the Editorial Committee takes the decision to publish or not the articles, based on the results of the evaluations made by the assigned arbitrators. In case of contradictions in the evaluations with respect to the publication of an article, the editorial committee will send the article to a third peer and will be inclined for the two evaluations that have the same concept with respect to the publication of the article.

In each call the main author must suggest at least four possible external arbitrators to his work institution evaluators, who must be specialists in the specific topic of the article sent and must have at least Masters level, and at least two must to be international. Potential evaluators can belong to a university or industry, public or private; their complete names must be provided, highest academic

formation, institutional affiliation and e-mail. The editorial committee will analyze these four potential evaluators in order to enrich the database of arbitrators of *Tecnura* journal.

The Editorial Committee of *Tecnura* journal reserves the right to print, reproduce total or partially the article, as the right to accept or reject it. In the same way, it has the right to make any editorial modification that considers necessary; in this case the author will receive written recommendations from the evaluators. If accepted, authors must deliver the article with the suggested adjustments within the dates given by the journal to guarantee its publication in the programmed number.

CONTACT

For any additional information request, please send an e-mail to *Tecnura* journal tecnura@udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com or by mail to Cesar Augusto Garcia Ubaque, Director and Publisher of *Tecnura* Journal, to the following address:

Tecnura Journal
Journals Room, Block 5, Office 305.
Faculty of Technology
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Transversal 70 B N. 73 a 35 sur
Phone: 571-3238400 Extension: 5003
Mobile: 57-3153614852
Bogotá D.C., Colombia

Email:

tecnura@udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com

Web page:

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/index>



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

SUSCRIPCIÓN

Revista *Tecnura*

Nombre completo: _____
Institución u organización: _____
Factura a nombre de: _____
Dirección de envío: _____
Ciudad: _____ Departamento, Estado o provincia: _____
Código postal: _____ Apartado aéreo / P.O. Box: _____
País: _____ Correo electrónico: _____
Teléfono: _____ Fax: _____ Firma: _____

Tabla de costos de suscripción:

| Región | 1 Año | 2 Años |
|----------------------------|------------|------------|
| Bogotá | 40 000 COP | 70 000 COP |
| Colombia | 45 000 COP | 80 000 COP |
| América Latina y el Caribe | 40 USD | 70 USD |
| Estados Unidos y Canadá | 40 USD | 70 USD |
| Otras regiones | 60 USD | 100 USD |

Nota: los precios tanto en dólares como en pesos incluyen el valor del envío.

Diligenciar el formato de suscripción y enviarlo por correo junto con la copia del recibo de consignación a la dirección postal que aparece en el parte inferior de esta página o escaneado a los correos electrónicos tecnura@udistrital.edu.co y tecnura@gmail.com. La consignación nacional se realiza en el Banco de Occidente a nombre de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas en la cuenta de ahorros número 230-81461-8.

Canje y suscripciones

Enviar a Ing. César Augusto García Ubaque, PhD.
Director y Editor Revista *Tecnura*

Biblioteca

Facultad Tecnológica
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Transversal 70B No. 73A - 35 sur
Teléfono: +57 - 1 - 7311542
Celular: +57 - 3153614852
Bogotá, D.C., Colombia
Correo electrónico: tecnura@udistrital.edu.co tecnura@gmail.com
Tecnura en internet: <http://tecnura.udistrital.edu.co>



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

SIGN UP

Tecnura journal

Full name: _____
Institution or organization: _____
Invoice name: _____
Mailing address/address: _____
City: _____ Department, state or province: _____
Zip code: _____ P.O. Box: _____
Country: _____ E-mail: _____
Phone number: _____ Fax: _____ Signature: _____

Table of subscription costs:

| Región | 1 year | 2 year |
|---|--------|---------|
| Bogotá | 23 USD | 40 USD |
| Colombia | 26 USD | 46USD |
| Latin America and The Caribbean | 40 USD | 70 USD |
| The United States of America and Canada | 40 USD | 70 USD |
| Other regions | 60 USD | 100 USD |

Note: prices in both dollars and pesos include the value of the shipment.

Fill out the subscription form and mail it along with a copy of the receipt of consignment to the e-mail address that appears in the bottom of this page or scanned to the following E-mails: tecnura@udistrital.edu.co and tecnura@gmail.com. The national bank deposit is done in Banco de Occidente in the name of Universidad Distrital Francisco José de Caldas in the savings account number 230-81461-8.

Exchange and Subscription

Send Ing Cesar Augusto Garcia Ubaque PhD.
Editor and Publisher Tecnura Journal

Library

Technology Faculty
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Transversal 73A No. 70B-35 Sur
Phone: +57 - 1 - 7311542
Mobile: +57-3153614852
E-mail: tecnura@udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com