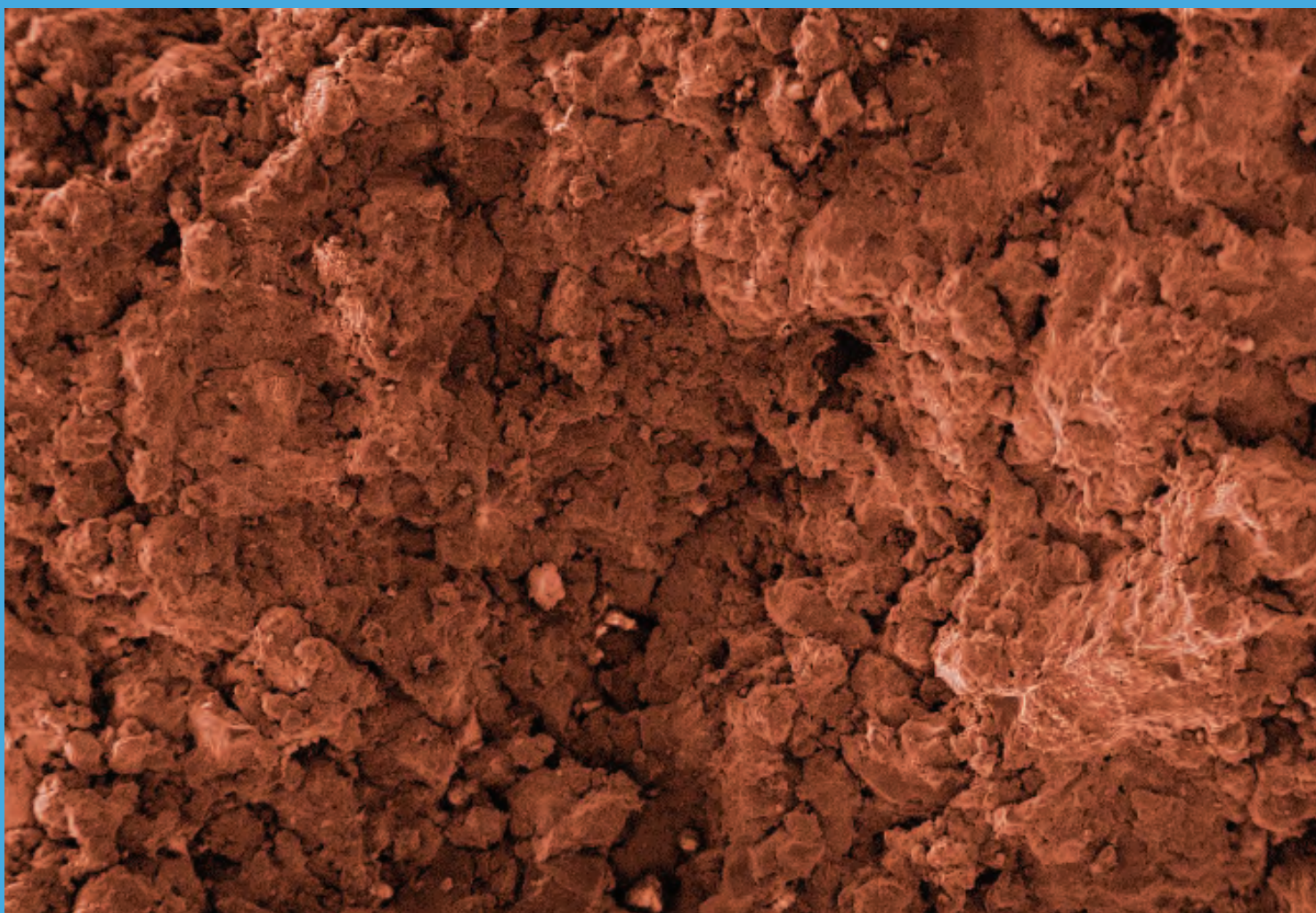


DYNA

Journal of the Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia - Medellin Campus



DYNA 83 (199), December, 2016 - ISSN 0012-7353

Tarifa Postal Reducida No. 2014-287 4-72

La Red Postal de Colombia, Vence 31 de Dic. 2016.



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

DYNA is an international journal published by the Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín Campus since 1933. DYNA publishes peer-reviewed scientific articles covering all aspects of engineering. Our objective is the dissemination of original, useful and relevant research presenting new knowledge about theoretical or practical aspects of methodologies and methods used in engineering or leading to improvements in professional practices. All conclusions presented in the articles must be based on the current state-of-the-art and supported by a rigorous analysis and a balanced appraisal. The journal publishes scientific and technological research articles, review articles and case studies.

DYNA publishes articles in the following areas:

Organizational Engineering
Civil Engineering
Materials and Mines Engineering

Geosciences and the Environment
Systems and Informatics
Chemistry and Petroleum

Mechatronics
Bio-engineering
Other areas related to engineering

Publication Information

DYNA (ISSN 0012-73533, printed; 2346-2183, online) is published by the Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, with a bimonthly periodicity (February, April, June, August, October, and December). Circulation License Resolution 000584 de 1976 from the Ministry of the Government.

Contact information

Web page: <http://dyna.unalmed.edu.co>
E-mail: dyna@unal.edu.co
Mail address: Revista DYNA
Facultad de Minas Universidad Nacional de Colombia -
Medellín Campus
Carrera 80 No. 65-223 Bloque M9 - Of.:107
Telephone: (574) 4255068 Fax: (574) 4255343
Medellín - Colombia

© Copyright 2016. Universidad Nacional de Colombia

The complete or partial reproduction of texts with educational ends is permitted, granted that the source is duly cited. Unless indicated otherwise.

Notice

All statements, methods, instructions and ideas are only responsibility of the authors and not necessarily represent the view of the Universidad Nacional de Colombia. The publisher does not accept responsibility for any injury and/or damage for the use of the content of this journal.

The concepts and opinions expressed in the articles are the exclusive responsibility of the authors.

Institutional Exchange Request

DYNA may be requested as an institutional exchange through the e-mail canjebib_med@unal.edu.co or to the postal address:

Biblioteca Central "Efe Gómez"
Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín
Calle 59A No 63-20
Teléfono: (57+4) 430 97 86
Medellín - Colombia

Indexing and Databases

DYNA is admitted in:

The National System of Indexation and Homologation of Specialized Journals CT+I-PUBLINDEX, Category A1

Science Citation Index Expanded
Web of Science - WoS, Thomson Reuters
Journal Citation Reports - JCR
SCImago Journal & Country Rank - SJR
Science Direct
SCOPUS
Chemical Abstract - CAS
Scientific Electronic Library on Line - SciELO
GEOREF
PERIÓDICA Data Base
Latindex
Actualidad Iberoamericana
RedALyC - Scientific Information System
Directory of Open Access Journals - DOAJ
PASCAL
CAPES
UN Digital Library - SINAB
CAPES
EBSCO Host Research Databases

Publisher's Office

Juan David Velásquez Henao, Director
Mónica del Pilar Rada T., Editorial Coordinator
Catalina Cardona A., Editorial Assistant
Amilkar Álvarez C., Diagrammer
Byron Llano V., Editorial Assistant
Landsoft S.A., IT

Reduced Postal Fee

Tarifa Postal Reducida # 2014-287 4-72. *La Red Postal de Colombia*, expires Dec. 31st, 2016



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

DYNA



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

COUNCIL OF THE FACULTAD DE MINAS

Dean

Pedro Nel Benjumea Hernández PhD

Vice-Dean

Ernesto Pérez González, PhD

Vice-Dean of Research and Extension

Santiago Arango Aramburo, PhD

Director of University Services

Santiago Medina Hurtado, PhD

Academic Secretary

Francisco Javier Díaz Serna, PhD

Representative of the Curricular Area Directors

Wilfredo Montealegre Rubio, PhD

Representative of the Curricular Area Directors

Evelio Andrés Gómez Giraldo, PhD

Representative of the Basic Units of Academic-Administrative Management

Juan David Velásquez Henao, PhD

Representative of the Basic Units of Academic-Administrative Management

Néstor Ricardo Rojas Reyes, PhD

Professor Representative

Luis Hernán Sánchez Arredondo, MSc

Delegate of the University Council

León Restrepo Mejía, PhD

Student representative (alternate) undergraduate at the Faculty Council

Alejandra Jiménez Upegui

FACULTY EDITORIAL BOARD

Dean

Pedro Nel Benjumea Hernández, PhD

Vice-Dean of Research and Extension

Santiago Arango Aramburo, PhD

Members

Oscar Jaime Restrepo Baena, PhD

Juan David Velásquez Henao, PhD

Jaime Aguirre Cardona, PhD

Alfonso Espinosa Parada, PhD

Mónica del Pilar Rada Tobón, MSc

JOURNAL EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief

Juan David Velásquez Henao, PhD

Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Editors

George Barbastathis, PhD

Massachusetts Institute of Technology, USA

Tim A. Osswald, PhD

University of Wisconsin, USA

Juan De Pablo, PhD

University of Wisconsin, USA

Hans Christian Öttinger, PhD

Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Switzerland

Patrick D. Anderson, PhD

Eindhoven University of Technology, the Netherlands

Igor Emri, PhD

Associate Professor, University of Ljubljana, Slovenia

Dietmar Drummer, PhD

Institute of Polymer Technology University Erlangen-Nürnberg, Germany

Ting-Chung Poon, PhD

Virginia Polytechnic Institute and State University, USA

Pierre Boulanger, PhD

University of Alberta, Canadá

Jordi Payá Bernabeu, Ph.D.

Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH)

Universitat Politècnica de València, España

Javier Belzunce Varela, Ph.D.

Universidad de Oviedo, España

Luis Gonzaga Santos Sobral, PhD

Centro de Tecnología Mineral - CETEM, Brasil

Agustín Bueno, PhD

Universidad de Alicante, España

Henrique Lorenzo Cimadevila, PhD

Universidad de Vigo, España

Mauricio Trujillo, PhD

Universidad Nacional Autónoma de México, México

Carlos Palacio, PhD

Universidad de Antioquia, Colombia

Jorge García-Sucerquia, PhD

Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Juan Pablo Hernández, PhD

Universidad Nacional de Colombia, Colombia

John William Branch Bedoya, PhD

Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Enrique Posada, Msc

INDISA S.A, Colombia

Oscar Jaime Restrepo Baena, PhD

Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Moisés Oswaldo Bustamante Rúa, PhD

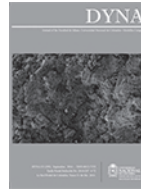
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Hernán Darío Álvarez, PhD

Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Jaime Aguirre Cardona, PhD

Universidad Nacional de Colombia, Colombia



CONTENTS

Plain-concrete strip road pavements: 3D finite element analysis Armando Orobio & Juan Carlos Orobio	9
Fault detection and diagnosis through artificial intelligence techniques, a state of art Luini Leonardo Hurtado-Cortés, Edwin Villarreal-López & Luis Villarreal-López	19
A college degree recommendation model Milton Rafael Maridueña-Arroyave & Ailyn Febles-Estrada	29
Evaluación de la gestión financiera usando variables latentes en modelos estocásticos de fronteras eficientes Marisol Valencia-Cárdenas & Jorge Anibal Restrepo-Morales	35
Analysis of methanogenic and energetic potential from slaughterhouse wastewater using anaerobic digestion Liliana del pilar Castro-Molano, Humberto Escalante-Hernández, Oscar Julián Gómez-Serrato, Diana Paola Jiménez-Piñeros	41
Reduction of computational times using the equivalent rectangle concept in the physics-based surface – subsurface models Juliana Hurtado, Jesús Causapé, Raphael Abrahao & Anibal J. Pérez	50
Automated detection of photoreceptors in in-vivo retinal images Piero Rangel-Fonseca, Armando Gomez-Vieyra, Daniel Malacara-Hernandez & Mario C. Wilson	57
Effect of amplitude and pulse in low frequency ultrasound on oil/water emulsions María Alejandra Cabrera-Trujillo, Luz Indira Sotelo-Díaz & María Ximena Quintanilla-Carvajal	63
iaAn adaptive controller applied to an anti-lock braking system laboratory Cuahtémoc Acosta-Lúa, Stefano Di Gennaro & María Eugenia Sánchez-Morales	69
Modeling attenuation and dispersion of acoustic waves in porous media containing immiscible non viscous fluids Alejandro Duitama-Leal, Ovidio Almanza & Luis Montes-Vides	78
Influence of the mixing ratio on the anaerobic co-digestion of municipal biowaste with domestic wastewater sludge on methane production Brayan Alexis Parra-Orobio, Patricia Torres-Lozada & Luis Fernando Marmolejo-Rebellón	86
Characterization of construction and demolition waste in order to obtain Ca and Si using a citric acid treatment Erica Mejía, Patricio Navarro, Cristian Vargas, Jorge I. Tobón, Walter Osorio	94
Technical and economic study of striking and clearing operations in buildings under construction. Case study in Bogotá, Colombia Yezid A. Alvarado, María Isabel Pérez-Gómez, John Alexis Castellanos-Reyes & Isabel Gasch	102
Magnetic and structural behavior of $\text{La}_{1.5-x}\text{Ba}_{1.5+x-y}\text{Ca}_y\text{Cu}_3\text{O}_z$ system $0.3 \leq x \leq 0.4$ and $0.4 \leq y \leq 0.5$ Cesar Camilo Canaria-Camargo, Armando Sarmiento-Santos, Carlos Arturo Parra-Vargas	108
Procedure to energetic analysis of centrifugal pumping systems Manoel Socorro Santos-Azevedo, Carlos A. de León-Benítez, Jandecy Cabral-Leite & Ignacio Pérez-Abril	114
Study of surface movement of a shallow-multilayered soil under P-waves Victor H. Aristizábal, Camilo A. Flórez, Santiago Pérez, Marlon R. Fulla, Juan L. Palacio, Iliana M. Ramírez & Francisco J. Vélez	118
Uplift force and momenta on a slab subjected to hydraulic jump Mauricio González Betancourt	124
The behavior of a foundation transversally loaded at the top over highly porous and collapsible soil Roberto Kassouf, David de Carvalho & Paulo José Rocha-de Albuquerque	134
The systemic approach as an analytical tool of an electronic device, case study: "iPod Nano seventh generation" Diego Fernando Sánchez-Zambrano & Oscar Mayorga-Torres	140
Characterization of product design process of a company that provides design services. Proposal based on a process approach Jimmy Schwabe-Neveu, Paulina Fuentes-Stuardo & Juan Carlos Briede-Westermeyer	148

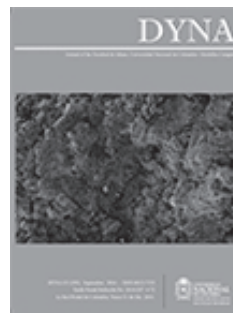
Patch antenna with reconfigurable sense of rotation for CubeSat satellite applications Carlos Arturo Suárez-Fajardo, Diego Rafael Méndez-Marín, Alexander Pineda-Rodríguez & Gustavo Adolfo Puerto-Leguizamón	157
RWA: Optical Networks with Heuristics Algorithms Arturo Benito Rodríguez-García, Leonardo Juan Ramírez-López & Jaime César Espinoza-Oyarzún	165
A polynomial chaos expansion approach to the analysis of uncertainty in viscoelastic structural elements Francisco Evangelista Jra & Nelson Afanador García	172
Construction, development and tests of a low cost, high efficiency stove-boiler for low calorific power biomasses Reinaldo Delgado-García, Luis Velasco-Roldán, Eduardo Onofa-Cuichán & Estefanía Armas-Figueroa	183
Numerical determination of the solubility of vitamin C in various solvents, for selective extraction or for its incorporation in formulations oriented to care, welfare and health of the skin Carlos Esteban Aristizábal-Alzate	191
Gully erosion, land uses, water and soil dynamics: A case study of Nazareno (Minas Gerais, Brazil) Ligia de Freitas Sampaio, Maria Paula Pires- de Oliveira, Raul Cassaro, Valéria Guimarães Silvestre-Rodrigues, Osni José Pejon, Joel Barbujani-Sígolo & Vinicius Martins-Ferreira	198
Dual arm compressive spectral imaging in the visible and IR range Yenni Paloma Villa-Acuña & Henry Arguello-Fuentes	207
The emission index as a parameter for assessing the environmental pollution from thermal power plants. Case study Nadime Mustafa Moraes, Ubiratan Holanda Bezerra, Jorge Laureano Moya Rodríguez, Jandecy Cabral Leite	218
Gaussian clarification based on sign function José de Jesús Medel-Juárez, Mario Espinosa-Santiago & José Luis Fernández Muñoz	225
Rheological properties of carbon nanotubes as additive in a lubricating fluid Jesús Antonio Carlos-Cornelio, Paula Andrea Cuervo-Velásquez, María Isabel Ardila, William Orozco-Murillo, Luís Felipe Jaramillo-Zuluaga, Lina Marcela Hoyos-Palacio, Javier Lara-Romero & Alejandro Toro	229

Our cover

Image alluding to Article:
Gully erosion, land uses, water and soil dynamics: A case study
of Nazareno (Minas Gerais, Brazil)

Authors:

Ligia de Freitas Sampaio, Maria Paula Pires de Oliveira, Raul
Cassaro, Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues, Osni José Pejon,
Joel Barbujani Sígolo & Vinicius Martins Ferreira



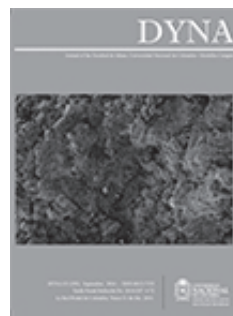
CONTENIDO

Pavimentos con placa-huella de concreto simple: Análisis con elementos finitos 3D Armando Orobio & Juan Carlos Orobio	9
Detección y diagnóstico de fallas mediante técnicas de inteligencia artificial, un estado del arte Luini Leonardo Hurtado-Cortés, Edwin Villarreal-López & Luis Villarreal-López	19
Modelo de recomendación de carreras univeristarias Milton Rafael Maridueña-Aroyave & Ailyn Febles-Estrada	29
Evaluation of financial management using latent variables in stochastic frontier analysis Ejemplo del formato de un artículo Marisol Valencia-Cárdenas & Jorge Anibal Restrepo-Morales	35
Análisis del potencial metanogénico y energético de las aguas residuales de una planta de sacrificio bovino mediante digestión anaeróbica Liliana del pilar Castro-Molano, Humberto Escalante-Hernández, Oscar Julián Gómez-Serrato, Diana Paola Jiménez-Piñeros	41
Reducción de tiempos computacionales usando el concepto de rectángulo equivalente en los modelos físicos superficiales – subsuperficiales Juliana Hurtado, Jesús Causapé, Raphael Abrahao & Anibal J. Pérez	50
Detección automatizada de fotorreceptores en imágenes retinianas in-vivo Piero Rangel-Fonseca, Armando Gomez-Vieyra, Daniel Malacara-Hernandez & Mario C. Wilson	57
Efecto de la amplitud y pulsación en ultrasonido de sonda a baja frecuencia sobre emulsiones aceite/agua María Alejandra Cabrera-Trujillo, Luz Indira Sotelo-Díaz & María Ximena Quintanilla-Carvajal	63
Control adaptivo aplicado a un laboratorio de un sistema de frenos antibloqueo Cuauhtémoc Acosta-Lúa, Stefano Di Gennaro & María Eugenia Sánchez-Morales	69
Modelado de atenuación y dispersión de ondas acústicas en medios porosos que contienen fluidos inmiscibles no viscosos Alejandro Duitama-Leal, Ovidio Almanza & Luis Montes-Vides	78
Influencia de la proporción de mezcla en la codigestión anaerobia de biorresiduos municipales con lodos de aguas residuales domésticas sobre la producción de metano Brayan Alexis Parra-Orobio, Patricia Torres-Lozada & Luis Fernando Marmolejo-Rebellón	86
Caracterización de un residuo de construcción y demolición para la obtención de Ca y Si mediante tratamiento con ácido cítrico Erica Mejía, Patricio Navarro, Cristian Vargas, Jorge I. Tobón, Walter Osorio	94
Estudio técnico económico de los procesos de cimbrado y descimbrado en edificaciones. Estudio de caso en Bogotá, Colombia Yezid A. Alvarado, María Isabel Pérez-Gómez, John Alexis Castellanos-Reyes & Isabel Gasch	102
Comportamiento magnético y estructural del sistema $\text{La}_{1.5-x}\text{Ba}_{1.5+x-y}\text{CaCu}_3\text{O}_z$ $0.2 \leq x \leq 0.4$ y $0.3 \leq y \leq 0.5$ Cesar Camilo Canaria-Camargo, Armando Sarmiento-Santos, Carlos Arturo Parra-Vargas	108
Procedimiento para el análisis energético de sistemas de bombeo centrífugos Manoel Socorro Santos-Azevedo, Carlos A. de León-Benítez, Jandecy Cabral-Leite & Ignacio Pérez-Abril	114
Estudio del movimiento superficial de un suelo multi-capas poco profundo sometido a ondas P Victor H. Aristizábal, Camilo A. Flórez, Santiago Pérez, Marlon R. Fulla, Juan L. Palacio, Iliana M. Ramírez & Francisco J. Vélez	118
Fuerza de levantamiento y momentos en una losa sometida a salto hidráulico Mauricio González Betancourt	124
Comportamiento de cimentación cargada transversalmente en su cabeza en suelo altamente poroso y colapsable Roberto Kassouf, David de Carvalho & Paulo José Rocha-de Albuquerque	134
El enfoque sistémico como herramienta de análisis de un artefacto electrónico, caso de estudio: “iPod Nano de séptima generación” Diego Fernando Sánchez-Zambrano & Oscar Mayorga-Torres	140

Caracterización del proceso de diseño de productos de una empresa prestadora de servicios de diseño. Propuesta basada en un enfoque de procesos	148
Jimmy Schwabe-Neveu, Paulina Fuentes-Stuardo & Juan Carlos Briede-Westermeyer	
Antena de parche con sentido de giro reconfigurable para aplicaciones en satélites CubeSat	157
Carlos Arturo Suárez-Fajardo, Diego Rafael Méndez-Marín, Alexander Pineda-Rodríguez & Gustavo Adolfo Puerto-Leguizamón	
RWA: Redes Ópticas con Algoritmos Heurísticos	165
Arturo Benito Rodríguez-García, Leonardo Juan Ramírez-López & Jaime César Espinoza-Oyarzún	
Un enfoque de polinomio de expansión de caos al análisis de la incerteza en elementos estructurales visco elásticos	172
Francisco Evangelista Jra & Nelson Afanador García	
Desarrollo, construcción y pruebas de una cocina-calentador de bajo costo y alta eficiencia energética para biomásas de reducido poder calorífico	183
Reinaldo Delgado-García, Luis Velasco-Roldán, Eduardo Onofa-Cuichán & Estefanía Armas-Figueroa	
Determinación numérica de la solubilidad de la vitamina C en diferentes solventes, para la extracción selectiva o para la incorporación en formulaciones orientadas al cuidado, bienestar y salud de la piel	191
Carlos Esteban Aristizábal-Alzate	
Erosión, usos del suelo, la dinámica del agua y del suelo: Un estudio de caso de Nazareno (Minas Gerais, Brasil)	198
Ligia de Freitas Sampaio, Maria Paula Pires- de Oliveira, Raul Cassaro, Valéria Guimarães Silvestre-Rodrigues, Osni José Pejon, Joel Barbujani-Sígolo & Vinicius Martins-Ferreira	
Sistema dual para muestreo compresivo de imágenes espectrales en el rango visible e infrarrojo	207
Yenni Paloma Villa-Acuña & Henry Arguello-Fuentes	
El índice de emisiones como parámetro para evaluar la contaminación ambiental de las Centrales Térmicas. Estudio de caso	218
Nadime Mustafa Moraes, Ubiratan Holanda Bezerra, Jorge Laureano Moya Rodríguez, Jandecy Cabral Leite	
Clarificación gaussiana basado en la función signo	225
José de Jesús Medel-Juárez, Mario Espinosa-Santiago & José Luis Fernández Muñoz	
Propiedades reológicas de nanotubos de carbono como aditivo en un fluido lubricante	229
Jesús Antonio Carlos-Cornelio, Paula Andrea Cuervo-Velásquez, María Isabel Ardila, William Orozco-Murillo, Luis Felipe Jaramillo-Zuluaga, Lina Marcela Hoyos-Palacio, Javier Lara-Romero & Alejandro Toro	

Nuestra carátula
Imagen alusiva al artículo:
Erosión, usos del suelo, la dinámica del agua y del suelo: Un estudio de caso de Nazareno (Minas Gerais, Brasil)

Autores:
Ligia de Freitas Sampaio, Maria Paula Pires de Oliveira, Raul Cassaro, Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues, Osni José Pejon, Joel Barbujani Sígolo & Vinicius Martins Ferreira



Plain-concrete strip road pavements: 3D finite element analysis

Armando Orobio ^a & Juan Carlos Orobio ^b

^a Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, Colombia. armando.orobio@correounivalle.edu.co

^b El Alcázar S.A.S, Cali, Colombia, jorobio1@gmail.com

Recibido: Enero 26th, 2016. Recibido en versión revisada: Junio 13th, 2016. Aceptado: Julio 11th, 2016.

Abstract

The construction of strip road pavements has increased in the recent days in Colombia. This type of pavements is being used for rural low-traffic volume roads, the type of strip road pavement used nationwide is made of reinforced-concrete, the construction is based mainly on the particular construction specification 500-1P that has only one configuration of the pavement, which raises doubts on its application for different projects. In this research, a finite element analysis was performed to study the response of concrete strip road under different load configurations and soil support. The design of plain-concrete strip roads pavements was evaluated for the maximum loads of C3 trucks and 20 years of design period. The results showed that although this type of strip road may meet fatigue criteria, the erosion criteria is uncertain due to lack of data to calibrate an erosion model to perform this evaluation.

Keywords: Pavements; strip road; rural roads; low-traffic roads; plain concrete.

Pavimentos con placa-huella de concreto simple: Análisis con elementos finitos 3D

Resumen

La construcción de pavimentos en placa-huella se ha incrementado en Colombia en los últimos años, este tipo de pavimento se utiliza para vías rurales con bajo tránsito. El tipo de placa huella utilizado en el país es de concreto reforzado, basado principalmente en un diseño general definido por la especificación particular 500-1P, que genera muchas dudas para su aplicación en diferentes proyectos. En la presente investigación se realizó una modelación con elementos finitos para estudiar el comportamiento de los pavimentos con placa-huella ante diferentes condiciones de carga y soporte. Se analizó la posibilidad de diseñar pavimentos con placa-huella de concreto simple, para las cargas máximas del camión C3 y con período de diseño de 20 años. Se encontró que desde el punto de vista del criterio de fatiga esto sería posible, pero el comportamiento por erosión de estos pavimentos es incierto, debido a que en la actualidad no existe suficiente información para calibrar un modelo para realizar la evaluación por este criterio.

Palabras clave: Pavimentos; placa-huella; vías rurales; bajo tránsito; concreto simple.

1. Introducción

La Placa-huella en concreto es un sistema de pavimentación para vías de bajos volúmenes de tránsito, en el cual se pavimentan únicamente las huellas por donde circulan las ruedas de los vehículos, la separación entre las franjas de concreto se rellena con piedra pegada, un material con las características de concreto ciclópeo, rocas distribuidas adecuadamente y pegadas con concreto, dependiendo del ancho de la vía se construyen cunetas y bordillos en concreto para proveer la vía de un sistema de

drenaje superficial, sí se requiere la separación entre la parte exterior de cada placa-huella y la cuneta se rellena también con piedra pegada (Fotografía 1).

El uso de pavimentos en placa-huella de concreto se ha incrementado en Colombia en los últimos años, al parecer, debido a las condiciones climáticas de muchas zonas del país que hacen que la conservación de vías en afirmado sea poco efectiva, con necesidades de inversión que en la mayoría de los casos no reflejan los esfuerzos en conservación de redes viales terciarias y secundarias que realizan los entes gubernamentales.

How to cite: Orobio A. & Orobio J.C. Pavimentos con placa-huella de concreto simple: Análisis con elementos finitos 3D DYNA 83 (199) pp. 9-18, 2016.

La subdirección de redes terciarias del Instituto Nacional de Vías, varios departamentos y municipios colombianos han venido adelantando contratos de pavimentación de vías de bajos volúmenes de tránsito con pavimentos en placa-huella.

Considerando el uso masivo de este tipo de pavimento y la ausencia de un método unificado de diseño y construcción de los mismos, el Instituto Nacional de Vías – INVIAS contrató mediante concurso de méritos al consorcio Manuales y Guías CEAL 2015, conformado por las firmas El Alcázar SAS, La Compañía de consultoría y construcciones LTDA. y Vías Alfa EU, para la elaboración de una Guía de Diseño de Pavimentos con Placa-huella.

La guía de diseño debe propender por la mejor relación costo-beneficio en el diseño de este tipo de pavimentos para un periodo de diseño de 20 años. Este artículo presenta una modelación con elementos finitos tridimensionales realizada para estudiar el comportamiento de estos pavimentos bajo diferentes condiciones de carga y calidad del suelo de soporte.

1.1. Situación actual de placa-huella en Colombia

Los pavimentos en placa-huella que se construyen actualmente en Colombia son en concreto reforzado, en su mayoría regulados por la especificación particular 500 – IP [1], que al parecer no es una especificación oficial del INVIAS, pero se ha venido utilizando debido a la ausencia de una mejor especificación.

De acuerdo con la especificación 500-1P, este pavimento consiste en dos placas-huellas paralelas en concreto reforzado y separadas con piedra pegada, con la geometría mostrada en la Fig. 1. Las dos placas-huella en concreto reforzado tienen ancho de 0.90 mt cada una, separadas 0.90 mt entre sí, con una longitud de 5.0 mt distribuida entre 3 riostras de 13 cm de ancho, una a cada extremo y otra en el centro de las placas-huella, las cuales tienen una longitud de 230.5 cm cada una, medida entre riostras, la separación entre las placas-huella se rellena con piedra pegada, el espesor de la placa-huella es de 15 cm y está apoyada sobre un material

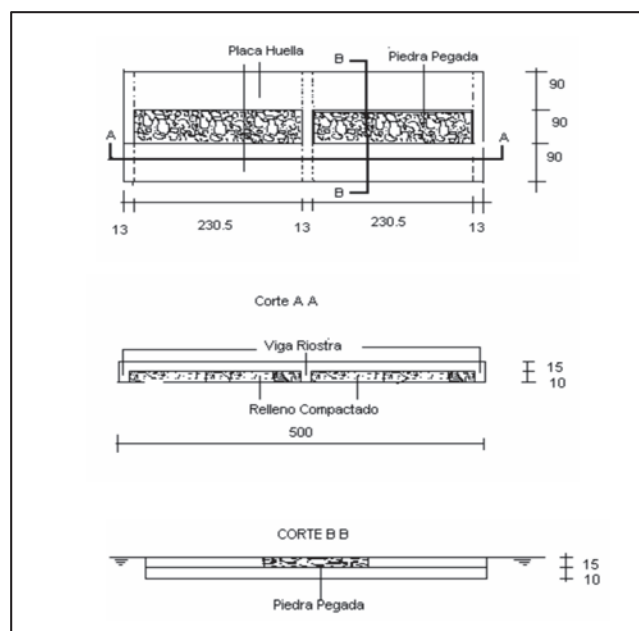


Figura 1. Geometría de Placa-huella de la especificación 500-1P
Source: [1].

granular de 10 cm de espesor, según la especificación se requiere que este material cumpla como mínimo la especificación de afirmado y tiene como función garantizar adecuado soporte a las placas-huella.

El acero de refuerzo está constituido por una armadura de acero No 2 (1/4") separadas cada 30 cm en las dos direcciones, para las riostras se requiere dos aceros No 3 (3/8") arriba y abajo con estribos de 1/4" cada 20 cm.

Aunque la norma es clara en definir la geometría de las placas-huella, en la práctica se encuentran referencias de placas-huella construidas con diferentes espesores, se encuentran diseños en donde se ha calculado el espesor de la placa-huella utilizando el método de diseño de pavimentos de concreto de la PCA (Portland Cement Association), encontrando espesores mucho mayores a los 15 cm requeridos por la especificación 500-1P, pero conservando el refuerzo exigido por la especificación. También se han realizado otras modificaciones en los proyectos que hacen que existan diferencias entre la especificación y lo que finalmente se construye, estos ajustes se hacen para garantizar la estabilidad de la obra y generalmente están del lado de la seguridad, pero reflejan el poco conocimiento que se tiene del comportamiento de este tipo de pavimentos bajo las condiciones específicas de tránsito, geotecnia y clima.

Debido a estas situaciones, los costos de los proyectos se incrementan, superando los montos considerados como razonables para mejoramiento de redes terciarias o secundarias con bajos volúmenes de tránsito. En la actualidad es común entre constructores y consultores, escuchar interrogantes sobre si este tipo de pavimento se puede construir de manera más económica, se han planteado preguntas sobre si es realmente necesario construir placas-huella de concreto reforzado, si son necesarias las riostras, sobre cuál es el efecto de diferentes calidades de subrasante, si el espesor del material granular es suficiente, cuáles son las



Fotografía 1. Placa - huella en concreto
Source: The authors.

máximas cargas por ejes que puede soportar, pero quizás la pregunta más importante es que si se eliminan los elementos que al parecer son innecesarios, las placas-huella podrían ser una solución de pavimentación mucho más económica para las vías de bajos volúmenes de tránsito.

Ante todos estos interrogantes, es claro que en la actualidad no se entiende claramente el comportamiento de los pavimentos con placas-huella de concreto y la interrelación entre las variables de diseño de estos pavimentos, por lo que en el marco del presente estudio se decidió dar respuesta a los interrogantes planteados.

2. Metodología

En la presente investigación se analiza el comportamiento de los pavimentos de placa-huella con losas de concreto simple, el análisis se realiza mediante un modelo de elementos finitos tridimensional para analizar la respuesta de las placas-huella a diferentes tipos de ejes vehiculares, con trabazón de agregados o con pasadores de transferencia de carga, diferentes calidades de subrasante y efectos de gradientes de temperatura. Al final se evalúan criterios de fatiga y erosión para evaluar si es posible realizar la construcción de placas-huellas en concreto simple, bajo las condiciones de tránsito esperadas y cumpliendo con el requisito contractual de 20 años de periodo de diseño.

2.1. Tipos de vehículos que circulan por pavimentos en placa-huella

Los pavimentos con placa-huella son utilizados para vías de bajos volúmenes de tránsito de la red terciaria. Por tratarse de pavimentos de concreto, en la evaluación de cargas de tránsito lo que importa es el tipo, peso y repeticiones esperadas de los ejes. Los vehículos comerciales que se espera que circulen por pavimentos en placa-huella son el camión C2 y el C3, el camión C2 tiene un eje simple de rueda simple adelante (SRS) y un eje simple de rueda doble atrás (SRD), el camión C3 tiene un eje simple de rueda simple adelante (SRS) y un eje tándem atrás (Fig. 2). Los pesos máximos para estos ejes están regulados por la resolución 004100 del 2004 del Ministerio de Transporte [2], sin embargo, sería recomendable que se analizará en cada región si estos pesos máximos son adecuados para la red terciaria, debido a que estas cargas podrían resultar considerablemente altas para pavimentos con placa-huella, si estos se quieren diseñar con placas de concreto simple como una alternativa más económica a las placas-huella reforzadas que se construyen actualmente. En pavimentos de placa-huella cada una de las huellas soporta un lado del eje, por lo que para efectos de la presente modelación se consideró una distribución de 50% del peso total del eje en cada huella (semieje).

2.2. Modelación de pavimentos en placa-huella con elementos finitos 3D

Para analizar la respuesta estructural de un sistema de pavimento de concreto se requiere un modelo de respuesta que permita realizar análisis de [3]:

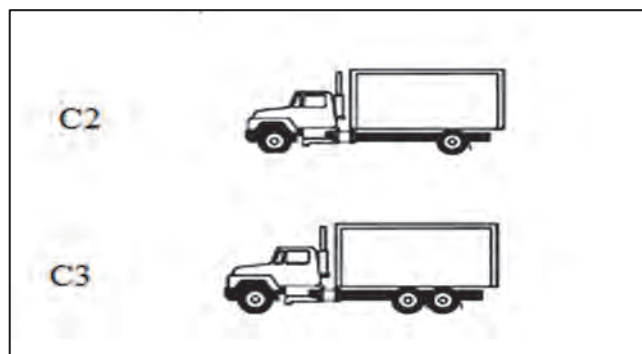


Figura 2. Tipo y peso máximo de los ejes vehiculares
Source: [2].

- Losas de cualquier geometría.
- Losa y material de subbase ligados o no ligados, y con diferentes propiedades de los materiales.
- Pavimentos sobre subrasante sólida o líquida.
- Varias losas con soporte uniforme o no uniforme.
- Múltiples losas con transferencia de carga en las juntas y fisuras.
- Losas con diferentes tipos de cargas, incluidos ejes simples y múltiples, diferentes posiciones de carga.
- Diferentes condiciones de bermas.
- Sistemas con espesores no uniformes entre losas y bermas.

Las características exigidas para el modelo de respuesta para pavimentos de concreto, son las mismas que se requieren para analizar pavimentos en placa-huella de concreto simple, debido a esto se decidió utilizar EverEF 2.25, un software de elementos finitos 3D para modelar pavimentos de concreto y de uso libre, desarrollado en el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Maine [4] que cumple con los requerimientos anteriores.

2.3. Definición del modelo para evaluación

Con base en la geometría de los pavimentos en placa-huella descrita anteriormente se evaluaron dos modelos:

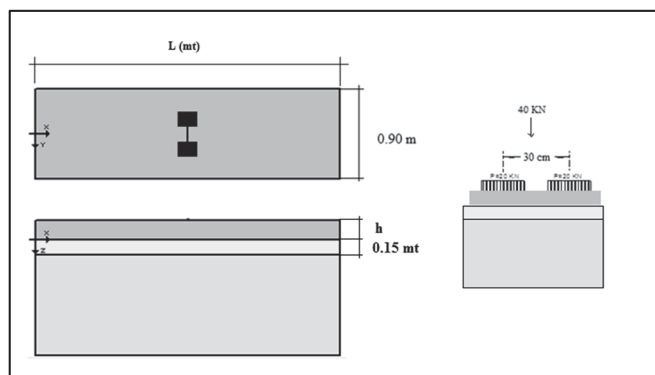


Figura 3. Modelo 1 semieje SRD en posición centro-centro
Fuente: Los autores.

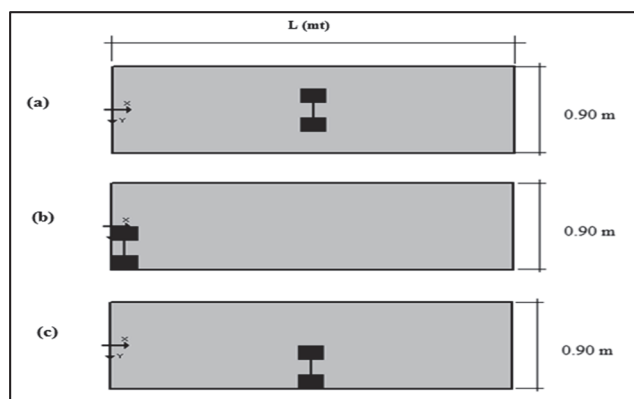


Figura 4. Modelo 1 cargas centro-centro (a), esquina (b) y centro-borde (c).
Source: Los autores.

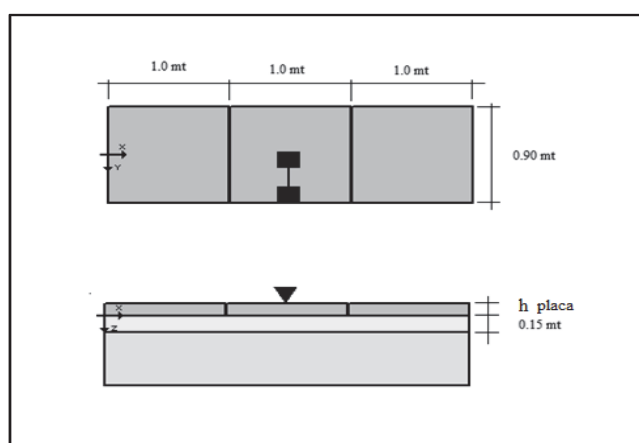


Figura 5. Modelo 2 con semieje SRD en posición centro-borde
Fuente: Los autores.

- **Modelo 1:** Este modelo consistió en una placa-huella de concreto de 0.9 m de ancho, longitud variable entre 3.0 m y 1.0 m, y espesor variable entre 0.15 m y 0.20 m, la placa-huella estaba soportada sobre una capa granular de 0.15 m de espesor con módulo de 200 MPa, apoyada sobre una subrasante blanda con módulo resiliente de 20 MPa. Este modelo fue utilizado para analizar el comportamiento de la placa huella ante carga vehicular y gradiente de temperatura (Fig. 3), con el fin de identificar las condiciones más críticas. La carga utilizada en este modelo fue un semieje simple de rueda doble de 40 kN (Correspondiente a un eje estándar de 80 kN), con separación entre ruedas de 0.30 m, la cual se ubicó en diferentes posiciones; Centro-Centro, Centro-Borde y Esquina (Fig. 4).
- **Modelo 2:** Este modelo se utilizó para hacer análisis posteriores a la identificación de las condiciones más críticas identificadas con el modelo 1; el modelo 2 consistió en evaluar placas-huella cortas, de 1.0 m de longitud. Se evaluaron tres placas-huellas cortas unidas mediante trabazón de agregados o con pasadores de transferencia de carga (Fig. 5). Este modelo se evaluó con cargas del semieje simple de rueda simple (27 kN), semieje simple de rueda doble (50 kN) y semieje tándem

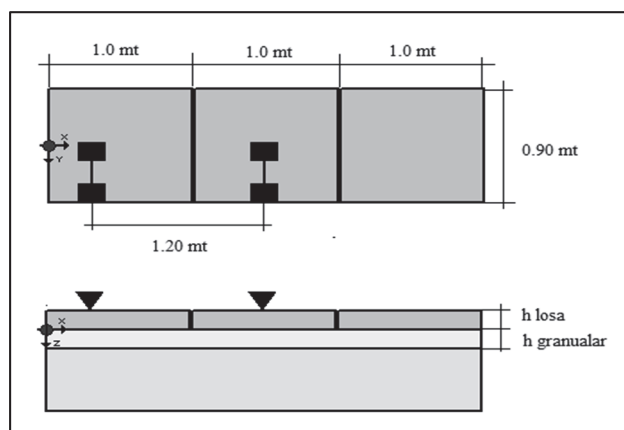


Figura 6. Modelo 2 con semieje tándem de rueda doble
Fuente: Los autores.

(100 kN). Con los ejes simples se utilizó la carga en posición centro-borde, que resultó ser la más crítica entre todas las posiciones evaluadas; Centro-Centro, Centro-Borde y Esquina. Con el eje tándem la posición más crítica resultó ser cuando una de las ruedas dobles del tándem está en posición borde-centro de la placa-huella (Fig. 6).

Para todos los casos se consideró la interface entre la placa y la subbase granular como ligada, esto se asume debido a que en el proceso constructivo las placas-huella se funden directamente sobre la subbase previamente compactada. Las características del concreto se definieron de la siguiente manera: El módulo de elasticidad 28.000 MPa, relación de Poisson's del concreto 0.2, coeficiente de expansión térmica 1.1×10^{-5} por $^{\circ}\text{C}$ y la densidad 2400 Kg/m³. Para la subbase granular se utilizó relación de Poisson's de 0.4 y para la subrasante 0.45, el módulo resiliente de estos materiales fue variable durante la evaluación. Para el modelo 1 la malla se conformó por 17 elementos en el eje x, 17 elementos el eje y, en el eje z se definieron 4 elementos para la losa, 4 para la subbase y 4 para la subrasante. Para el modelo 2, para cada una de las tres placas, la malla se conformó por 12 elementos en el eje x, 12 elementos el eje y, en el eje z se definieron 4 elementos para la losa, 4 para la subbase y 4 para la subrasante. Para la trabazón de agregados entre placas, se consideraron juntas entre 1 mm de espesor con una rigidez de 0.5 MPa/mm, considerando que las placas se funden continuamente y cuando el concreto ha endurecido se inducen las juntas con una cortadora.

3. Resultados de la evaluación

Con el propósito de entender mejor el comportamiento de los pavimentos de placa-huella y evaluar la posibilidad de construir pavimentos de placa-huella en concreto simple, eliminar los requerimientos de las cuantías de acero, facilitar la construcción y reducir los costos de este tipo de pavimentos, se evaluaron ambos modelos (modelo 1 y modelo 2) bajo diferentes condiciones.

Este tipo de pavimento debe evaluarse bajo los criterios de falla por carga última, fatiga y erosión, que son determinantes para el diseño del espesor mínimo de la placa. Además, debe estudiarse el efecto del gradiente de temperatura en los esfuerzos de las placas, fenómeno de alabeo.

3.1. Resultados de la evaluación del modelo 1

El modelo 1 se evaluó para placas-huellas de diferentes longitudes y espesores, con carga en las tres posiciones estudiadas (Centro-Centro, Centro-Borde y Esquina). La Tabla 1 muestra los resultados de los máximos esfuerzos de tensión obtenidos para las longitudes y espesores de placa evaluados, en todos los casos el esfuerzo máximo de tensión se presenta cuando la carga está ubicada en la posición centro-borde. En cada longitud de placa-huella evaluada, el esfuerzo disminuye con el incremento del espesor de la placa. Cuando se comparan los esfuerzos entre las diferentes longitudes, se encuentra que a menor longitud de la placa-huella, menor es el esfuerzo máximo de tensión al comparar placas del mismo espesor. Para efectos prácticos, si se reduce la longitud de la placa-huella se logran esfuerzos máximos de tensión menores, si se desea hacer una evaluación rápida de la magnitud de los esfuerzos calculados, se puede tomar como referencia el módulo de rotura del concreto (MR), los pavimentos de concreto generalmente se diseñan para MR entre 3.8 MPa y 4.5 MPa [5], para el caso de los pavimentos en placa-huella, que son para vías rurales y que generalmente se construyen con concreto hecho en obra, resulta conveniente requerir un valor bajo de MR, como factor de seguridad para reducir el máximo esfuerzo admisible antes de que el pavimento se fisure por carga última, sólo para efectos del presente análisis se tomará como referencia un MR de 3.0 MPa, que significaría trabajar con el 80% del valor de MR de 3.8 MPa.

Tabla 1.
Esfuerzo máximo de tensión (MPa) para diferentes posiciones de carga

Longitud (m)	Espesor (m)	Centro-Centro	Esquina	Centro-Borde	Centro-Borde (L + °T)
3.0	0.15	3.53	2.91	4.39	5.19
	0.16	3.25	2.67	4.01	4.74
	0.17	3.00	2.45	3.70	4.34
	0.18	2.77	2.25	3.39	3.98
	0.19	2.57	2.07	3.12	3.65
	0.20	2.38	1.90	2.88	3.36
2.5	0.15	3.27	2.65	4.17	4.80
	0.16	2.98	2.40	3.77	4.35
	0.17	2.73	2.18	3.43	3.95
	0.18	2.50	1.98	3.13	3.59
	0.19	2.30	1.81	2.86	3.25
2.0	0.20	2.11	1.66	2.63	2.98
	0.15	2.89	2.26	3.74	4.22
	0.16	2.61	2.02	3.36	3.79
	0.17	2.37	1.82	3.04	3.42
	0.18	2.15	1.64	2.75	3.10
1.5	0.19	1.97	1.48	2.51	2.82
	0.20	1.80	1.35	2.29	2.57
	0.15	2.39	1.74	3.18	3.51
	0.16	2.14	1.55	2.83	3.13
	0.17	1.92	1.38	2.54	2.82
1.0	0.18	1.74	1.24	2.30	2.54
	0.19	1.57	1.12	2.08	2.30
	0.20	1.44	1.01	1.89	2.09
	0.15	1.75	1.47	2.43	2.66
	0.16	1.55	1.30	2.17	2.37
1.0	0.17	1.39	1.16	1.95	2.13
	0.18	1.25	1.04	1.76	1.92
	0.19	1.13	0.94	1.59	1.74
	0.20	1.03	0.85	1.44	1.58

L: Carga °T: Gradiente de temperatura
Fuente: Los autores.

Cuando se compara el esfuerzo máximo de tensión (columna Centro-borde de la Tabla 1) con el valor de esfuerzo de 3.0 MPa, se observa que si se quiere evitar la falla por carga última de la placa-huella bajo las condiciones de carga estudiadas, sería posible utilizar placas-huella de longitud 3.0 mt con espesores superiores a 0.20 mt, de 2.5 mt con espesor superior a 0.19 mt, de 2.0 mt con espesor superior a 0.18 mt, de 1.5 mt con espesor superior a 0.16 mt y de 1.0 mt con espesor superior a 0.15 mt. Sin embargo, se debe considerar el efecto del gradiente de la temperatura en los esfuerzos de la placa.

En las dos últimas columnas centro-borde y centro-borde (L+°T) de la Tabla 1, la primera columna (centro-borde) muestra esfuerzos de tensión cuando la carga está en la posición más crítica centro-borde, la segunda columna (centro-borde L+°T), presenta los resultados del efecto combinado de carga y gradiente de temperatura sobre el esfuerzo máximo de tensión, la carga se ubica en la posición más crítica (Centro-Borde) y se considera un gradiente de temperatura de 5 °C, -5 °C. El comportamiento de los esfuerzos de estas dos columnas se presenta en la Fig. 7, (a) centro-borde y (b) centro-borde (L+°T).

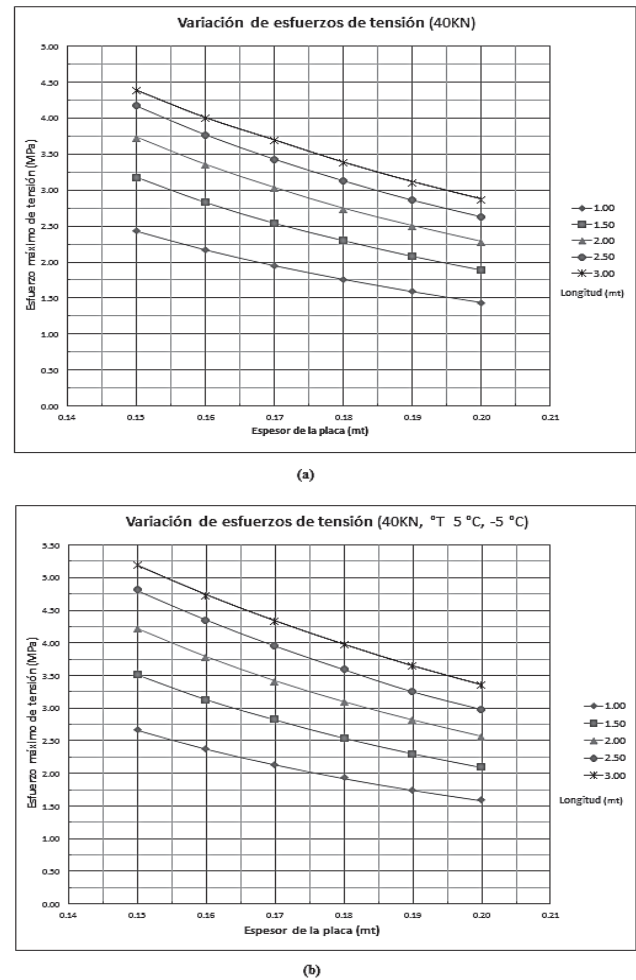


Figura 7. Esfuerzos máximos de tensión del modelo 1
Fuente: Los autores.

Al comparar estas dos columnas, se observa que al considerar el gradiente de temperatura se produce un incremento del esfuerzo máximo de tensión para todas las longitudes y espesores estudiados. Dentro de una misma longitud de Placa-huella, el efecto del gradiente de temperatura es menor a medida que se incrementa el espesor de la placa. Cuando se comparan diferentes longitudes, el efecto de gradiente de temperatura disminuye considerablemente con la disminución de la longitud de la Placa-huella, Figura 7. Este último comportamiento toma gran importancia debido a que existe muy poca información sobre gradientes de temperatura en pavimentos de concreto en Colombia, lo que dificulta enormemente considerar este parámetro en la práctica, una mejor alternativa es controlar el efecto del gradiente de temperatura controlando la longitud de las placas-huella. Esta forma de controlar el efecto del gradiente de temperatura en losas de concreto es utilizada en otros métodos de diseño de pavimentos de concreto [5].

El efecto de la calidad de la subrasante también fue investigado con el modelo 1, la Fig. 8 muestra los resultados para placas-huella de diferentes espesores y longitudes de 1.0 mt y 2.0 mt, sobre 15 cm de material granular de 100 MPa de módulo resiliente, sobre subrasantes de módulos resilientes de 20, 30, 40, y 50 MPa, con carga del semieje SRD de 50 kN en posición centro-borde.

En la Fig. 8 se puede apreciar que, según las condiciones evaluadas, existe poca sensibilidad del esfuerzo máximo de tensión con respecto al módulo resiliente de la subrasante. Para la longitud de placa-huella de 1.0 mt el efecto es despreciable, para la longitud de placa-huella de 2.0 mt se pueden observar diferencias para espesores inferiores a 0.14 mt, pero estos espesores presentan esfuerzos máximos de tensión demasiado altos en relación con el valor de referencia del estudio de 3.0 MPa.

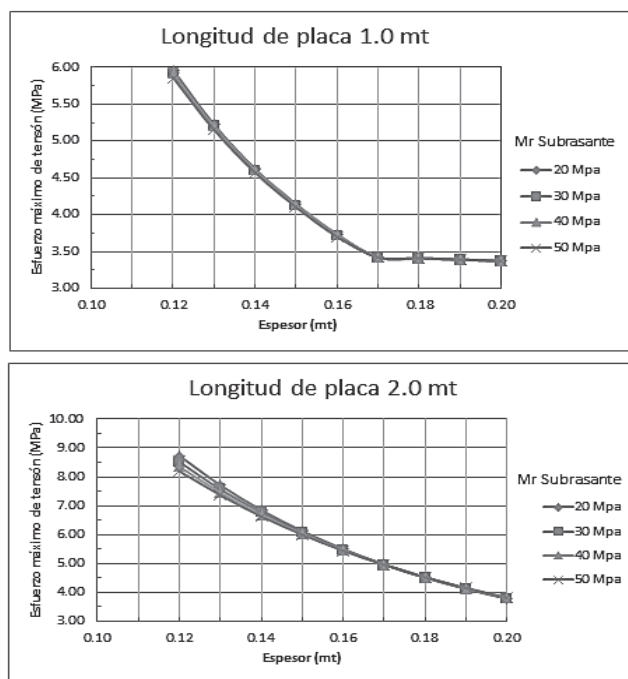


Figura 8. Efecto de la subrasante
Fuente: Los autores.

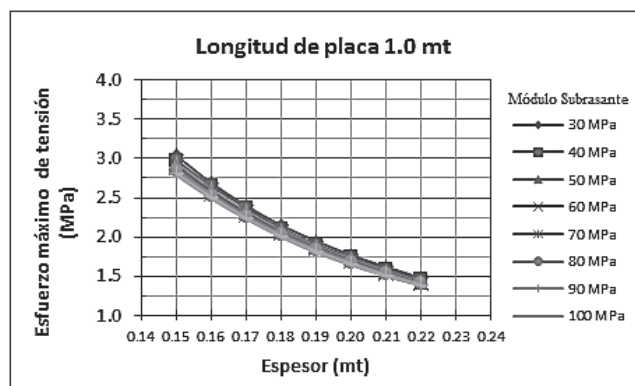


Figura 9. Esfuerzo máximo de tensión en función del espesor de placa (modelo 2, Eje SRS de 27 kN)

Fuente: Los autores.

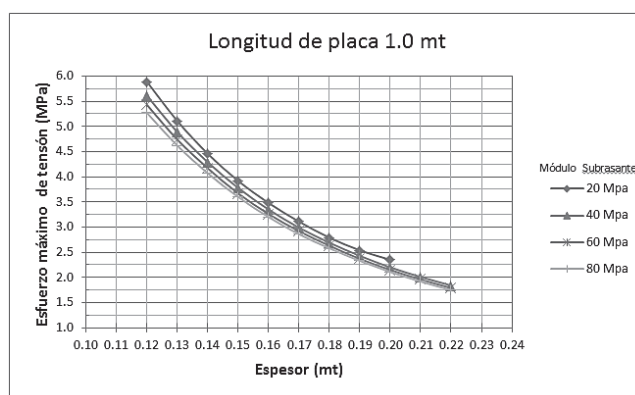


Figura 10. Esfuerzo máximo de tensión en función del espesor de placa (modelo 2, Eje SRD 50 kN)

Fuente: Los autores.

3.2. Resultados de la evaluación del modelo 2

El modelo 2 se evaluó con diferentes espesores de placa y diferentes módulos resilientes de la subrasante, para ejes SRS, SRD y Tándem. La longitud de placa fue fijada en 1.0 mt con base en los resultados de los análisis hechos con el modelo 1.

3.2.1. Resultados de la evaluación del modelo 2 con eje SRS

Cuando evalúa el modelo 2 con un semieje SRS de 27 kN ubicado en la posición crítica centro-borde, en la placa central y con trabazón de agregados entre las placas, para módulos de subrasante entre 30 MPa y 100 MPa, los esfuerzos máximos de tensión resultan inferiores a 3.0 MPa para espesores de placa de 0.15 mt o superiores (Fig. 9), valor tomado como referencia en este análisis para falla por carga última, lo que indica que para ejes livianos este tipo de pavimento no fallaría por este criterio.

3.2.2. Resultados de la evaluación del modelo 2 con eje SRD

La Fig. 10 presenta la variación del esfuerzo máximo de tensión con relación al espesor de la losa para diferentes módulos resilientes de subrasante entre 20 MPa y 80 MPa,

los esfuerzos son para un semieje SRD de 50 kN en la posición crítica centro-borde en la placa central y trabazón de agregados entre las placas. En la Fig. 10 se observa que en todas las calidades de subrasante evaluadas, para espesores de losa de 0.17 mt los esfuerzos máximos de tensión son del orden de 3.0 MPa. Pavimentos en placa-huella de concreto simple, con espesores inferiores a 0.17 mt no serían viables bajo las condiciones del presente análisis.

3.2.3. Resultados de la evaluación del modelo 2 con eje tándem

Al evaluar el modelo 2 con un semieje tándem de 100 kN, 50 kN en cada rueda doble del semieje del tándem, con uno de los ejes del tándem ubicado en la posición crítica centro-borde de la placa central y en otro eje del tándem en la placa adyacente (Fig. 6), con trabazón de agregados entre las placas, diferentes espesores de placas y módulos de subrasante entre 30 MPa y 100 MPa, se observa que los esfuerzos máximos de tensión en placas de espesor 0.17 mt o superior son inferiores al valor de referencia de 3.0 MPa para todas las calidades de subrasante (Fig. 11), lo que implica que bajo un eje tándem con las características estudiadas, placas-huellas de espesores superiores a 0.17 mt no fallarían por carga última.

Se identificó que se presenta un contacto entre las esquinas inferiores de las placas, bajo el borde cargado que está en contacto con el material granular de soporte, generando unos esfuerzos altos en esos puntos que podrían inducir a la falla de la esquina (despicadura), sin embargo, se asume que una vez esta falla ocurre, la integridad de la placa no se ve mayormente afectada y los esfuerzos máximos se presentarían en el punto esperado.

3.2. Análisis de la placa-huella por fatiga y erosión

Los criterios de diseño de pavimentos de concreto son la fatiga y la erosión, si se quiere evaluar la posibilidad de diseñar pavimentos en placa-huella de concreto simple, estos dos criterios deben ser evaluados considerando las características de este tipo de pavimento.

3.3.1. Análisis del pavimento placa-huella por criterio de fatiga

La fatiga es la falla del concreto debida a carga repetida, la falla ocurre mediante la fisuración de la losa de concreto.

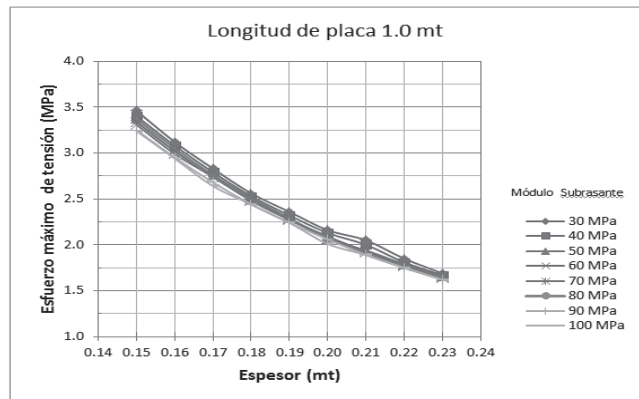


Figura 11. Esfuerzo máximo de tensión en función del espesor de placa (modelo 2, Eje tándem 100 kN)

Fuente: Los autores.

En los pavimentos, la fatiga se mide en vigas de concreto simplemente apoyadas, sometidas a ensayo de carga repetida en los tercios de la luz libre, el tiempo de iniciación de la fisura depende en gran medida de la magnitud del esfuerzo, cuando el esfuerzo aplicado es muy inferior al módulo de rotura del concreto no se produce la falla por fatiga. Se ha definido que esto ocurre con una relación de esfuerzo de 0.5, que es el cociente del esfuerzo aplicado y el módulo de rotura del concreto [6].

El análisis por fatiga de la placa-huella se realizó utilizando la ecuación recomendada por la Portland Cement Association – PCA [7].

$$\text{Log } N_f = 11.737 - 12.077 \left(\frac{\sigma}{S_c} \right) \quad \text{para } \frac{\sigma}{S_c} \geq 0.55 \quad (1)$$

$$N_f = \left(\frac{4.2577}{\left(\frac{\sigma}{S_c} - 0.4325 \right)} \right)^{3.268} \quad \text{para } 0.45 < \frac{\sigma}{S_c} < 0.55 \quad (2)$$

$$N_f = \text{Ilimitado} \quad \text{para } \frac{\sigma}{S_c} \leq 0.45 \quad (3)$$

Donde,

N_f : Número de repeticiones de carga permitidas

σ : es el esfuerzo de tensión aplicado

S_c : es el módulo de rotura del concreto

$\frac{\sigma}{S_c}$: Relación de esfuerzo

Con base en el modelo 2 se evaluó la fatiga para placa-huellas de 1.0 mt de longitud con varios espesores placa entre 0.17 mt y 0.23 mt y diferentes módulos resilientes de subrasante entre 30 MPa y 100 MPa. Se analizaron eje SRS, SRD y Tándem, las cargas utilizadas fueron las del semieje, considerando una distribución de 50% del peso total a cada lado del eje.

En la Tabla 2 se presenta el esfuerzo crítico en posición centro-borde, las repeticiones admisibles y el número promedio de ejes diarios permitido para un periodo de 20 años, esta tabla se realizó para la investigación y por el momento no se recomienda para otros usos. Si se revisa el promedio de ejes diarios permitidos para un periodo de 20 años, los datos de la tabla indican que para vías con tránsito de bajo y ejes livianos (SRS), las placas-huella de 1.0 mt de longitud, en concreto simple, con espesores 18 cm o superior podrían ser una alternativa, pero si se espera tener ejes SRD o tándem el espesor requerido debería ser 20 cm. Por ejemplo, si por una vía circula un camión C3 (1 SRS + 1 Tándem) 5 veces al día, si la subrasante tiene módulo de 30 MPa, el espesor de la placa huella debería ser de mínimo 20 cm, que es el requerimiento del eje tándem. Si se chequea el eje SRS este espesor podría soportar hasta 176 repeticiones diarias de este eje durante 20 años.

Si se conoce el tránsito esperado de una vía, con los datos de la Tabla 2 se podría utilizar la teoría del daño acumulado para calcular el consumo total de fatiga [5] y así determinar el espesor de una placa-huella de las características analizadas para soportar este tránsito.

Tabla 2.

Análisis de fatiga para placa-huella de 1.0 mt de largo y módulo de rotura de 3.8 MPa

Módulo de Subrasante (MPa)	Espesor Placa (Cm)	Semieje SRS (27 kN)			Semieje SRD (50 kN)			Semieje Tandem (100 kN)		
		Esfuerzo (MPa)	# Repeticiones Admisibles	# Ejes diarios en 20 años	Esfuerzo (MPa)	# Repeticiones Admisibles	# Ejes diarios en 20 años	Esfuerzo (MPa)	# Repeticiones Admisibles	# Ejes diarios en 20 años
30	17	2.52	5,837	1	3.06	90	0	2.83	277	0
	18	2.26	40,886	6	2.76	833	0	2.56	1,995	0
	19	2.05	166,533	23	2.50	5,837	1	2.36	8,620	1
	20	1.86	1,286,914	176	2.28	30,960	4	2.16	37,252	5
	21	1.70	Ilimitadas	Ilimitadas	2.08	124,351	17	2.05	84,613	12
	22	1.55	Ilimitadas	Ilimitadas	1.90	762,043	104	1.85	773,906	106
	23				1.75	14,335,236	1,964	1.69	Ilimitadas	Ilimitadas
40	17	2.49	7,708	1	3.00	157	0	2.79	371	0
	18	2.22	53,993	7	2.70	1,453	0	2.53	2,484	0
	19	2.01	229,127	31	2.45	10,179	1	2.32	11,552	2
	20	1.83	2,402,754	329	2.23	40,886	6	2.13	46,397	6
	21	1.67	Ilimitadas	Ilimitadas	2.04	166,533	23	2.00	129,932	18
	22	1.53	Ilimitadas	Ilimitadas	1.87	1,286,914	176	1.81	1,564,102	214
	23				1.72	Ilimitadas	Ilimitadas	1.67	Ilimitadas	Ilimitadas
50	17	2.45	10,179	1	2.95	207	0	2.76	462	0
	18	2.19	53,993	7	2.67	1,919	0	2.51	2,876	0
	19	1.98	326,334	45	2.41	13,443	2	2.29	14,388	2
	20	1.81	2,402,754	329	2.20	53,993	7	2.06	78,153	11
	21	1.65	Ilimitadas	Ilimitadas	2.01	229,127	31	1.94	237,285	33
	22	1.50	Ilimitadas	Ilimitadas	1.84	2,402,754	329	1.79	2,376,236	326
	23				1.69	Ilimitadas	Ilimitadas	1.66	Ilimitadas	Ilimitadas
60	17	2.43	10,179	1	2.91	274	0	2.74	534	0
	18	2.16	71,303	10	2.63	2,534	0	2.49	3,329	0
	19	1.96	326,334	45	2.38	13,443	2	2.28	15,480	2
	20	1.79	5,202,474	713	2.17	71,303	10	2.09	62,176	9
	21	1.63	Ilimitadas	Ilimitadas	1.98	326,334	45	1.93	265,438	36
	22	1.49	Ilimitadas	Ilimitadas	1.81	2,402,754	329	1.78	2,993,873	410
	23				1.67	Ilimitadas	Ilimitadas	1.65	Ilimitadas	Ilimitadas
70	17	2.39	13,443	2	2.87	362	0	2.74	534	0
	18	2.15	71,303	10	2.59	3,347	0	2.48	3,582	0
	19	1.95	485,184	66	2.35	17,753	2	2.27	16,655	2
	20	1.77	5,202,474	713	2.14	94,163	13	2.08	67,047	9
	21	1.62	Ilimitadas	Ilimitadas	1.96	326,334	45	1.91	336,255	46
	22	1.48	Ilimitadas	Ilimitadas	1.76	14,335,236	1,964	1.77	3,838,973	526
	23				1.64	Ilimitadas	Ilimitadas	1.64	Ilimitadas	Ilimitadas
80	17	2.37	17,753	2	2.84	478	0	2.70	716	0
	18	2.13	94,163	13	2.56	4,420	1	2.46	4,147	1
	19	1.93	485,184	66	2.33	23,444	3	2.27	16,655	2
	20	1.75	14,335,236	1,964	2.11	94,163	13	2.07	72,322	10
	21	1.61	Ilimitadas	Ilimitadas	1.93	485,184	66	1.91	336,255	46
	22	1.47	Ilimitadas	Ilimitadas	1.77	5,202,474	713	1.77	3,838,973	526
	23				1.63	Ilimitadas	Ilimitadas	1.64	Ilimitadas	Ilimitadas
90	17	2.35	17,753	2	2.81	631	0	2.68	829	0
	18	2.11	94,163	13	2.54	4,420	1	2.44	4,800	1
	19	1.91	762,043	104	2.30	23,444	3	2.24	20,744	3
	20	1.74	14,335,236	1,964	2.10	124,351	17	2.06	78,153	11
	21	1.59	Ilimitadas	Ilimitadas	1.91	762,043	104	1.89	433,900	59
	22	1.46	Ilimitadas	Ilimitadas	1.75	14,335,236	1,964	1.75	6,737,028	923
	23				1.61	Ilimitadas	Ilimitadas	1.62	Ilimitadas	Ilimitadas
100	17	2.34	17,753	2	2.78	833	0	2.64	1,111	0
	18	2.10	124,351	17	2.51	5,837	1	2.44	4,800	1
	19	1.89	762,043	104	2.28	30,960	4	2.24	20,744	3
	20	1.72	Ilimitadas	Ilimitadas	2.08	124,351	17	2.01	118,701	16
	21	1.58	Ilimitadas	Ilimitadas	1.90	762,043	104	1.89	433,900	59
	22	1.45	Ilimitadas	Ilimitadas	1.74	14,335,236	1,964	1.75	6,737,028	923
	23				1.60	Ilimitadas	Ilimitadas	1.62	Ilimitadas	Ilimitadas

Fuente: Los autores.

Es importante anotar que, desde el punto de vista exclusivo de la fatiga, pavimentos de placa-huella en concreto simple podrían ser una solución para muchas vías de bajos volúmenes de tránsito en el territorio nacional, por las que circula un número reducido de camiones al día, sin embargo, el criterio de erosión también debe ser evaluado en este tipo de pavimentos.

3.3.2. Análisis del pavimento placa-huella por criterio de erosión

Una causa frecuente del deterioro de pavimentos de concreto es el bombeo, que consiste en la expulsión del material granular bajo la losa, generando pérdida de soporte de la misma. La erosión ocurre debido a la acción combinada de la carga y la presencia de agua en el material de soporte, que genera la expulsión del material por las esquinas y juntas de las losas, generando vacíos que inducen escalonamiento y fisuración del pavimento [5]. La deflexión más crítica ocurre en la esquina de las losas bajo la acción de las cargas de tránsito [6]. A partir de mediciones hechas en el AASHO Road Test, la Portland Cement Association – PCA desarrolló la siguiente ecuación para estimar el número de repeticiones admisibles por erosión en pavimentos de concreto [8]:

$$\log N = 14.524 - 6.777(C_1 P - 9.0)^{0.103} \quad (4)$$

$$P = 268.7 \frac{p^2}{hk^{0.73}} \quad (5)$$

$$\text{Porcentaje de daño por erosión} = 100 \sum_{i=1}^m \frac{C_2 n_i}{N_i} \quad (6)$$

Donde,

P : Relación de trabajo o potencia

p : Presión en la interface losa-soporte en psi

h : Espesor de la losa en pulgadas

k : Módulo de reacción de la subrasante en pci

C_1 : Factor de ajuste (1 subbase no tratada, 0.9 subbase tratada)

C_2 : Factor de ajuste (0.06 sin bermas de concreto, 0.94 con bermas de concreto)

Para el análisis de erosión en las placas-huellas de concreto de 1.0 mt, se utilizó el modelo 2, la carga se colocó en la esquina de la placa central para calcular la deflexión de la losa, la Fig. 12 muestra la posición del eje tándem, esta condición es la más crítica entre los ejes estudiados debido a que cada eje representa dos repeticiones de carga.

En la Tabla 3 se presenta el número de ejes admisibles por erosión para 20 años, para un suelo con módulo resiliente de 100 MPa y diferentes espesores de placa, estos datos se presentan como ejemplo y soporte para posterior discusión. La tabla muestra que, a pesar de que el módulo de la subrasante tiene un valor aceptable, las repeticiones admisibles por erosión para el eje tándem son bastante bajas, no se encontraron mayores diferencias cuando se utilizan pasadores de carga en las juntas de la placa-huella, para subrasantes de menor calidad los resultados son más bajos.

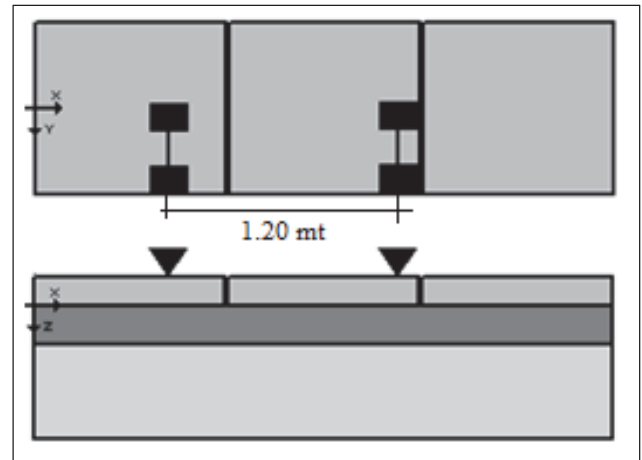


Figura 12. Evaluación de la deflexión de la esquina de la losa para cálculo de erosión

Fuente: Los autores.

Los resultados del análisis de erosión no representan el comportamiento esperado para placas-huellas con base a las experiencias actuales en Colombia, esto plantea interrogantes sobre la aplicabilidad de este modelo de erosión para pavimentos de placa-huella. Cuando se desarrolló el método PCA se modelaron losas de 4.57 mt de longitud y 3.65 mt de ancho con elementos finitos [9], estas losas permiten mejor distribución del esfuerzo sobre la superficie de soporte que las placas-huellas de 1.0 mt de largo y 0.90 mt ancho analizadas, esto hace que los esfuerzos en la interface placa-soporte sean mayores en estas últimas, por lo tanto, se requiere una calibración del modelo para poder aplicarlo a las placas-huella. En la actualidad no existe un modelo de evaluación de la erosión en pavimentos de placa-huella, se requiere mayor investigación sobre el para poder considerar este criterio en el diseño pavimentos con placa-huella.

Aunque el modelo de fatiga de la PCA es claramente aplicable (ecuación 1) para el caso de pavimentos en placa-huella porque el modelo se desarrolló en laboratorio con vigas de concreto, el análisis de fatiga que se realiza con el método de diseño de la PCA no es aplicable para definir espesores de placa-huella, debido a que este considera el esfuerzo tensión equivalente, que es una reducción del esfuerzo máximo de tensión en el borde de la losa, considerando que solo el 6% de los camiones circulan por el borde de la losa y que el esfuerzo disminuye a medida que la

Tabla 3.

Análisis de erosión con placa huella de 1.0 mt y semieje tándem

Módulo de Subrasante (MPa)	Espesor Placa (Cm)	# Ejes tándem Admisibles
100	15	3
	16	4
	17	5
	18	6
	19	7
	20	8
	21	10
	22	11
	23	13

Fuente: Los autores.

carga se aleja del borde [5], situación que es diferente al caso de pavimentos de placa-huella, en donde por su ancho angosto los vehículos se ven obligados a circular por el borde. En consecuencia, el método de diseño de pavimentos de concreto de la PCA, no es aplicable, tal y como está propuesto, para determinar espesores de pavimentos en placa-huella.

4. Conclusiones

Se realizó un análisis extensivo del comportamiento de los pavimentos en placa-huella, bajo las expectativas de carga que se tiene en Colombia para las vías de bajos volúmenes de tránsito. El análisis permitió aclarar dudas sobre el comportamiento de este tipo de pavimentos que se viene utilizando en el país.

El análisis con elementos finitos reveló que el esfuerzo máximo de tensión ocurre cuando la carga está en la posición centro-borde de la placa, el esfuerzo disminuye con el incremento del espesor de la placa, y con la disminución de la longitud de la placa. Dependiendo del tipo de eje y espesor de placa, la longitud de placa que no supere el módulo de rotura del concreto es variable, pero la falla por carga última bajo los ejes evaluados (SRS, SRD y Tandem) se puede controlar con la disminución de la longitud de la placa.

El efecto más crítico del gradiente de temperatura, es incrementar los esfuerzos máximos de tensión en el borde inferior de la placa, este efecto también se puede minimizar disminuyendo la longitud de la placa, situación que es una ventaja dado que no existe mayor información sobre gradientes en losas de concreto en todo el territorio nacional.

Cuando se limita la longitud de la placa a 1.0 mt de largo con 0.9 mt de ancho, el análisis de fatiga revela que es posible diseñar pavimentos en placa-huella de concreto simple con las cargas estudiadas, sin embargo, no es posible evaluar el comportamiento a erosión de estos pavimentos debido a que no existe un modelo adecuado.

Se encontró que el método de diseño de pavimentos de concreto de la Portland Cement Association – PCA, no es aplicable para la determinación de espesores de pavimentos en placa-huella en concreto, ya que sus procedimientos de análisis de fatiga y erosión están concebidos para losas de concreto con geometría distinta a las placas-huella de concreto, por lo cual varios de los criterios del método de la PCA, no son aplicables para los pavimentos en placa-huella.

Referencias

- [1] Especificación 500-1P Placa-huella en concreto. [En línea]. Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/276515876/Especificacion-Placa-huella-500-1p-Invias>.
- [2] Ministerio de Transporte, Límites de pesos y dimensiones de los vehículos de carga en Colombia, Resolución 004100 Ministerio de Transporte, Bogotá DC, 2004.
- [3] National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Calibrated Mechanistic Structural Analysis Procedure for Pavement, Report 1-26, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 1990. <http://trid.trb.org/view.aspx?id=502452>
- [4] Davids, W.G. EverFE: Software for the 3D Finite Element Analysis of Jointed Plain Concrete Pavements, Maine, USA, 2005.
- [5] Packard, R.G., Thickness design for concrete highway and street pavements, Portland Cement Association, 1984.

- [6] Huang, Y.H., Pavement analysis and design, Pearson/Prentice Hall, 2004.
- [7] Packard, R.G.a.S.D.T., New PCA thickness design procedure for concrete highway and street pavements, The Third International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, 1985.
- [8] Packard, R.a.T.S., Mechanistic design of concrete pavements to control joint faulting and subbase erosion, Portland Cement 1985.
- [9] Ying-Haur, L. and Carpenter, S.H., PCAWIN Program for jointed concrete pavement design, Tamkang Journal of Science and Engineering, [Online]. 4(4), pp. 293-300, 2001. Available at: <http://www2.tku.edu.tw/~tkjse/4-4/4-4-7.pdf>
- [10] Packard, R.G., Thickness design for concrete highway and street pavements, Portland Cement Association, 1984.

A. Orobio, es PhD. en Ing. Civil de West Virginia University, USA. Ing. Civil, MSc. y Esp. en Infraestructura Vial de la Universidad del Cauca, Colombia. Esp. en Gerencia de Construcciones de la Universidad Javeriana, Colombia. Es profesor titular de la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática de la Universidad del Valle, Colombia. Ha sido consultor, especialista y asesor en pavimentos de diferentes empresas nacionales. ORCID: 0000-0001-7166-3061

J.C. Orobio, es Ing. Civil, MSc. y Esp. En Infraestructura Vial de la Universidad de Cauca, Colombia. MSc. En Economía de la Universidad Javeriana, Colombia. Con más de 20 años de experiencia en la gestión de proyectos de transporte e infraestructura vial, puesta en marcha de sistemas de transporte, gestión de recursos ante el Gobierno Nacional y Municipal y administración de concesiones de transporte, tecnológicas e infraestructura. Ha sido Secretario de Infraestructura de Cali, Director de Transporte y Jefe de Planeación de Metrocali, Ingeniero de Proyectos de las empresas Consultoría Colombiana y Conalvias, Gerente de las firmas MG Consultores Empresariales y el Alcázar, y profesor de ingeniería de pavimentos en la Universidad Javeriana. ORCID: 0000-0001-9665-5121



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería Civil

Oferta de Posgrados

Especialización en Vías y Transportes
Especialización en Estructuras
Maestría en Ingeniería - Infraestructura y Sistemas
de Transporte
Maestría en Ingeniería – Geotecnia
Doctorado en Ingeniería - Ingeniería Civil

Mayor información:

E-mail: asisacic_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 5172

Fault detection and diagnosis through artificial intelligence techniques, a state of art

Luini Leonardo Hurtado-Cortés ^a, Edwin Villarreal-López ^b & Luís Villarreal-López ^c

^a Facultad Tecnológica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. llhurtadoc@udistrital.edu.co

^b Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad de San Buenaventura, Bogotá, Colombia. edvillal@gmail.com

^c Facultad de Ingeniería, Fundación Universidad Agraria de Colombia, Bogotá, Colombia. Villarreal.luis@uniagraria.edu.co

Received: February 4th, 2016. Received in revised form: July 11th, 2016. Accepted: August 9th, 2016.

Abstract

This article presents the current state of artificial intelligence techniques and their application to the field of fault detection and diagnosis, in dynamical systems. Initially, a brief description of what is considered a mechanism for fault detection and diagnosis, and current approaches to the study and implementation of such mechanisms are explained. Subsequently, the most important results of the various artificial intelligence techniques applied to the fault detection and diagnosis are presented. Finally, a comparative analysis based on the desired characteristics of the mechanisms of fault detection and diagnosis is presented. The article concludes by mentioning the benefits of the classification of techniques presented and the listing possible pathways to where you should go research in this field.

Keywords: fault detection and diagnosis, artificial neural networks, fuzzy logic systems, neuro-fuzzy systems and immune systems.

Detección y diagnóstico de fallas mediante técnicas de inteligencia artificial, un estado del arte

Resumen

Este artículo presenta el estado actual de las técnicas de inteligencia artificial y su aplicación al campo de la detección y diagnóstico de fallas en sistemas dinámicos. Inicialmente, se hace una breve descripción de lo que se considera un mecanismo de detección y diagnóstico de fallas, y se explican los enfoques actuales de estudio y aplicación de tales mecanismos. Posteriormente, se presentan los resultados más importantes de las diferentes técnicas de inteligencia artificial aplicadas a la detección y diagnóstico de fallas. Finalmente, se presenta un análisis comparativo con base en las características deseables de los mecanismos de detección y diagnóstico de fallas. El artículo concluye mencionando los beneficios de la clasificación de las técnicas presentadas y enumerando las posibles vías hacia donde debe ir la investigación en este campo.

Palabras clave: detección y diagnóstico de fallas, redes neuronales artificiales, sistemas de lógica difusa, sistemas neurodifusos, sistemas inmunes.

1. Introducción

Los procesos actuales por su complejidad exigen sistemas de seguridad cada vez más confiables. El malfuncionamiento de los equipos, puede provocar pérdidas económicas, peligro para los operarios e inconvenientes para los usuarios, entre otros.

La supervisión de procesos, es el conjunto de acciones orientadas a asegurar un correcto funcionamiento, incluso en situaciones de riesgo. Un sistema de supervisión, debe

cumplir tres etapas fundamentales: la detección de fallas, su diagnóstico y el restablecimiento de las condiciones de operación de acuerdo con las especificaciones.

Una falla, es un cambio en el comportamiento de alguno de los componentes de un sistema, de manera que éste ya no puede cumplir con la función para la cual fue diseñado. Los sistemas de detección y diagnóstico de fallas, se presentan como una solución que permite determinar el estado de

How to cite: Hurtado-Cortés L. L., Villarreal-López E., & Villarreal-López L. Detección y diagnóstico de fallas mediante técnicas de inteligencia artificial, un estado del arte DYNA 83 (199) pp. 19-28, 2016

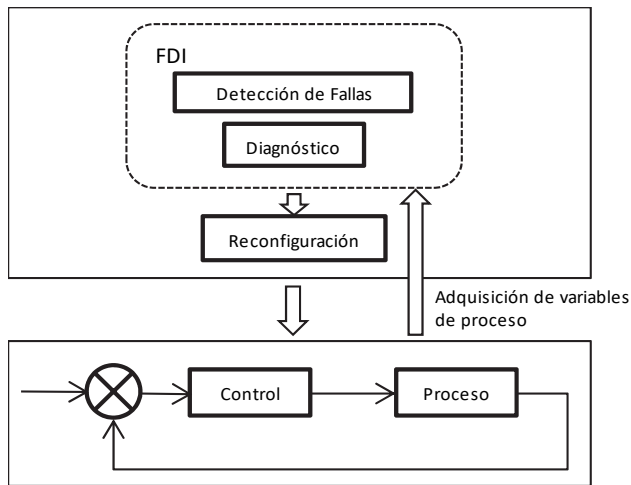


Figura 1. Esquema general de un sistema de detección y diagnóstico de fallas.

Fuente: Los autores.

operación del proceso, así como identificar la naturaleza de las fallas presentadas, su localización y riesgo.

La Fig. 1, ilustra un esquema general de un sistema de detección y diagnóstico de fallas. En este esquema, las entradas y salidas del bloque proceso-controlador alimentan un sistema de supervisión encargado de detectar la presencia de fallas y diagnosticar su naturaleza. Con esta información es posible corregir los parámetros del controlador de forma manual o automatizada, o intervenir en el proceso para corregir los problemas detectados.

Se han propuesto múltiples enfoques para realizar la detección y el diagnóstico de fallas, de los cuales se puede hacer la siguiente clasificación:

- Métodos basados en modelos matemáticos del proceso. Son estrategias que hacen uso de un modelo formulado a partir del conocimiento de las dinámicas involucradas en el proceso. Se fundamentan en la obtención de una diferencia entre las salidas del proceso y de un modelo del proceso, de donde se infiere la presencia de una falla. Este enfoque representa un costo computacional muy bajo y únicamente puede ser aplicado a procesos donde es posible obtener dicho modelo de forma analítica, lo que limita su aplicación en sistemas no lineales. La obtención de los parámetros del proceso también representa una gran dificultad, la cual puede ser abordada por técnicas de identificación de sistemas.
- Métodos a partir de modelos obtenidos de datos históricos del proceso. Para sistemas donde es posible recolectar numerosos datos representativos de su operación, tanto en condiciones normales como anómalas, es posible construir un modelo mediante técnicas como redes neuronales o modelos difusos del tipo Takagi-Sugeno. Estos enfoques son generalmente costosos computacionalmente y requieren de grandes volúmenes de datos representativos, los cuales en algunas ocasiones no están disponibles. Resultan muy útiles para obtener modelos de sistemas dinámicos no lineales.
- Métodos a partir de datos del proceso. Parten igualmente de grandes volúmenes de datos históricos, pero desde una

perspectiva diferente en la que no se busca obtener un modelo del proceso, sino resolver un problema de clasificación. Para este propósito se ha propuesto el uso de clasificadores difusos, análisis de componentes principales, redes neuronales artificiales, máquinas con vectores de soporte, funciones de base radial, entre otras. El principal inconveniente de estas técnicas radica en el costo computacional y en que generalmente operan como un sistema de “caja negra”, incapaz de brindar información adicional sobre la falla.

Considerando las alternativas planteadas para la detección y diagnóstico de fallas, existen algunas características deseables con las cuales es posible comparar el desempeño de las estrategias como se detallan en [1].

Se han realizado múltiples revisiones sobre desarrollos y aplicaciones de la detección y diagnóstico de fallas. En [1] se presentan trabajos que hacen uso de modelos formales y técnicas del control clásico. Dicho artículo es complementado en [2], para modelos cualitativos y en [3] para métodos a partir de datos. De igual forma, en [4] se sistematiza la revisión en torno a métodos numéricos, de inteligencia artificial, o combinaciones de los dos.

Los métodos de detección y diagnóstico de fallas basados en la teoría de control y la estadística, han sido investigados principalmente por la comunidad FDI (por sus siglas en inglés). Una clase de técnicas basadas en modelos que utilizan la informática y la Inteligencia Artificial tienen actualmente una investigación activa por parte la comunidad de diagnóstico o DX, que utiliza modelos cualitativos y enfoques de lógica.

Este artículo recoge los resultados de trabajos recientemente publicados por la comunidad DX, que hacen uso de técnicas de inteligencia artificial, tales como las redes neuronales artificiales, los sistemas de inferencia difusa y neurodifusa y los sistemas inmunes, con el fin de actualizar la perspectiva teórica desarrollada en los últimos años, identificando las principales tendencias presentes en este tema.

Como se evidencia en [3-8], las redes neuronales y la lógica difusa han sido ampliamente utilizadas en el desarrollo de sistemas de detección y diagnóstico de fallas, debido a sus habilidades de aprendizaje puesto que se tratan de aproximadores universales.

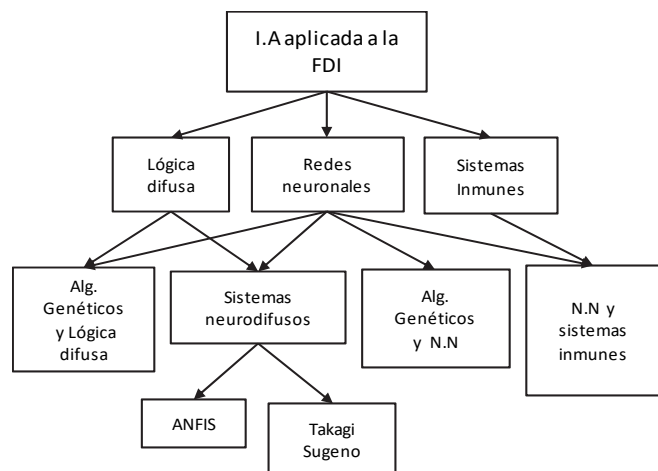


Figura 2. Clasificación de métodos de identificación y diagnóstico de fallas con inteligencia artificial.

Fuente: Los autores.

Con el objetivo de realizar un análisis de las distintas perspectivas desde las cuales se ha abordado la detección y diagnóstico de fallas mediante técnicas de inteligencia artificial, se sugiere la división jerárquica de la Figura 2.

Dentro de los trabajos desarrollados, tienen gran relevancia el proyecto DAMADICS (Development and Application of Methods for Actuator Diagnosis in Industrial Control Systems) [9], que constituye un esfuerzo para analizar comparativamente técnicas de detección y diagnóstico de fallas en un entorno estándar.

2. Redes neuronales artificiales para detección y diagnóstico de fallas

Las Redes Neuronales Artificiales o ANN han sido ampliamente utilizadas en tareas de identificación y diagnóstico de fallas dadas sus capacidades de aproximar cualquier función multivariada lineal o no lineal, a partir de datos.

Dicha cualidad ha sido explotada en dos tendencias principales, las técnicas que hacen uso de un modelo de regresión del proceso, para luego ser contrastado con el proceso real y obtener un residuo; y las técnicas que modelan directamente los datos de salida tanto para condiciones de operación normal como anormal.

2.1. Técnicas orientadas a datos

Los esquemas de detección y diagnóstico de fallas sin modelo, intentan descubrir comportamientos del sistema a partir del análisis de sus salidas. Se han propuesto múltiples enfoques para esta tarea, que van desde el uso de técnicas de procesamiento de señales, hasta el uso de herramientas estadísticas como el análisis de componentes principales. A continuación, se enumeran algunas de las estrategias orientadas a datos que hacen uso de redes neuronales.

En [10] se analiza la calidad de la aproximación de una red neuronal completamente interconectada frente a una red neuronal parcialmente interconectada para modelar un sistema dinámico no lineal. El criterio propuesto para realizar la interconexión parcial, consiste en que las entradas para cierto instante de tiempo forman una sub red, y la salida del sistema se logra con la interconexión de dichas sub redes. La funcionalidad se comprueba mediante el modelamiento de la dinámica de un avión, encontrando calidades comparables en la aproximación, pero con un costo computacional mucho menor.

En [11] se presenta la aplicación de una red neuronal múltiple (una red en la que cada uno de sus nodos es a su vez una red neuronal) aplicada a la supervisión del funcionamiento de un circuito electrónico. Los datos de entrenamiento corresponden a las entradas y salidas del circuito para diferentes instantes de tiempo.

En [12] se presenta una red neuronal como un sistema de diagnóstico de fallas aplicado a una planta de llenado de botellas. Se presentan 6 posibles escenarios de falla como la ausencia de botellas, de líquido o baja presión de aire. Uno de los principales aportes de este trabajo consiste en la selección de la arquitectura de la red a partir de un algoritmo genético en el que para cada individuo se genera una topología para luego ser entrenada mediante

retropropagación. Luego de un número establecido de iteraciones, se evalúa el desempeño penalizando las arquitecturas más complejas.

En [13] se aplica un esquema basado en datos del proceso para la identificación de fallas en motores de inducción. Se propone el uso de una red neuronal retroalimentada o de un mapa auto organizativo. Con el fin de que el sistema opere en tiempo real, se propone realizar un análisis de componentes principales previo al proceso de clasificación, para el cual se definieron 4 posibles estados en el motor (3 fallas y un estado normal). Este pre procesamiento reduce notablemente el costo computacional del entrenamiento del sistema. De igual forma, en [14] se plantea una aplicación de un sistema de detección y diagnóstico de fallas para una planta purificadora de humo en termoeléctricas. Se propone por lo tanto, modelar el proceso mediante una Red Neuronal Perceptron Multicapa o MPNN. La red propuesta considera únicamente las entradas, ignorando la dinámica del sistema.

En [15] se describe un esquema de detección de fallas orientado al manejo en línea de grandes volúmenes de información. Se propone inicialmente el pre procesamiento de datos mediante Análisis de Componentes Principales o PCA, para luego modelar las relaciones mediante una red neuronal con funciones de base elipsoidal. Se presentan ejemplos de aplicación para un motor a gas con datos simulados y reales.

En [16] se aborda el problema de la detección de fallas en manipuladores robóticos. Se presenta un esquema de modelamiento de algunos parámetros específicos del manipulador como la aceleración en sus articulaciones. El objetivo de este modelamiento es poder estimar a futuro el estrés al que han estado sometidos los componentes del robot para poder diseñar planes de mantenimiento. Los datos son medidos por acelerómetros y luego digitalizados en un procesador mediante un sistema de adquisición. Con dichos datos se entrenan dos redes neuronales, una con Funciones de Base Radial o RBFNN y otra basada en un Mapa Auto Organizativo o SOMNN.

En [17] se propone la detección de fallas para una electroválvula a partir de algunos parámetros de operación que arroja un software de supervisión dedicado. Dichos datos conforman un vector de entrenamiento para una red neuronal retroalimentada. El objetivo del sistema radica en descubrir ciertas tendencias en los parámetros monitoreados presentes antes de la ocurrencia de una falla.

En [18] se introduce un esquema de detección de fallas aplicado a transmisiones, engranajes y rodamientos sin hacer uso de modelos. Este esquema pre procesa las señales de vibración del sistema mediante la transformada de ondícula y luego, a partir de las desviaciones estándar de los coeficientes, se entrena una red neuronal con una salida para cada una de las posibles fallas del sistema.

2.2. Generación de residuos

Un esquema general de un sistema de generación de residuos con RNA, puede verse en la Fig. 3, donde se tiene un modelo del proceso ejecutándose paralelamente con el proceso real. Las salidas son comparadas y a partir de las características de sus diferencias es posible estimar la presencia de una falla.

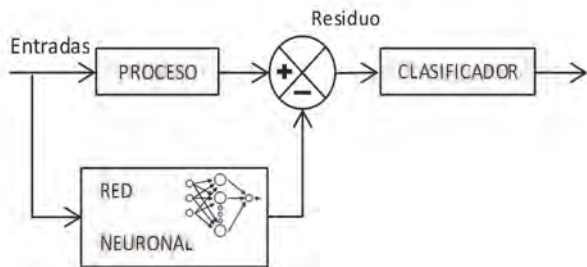


Figura 3. Esquema de un sistema generador de residuos a partir de RNA.
Fuente: Los autores.

Trabajos como los presentados en [18, 19], proponen una estrategia de generación de residuos acompañada de un sistema de aislamiento de fallas, ambos mediante redes neuronales. En [19] la topología de las redes de modelamiento y clasificación del error son escogidas de forma empírica intentando minimizar el error cuadrático medio de aproximación. La funcionalidad del sistema propuesto es evaluada mediante los datos del sistema descrito en [9]. Igualmente en [20], se plantea una red neuronal orientada al modelamiento tolerante a la incertidumbre, de tal forma que el modelo del sistema obtenido es capaz de soportar ciertos errores en sus parámetros y presentar aún una salida consistente. El sistema propuesto también se aplica al problema descrito en [9].

En [21] se propone una serie de tiempo combinada con una RBFNN para crear un predictor un paso adelante. El modelo predice una salida en el siguiente instante de tiempo discreto $k+1$ y con base en la diferencia con la salida medida se obtiene un residuo. Dependiendo del tamaño del residuo se detecta la falla. La ventaja de la propuesta consiste en la continua actualización del modelo. La funcionalidad se comprueba en la detección de una avería en un avión de combate.

2.3. Evaluación de residuos

En la detección y diagnóstico de fallas, un residuo consiste en la diferencia entre el comportamiento del proceso real y un modelo de su funcionamiento en condiciones normales. La existencia de un residuo se traduce en la detección de una falla y de la caracterización de dicho residuo se desprende la identificación del tipo de falla.

Múltiples escenarios son posibles a la hora de evaluar un residuo, como la detección de una falla conocida, desconocida o de múltiples fallas simultáneas. En [22] se propone una arquitectura de “redundancia analítica”, en lugar de tener sensores repetidos, se tienen modelos de cada uno de los componentes principales del sistema. En cada uno de los modelos se implementa mediante una red neuronal y se obtienen múltiples residuos lo que permite la identificación de fallas múltiples en el sistema. La funcionalidad de la propuesta se comprueba mediante su aplicación a un vehículo aéreo no tripulado.

2.4. Reflexión y proyección de las RNA en FDI

Las redes neuronales artificiales han sido ampliamente aplicadas debido a su característica de aproximación

universal lo que evita entrar en fases complejas de modelamiento analítico. Sin embargo, estas estrategias presentan inconvenientes sobre todo ante la presencia de nuevas fallas y de fallas múltiples. La adaptabilidad es baja debido a que requiere nuevas fases de entrenamiento lo que dificulta la identificación de fallas en línea. Estas deficiencias pueden ser abordadas por estrategias que realicen la adaptación continua de las redes a partir de información *on line*, o mediante el uso de arquitecturas dinámicas diferentes al enfoque tradicional de un modelo de falla.

3. Sistemas de lógica difusa para detección y diagnóstico de fallas.

Los sistemas basados en Lógica Difusa o LD han sido eficientemente aplicados en problemas de detección y diagnóstico de fallas. Una de las principales cualidades de dichos sistemas radica en la interpretabilidad del diagnóstico efectuado que se obtiene al observar las distintas reglas activadas en el proceso de inferencia.

Como se mencionó en la sección anterior para el caso del uso de las redes neuronales artificiales en la detección y diagnóstico de fallas, de manera análoga, las técnicas difusas han sido implementadas, tanto en arquitecturas que hacen uso de modelos y residuos, como en estructuras que modelan y procesan directamente las entradas y salidas del proceso sin un modelo explícito. Algunas de las técnicas propuestas se describen a continuación.

En [23] se presenta un análisis comparativo entre las técnicas difusas frente a las Funciones de Base Radial o RBF, viendo el problema diagnóstico como un problema de clasificación.

Por otro lado, en [24] se presenta un sistema de inferencia difuso aplicado a un problema de detección de fallas de un sistema de control de nivel de tanques. A partir de la simulación del proceso, se extraen los datos de entrenamiento para 9 posibles tipos de fallas, las cuales pueden estar presentes en un 10%, 25% o 40%. Se tienen 27 reglas y el ajuste del sistema se alcanza mediante la modificación de los puntos de frontera para cada uno de los conjuntos difusos. Se realiza el entrenamiento mediante descenso del gradiente, recocido simulado y algoritmos genéticos, minimizando el error cuadrático medio. Se comparan los resultados del sistema de diagnóstico con otro realizado mediante redes neuronales encontrando un mejor desempeño para el basado en lógica difusa.

En [25] se describe una arquitectura basada en un modelo del proceso en funcionamiento normal y k modelos del funcionamiento bajo fallas. Los residuos son calculados entre los modelos de las fallas y la salida real, y en el momento en que el residuo esté por debajo de un umbral, la falla será detectada. Esta arquitectura puede ser utilizada indistintamente del modelo del proceso que se tenga, bien sea analítico u obtenido a partir de datos. Los modelos de ejemplo son del tipo Takagi-Sugeno, cuya estructura y parámetros son obtenidos mediante propuestas realizadas en trabajos previos. La aplicación de ejemplo hace uso de los datos propuestos en [9].

Por otro lado, en [26, 27], se presenta un enfoque que permite identificar las desviaciones del sistema de un punto

de operación deseado y crea nuevos clusters correspondientes a los distintos estados de operación. Dicho procedimiento de entrenamiento puede ser realizado en línea. El algoritmo es evaluado en un sistema de control de flujo de agua dentro de un hervidor industrial.

En [27] se diseña un sistema del tipo Takagi-Sugeno complementado al que denominan Gaussian Evolving Fuzzy Modeling System. Una de las principales particularidades de la arquitectura propuesta radica en su capacidad de realizar aprendizaje en línea y fuera de línea, lo que permite la continua actualización de la herramienta de diagnóstico. Otra de sus características consiste en el aprendizaje adaptativo, ya que tiene en cuenta el conocimiento ya aprendido antes de crear un nuevo cluster, lo que lo hace robusto ante el ruido y a su vez sensible a nuevos estados del proceso. La arquitectura se pone a prueba modelando una ecuación diferencial con retardos y un sistema de previsión de demanda energética.

En [28] se expone el uso de un autómata difuso en el que la salida del sistema es modelada a partir de su fraccionamiento en segmentos lineales, los cuales son utilizados para generar patrones. El comportamiento del sistema se modela a partir de las transiciones entre patrones y se asocia a cada uno de ellos una función de pertenencia. La obtención de dicho patrón con una función de pertenencia que sobrepase cierto umbral se interpreta como un funcionamiento normal del sistema. Luego, al variar algún parámetro mediante la simulación de una falla, se puede obtener un patrón similar pero con funciones de pertenencia bajo el umbral definido, eso es lo que permite la detección.

En [29] se plantea un sistema de detección y diagnóstico específico para un sistema de distribución de energía. Dicho sistema se modela mediante conceptos de lógica difusa y la sintonización fina de los parámetros del sistema de diagnóstico se realiza mediante un algoritmo genético.

En [30] se expone el uso de un algoritmo genético para la obtención de la base de reglas de un sistema de inferencia difusa convencional, a partir de un conjunto de casos de entrenamiento, la función objetivo evalúa la sumatoria de la salida del sistema para cada ejemplo de entrenamiento frente a la salida deseada. El sistema se pone a prueba con un sistema de aire acondicionado.

En [31] se despliega un sistema de inferencia difuso para detectar fallas mecánicas en rodamientos. La señal es adquirida mediante un micrófono y el sistema difuso se alimenta con variables como la potencia y la variación de la señal.

En [32] se propone el uso de modelos difusos que pueden ser actualizados on-line. Se proponen múltiples modelos, uno para cada posible medida susceptible a fallas y se genera un residuo. La detección de la falla se da al sobrepasar cierto umbral definido para cada punto de trabajo denominado barra de error local.

En [33] se formula el desarrollo de múltiples modelos de referencia, tanto para las condiciones de falla como para la operación normal. Además, en línea se realiza la identificación de un modelo difuso el cual se compara continuamente con los modelos de referencia en busca de semejanzas mediante una medida difusa de similitud. La Fig. 4 describe el sistema propuesto.

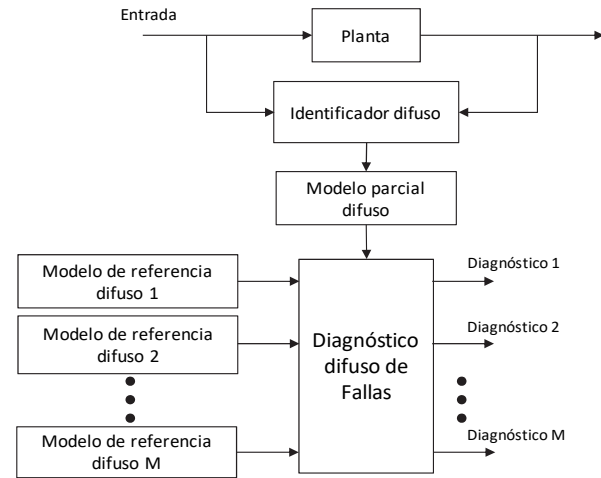


Figura 4. Esquema de detección y diagnóstico de fallas a partir de múltiples modelos de referencia difusos.

Fuente: [33].

3.1. Reflexión y proyección de la LD en FDI

Las estrategias basadas en lógica difusa favorecen la explicabilidad de los diagnósticos obtenidos. Dicha característica es muy deseable en sistemas de apoyo a la decisión. Sin embargo, sus principales deficiencias se encuentran en las fases de entrenamiento. Las múltiples estrategias aquí citadas favorecen su aplicación a partir de algoritmos automatizados de entrenamiento.

Por lo tanto, en términos generales, las estrategias que hacen uso de técnicas difusas apoyadas por algoritmos automatizados de entrenamiento son de las estrategias más promisorias y de mayor aplicabilidad en la detección y diagnóstico de fallas en línea.

4. Sistemas neurodifusos para detección y diagnóstico de fallas.

Un Sistema Adaptativo de Inferencia Neuro-Difusa o ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) combina la capacidad de los sistemas difusos para dar respuestas legibles a partir de las interpretaciones lingüísticas, con la habilidad de las redes neuronales de aprender a partir de datos.

Estos sistemas han tenido gran acogida en aplicaciones de detección y diagnóstico de fallas, dada la capacidad de justificar, al menos parcialmente, el razonamiento que lleva al diagnóstico de una falla, representa una ventaja al compararlo con un sistema de diagnóstico tipo caja negra.

A continuación se hace referencia a los desarrollos de mayor relevancia que hacen uso de los sistemas neuro-difusos.

En [34] se expone un esquema que hace uso de un modelo neuro-difuso del proceso para obtener un residuo. Cuando dicho residuo sobrepasa un umbral establecido, se detecta una falla. Para identificar de qué tipo de falla se trata, se compara estadísticamente el valor del residuo (mínimo, máximo, medio y gradiente), con una base de conocimiento heurístico derivado del conocimiento del operador del proceso, la cual puede ser actualizada continuamente. La Fig. 5 presenta la arquitectura propuesta.

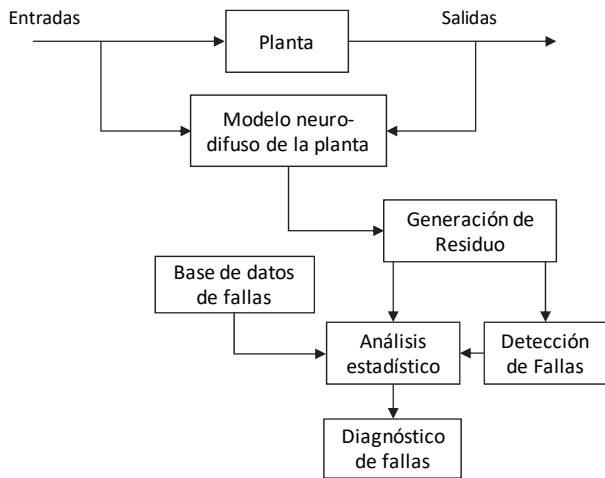


Figura 5. Detección y diagnóstico de fallas a partir de análisis estadístico de residuos.

Fuente: [34].

En [35] se despliega una arquitectura basada en una RBFNN que construye hiper-rectángulos donde cada uno de ellos cubre una región del espacio de clasificación correspondiente a una clase. La red se acompaña de un sistema de generación de reglas que intenta explicar la decisión en términos lingüísticos, lo que permite solventar la principal desventaja de las redes neuronales para el diagnóstico, su incapacidad de explicar sus decisiones. La arquitectura propuesta se aplica a un sistema de distribución de agua.

Por otro lado, en [36] se formula una aplicación sobre el mismo sistema de prueba propuesto en [9] que consiste de un sistema ANFIS para la obtención de un modelo del sistema a partir de datos. La obtención de los residuos para el diagnóstico se realiza mediante una resta directa entre las salidas reales y modeladas del sistema, y un filtro pasa bajos para eliminar la sensibilidad excesiva del sistema. Estos residuos alimentan otro conjunto de modelos neuro-difusos que opera como un clasificador. Cada uno de los sistemas ANFIS del clasificador está relacionado con una falla específica del sistema, permitiendo así la detección de múltiples fallas de forma simultánea.

En [37] se expone el análisis de un sistema complejo (turbina de vapor) mediante su descomposición en sistemas más simples para mejorar el desempeño del diagnóstico. El criterio para la distribución de variables se da a partir del conocimiento del proceso. Cada uno de los sub sistemas y sus correspondientes fallas son representados mediante un sistema ANFIS. Este enfoque justifica, además, en que el modelo de un sistema sencillo resulta más confiable y fácil de obtener que en el modelo de un sistema completo.

En [38] se detalla el uso de un sistema ANFIS generalizado que permite tener múltiples salidas del sistema denominado Coactive Adaptive Neuro-Fuzzy System o CANFIS. El algoritmo se aplica a un sistema de monitoreo del estado de vías férreas. En lugar de proponer múltiples sistemas ANFIS, se construye un único modelo lo que reduce de forma importante la cantidad de parámetros a ajustar. El modelo consta de 8 mediciones de voltaje y corriente en distintos puntos del circuito como variables de entrada, y 10 salidas, cada una de ellas correspondiente a una posible falla.

Las salidas fueron divididas en 3 posibles estados, la ausencia de falla, el deterioro y la falla como tal.

En [39, 40], se presenta el problema de la obtención de un modelo difuso del proceso del tipo Takagi-Sugeno. Con el objetivo de manejar la incertidumbre del modelo se plantea la evaluación de los residuos a partir de umbrales adaptativos. Finalmente en [39] se diseña un experimento con datos provenientes de un motor eléctrico para comprobar la funcionalidad de la metodología propuesta, se resalta la importancia de incluir la dinámica del sistema dentro del modelo mediante la inclusión de las salidas y entradas retrasadas como entradas de la red. En [40] se extiende el algoritmo de entrenamiento planteado a una red neuro-difusa y se aplica al problema de prueba propuesto en [9].

En [41] se propone el uso de un sistema tipo Takagi-sugeno para cada escenario de fallas posible, junto con el modelamiento del estado normal de operación, y de acuerdo a la comparación final entre el estado real de la planta y la salida de los múltiples modelos, se realiza el diagnóstico final. Como novedad se plantea el uso del algoritmo LOLIMOT (Local Linear Model Tree) para el entrenamiento del sistema neuro-difuso.

En [42] se tratan dos esquemas de detección basados en múltiples sistemas tipo ANFIS en paralelo para procesos MIMO (Multiple Input Multiple Output), llamados M-ANFIS. La primera fase del procesamiento consiste en la generación de residuos a partir de la comparación entre el proceso y el modelo M-ANFIS. Los residuos son posteriormente evaluados y categorizados por una red neuronal. El segundo esquema consiste en múltiples modelos M-ANFIS, uno por cada escenario de falla.

En [43] se plantea el uso de dos redes tipo ANFIS para la detección de fallas. La primera se utiliza para modelar el sistema a monitorear, mientras que la segunda para modelar los residuos. El entrenamiento de dichas redes puede ser realizado en línea mediante mínimos cuadrados. Una vez que la red dedicada a modelar los residuos ha finalizado su entrenamiento se extraen las reglas activadas para cada una de las fallas creando así una serie de patrones de fallas con relación a dicha base de reglas es posible extraer la información lingüística correspondiente a una falla, así como también para fallas múltiples. La funcionalidad del esquema propuesto es comprobada mediante un sistema de tanques en cascada, detallando el modelo, así como los parámetros de simulación de las averías y del controlador implementado. La Fig. 6 ilustra el esquema de detección propuesto.

En [44], se propone también un sistema que hace uso de múltiples modelos ANFIS, cada uno de ellos relacionado con una posible falla en particular alrededor de determinado punto de operación. Las salidas de estos modelos se contrastan con las salidas de la planta real, obteniendo así un residuo para cada uno de los escenarios planteados, lo que permite identificar la falla siempre y cuando se trate de una condición anormal prevista con anterioridad (no es sensible con fallas desconocidas). El sistema es aplicado al problema descrito en [9].

En [45] se propone también un esquema de generación de residuos a partir de un modelo difuso del proceso. Para la detección de las fallas se propone una red ANFIS. El uso de un modelo desarrollado a partir de razonamiento cualitativo, reduce bastante el costo computacional.

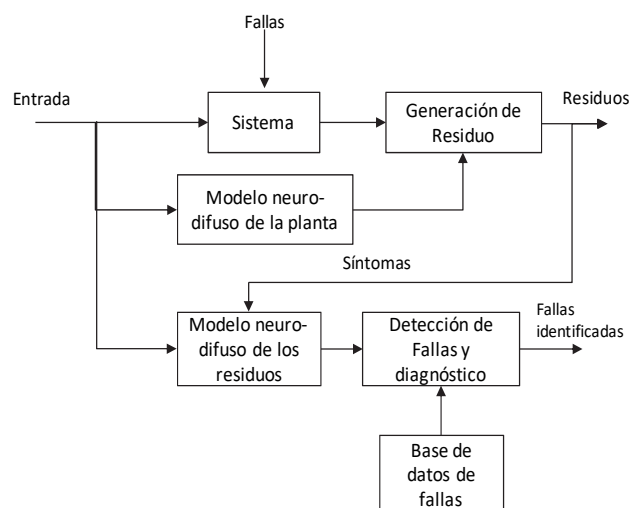


Figura 6. Esquema de detección basado en 2 ANFIS.
Fuente: [43].

Existen enfoques que plantean el uso de sistemas neuro-difusos sin la necesidad de usar residuos, sino únicamente a partir de sus características como clasificadores. En [46] se plantea la detección de fallas orientado en datos a partir del uso de un clasificador neuro-difuso. La funcionalidad se comprueba con el problema DAMADICS [9], orientándose a la detección de la intensidad de cada falla.

En [47] se propone una red neuronal donde la primera de las capas ocultas es una capa difusa que se encarga de normalizar las variables de entrada. Las siguientes capas ocultas de la red operan de forma análoga a una red neuronal retroalimentada. Este sistema se orienta en la obtención de un modelo para la generación de residuos. La evaluación de dichos residuos se realiza mediante umbrales fijos.

Por último, en [48] se describe el uso de un esquema compuesto por una red neuronal complementado por un sistema de inferencia difuso que opera a partir de las observaciones de la planta, junto con la salida de la red neuronal.

4.1. Reflexión y proyección de ANFIS en FDI

El uso de sistemas ANFIS para el modelamiento de sistemas dinámicos es ampliamente aprovechado en muchas de las investigaciones aquí reportadas. Sin embargo, la reducida explicabilidad de los resultados de la inferencia resulta poco conveniente en sistemas de apoyo al diagnóstico. Otra deficiencia importante radica en la baja capacidad de detección de nuevas fallas debido al enfoque ampliamente utilizado de “modelo por falla”. Es aquí donde radica la principal oportunidad de mejora; estrategias capaces de identificar nuevas fallas a partir de estructuras dinámicas entrenadas en línea.

5. Sistemas inmunes para detección y diagnóstico de fallas.

Los sistemas inmunes por sí solos no son utilizados en la identificación y diagnóstico de fallas debido a la necesidad de un elevado proceso de cómputo. Sin embargo, han sido utilizados como herramienta de apoyo para optimizar la arquitectura de

sistemas de identificación como redes neuronales o las bases de reglas de sistemas de inferencia difusa.

En [49], se propone la optimización de la arquitectura, las funciones de activación, los parámetros de entrenamiento, el número de épocas, entre otros factores que hacen parte de la definición de una red neuronal retroalimentada, mediante un sistema inmune. Todos estos parámetros se codifican de forma binaria. El sistema se entrena con casos provenientes de un sistema de medición de calidad de agua.

En [50] se plantea un esquema de detección de fallas a partir de la emulación de la respuesta del sistema inmune. Se fundamenta en recientes estudios que plantean que la respuesta inmunológica no es ocasionada simplemente por entes extraños dentro del organismo, sino por señales de alarma desencadenadas por las células cuando no mueren naturalmente. Mediante un modelo del proceso y su comparación con el funcionamiento real, se obtiene un residuo, el cual es categorizado dentro de un clasificador difuso como una señal de peligro.

En [51] se describe un procedimiento de detección y diagnóstico de fallas inspirado en la respuesta temprana de algunas células del sistema inmune conocidas como “*Asesinos Naturales*”. El esquema no hace uso de un modelo ni de residuos sino únicamente de datos de entrenamiento extraídos de estados de operación normales y anormales. Inicialmente se realiza una inicialización estocástica de las células para posteriormente realizar un entrenamiento. Finalmente, cuando las células ya se encuentran “maduras” es posible iniciar el diagnóstico de fallas. El sistema de clasificación es utilizado en el sistema DAMADICS [9].

En [52] se propone un sistema de detección y diagnóstico de fallas sin modelo a partir de la clasificación de un sistema autoinmune en el que primero se presentan casos de operación normal, y luego con fallas. Con la continua presentación de fallas se crean regiones correspondientes a cada una de ellas. Pueden detectarse nuevas fallas y eliminarse las antiguas.

6. Comparación de las técnicas de inteligencia artificial para detección y diagnóstico de fallas

La presente revisión bibliográfica, se ha centrado exclusivamente en técnicas de detección y diagnóstico de fallas en sistemas que hacen uso de las principales vertientes de la inteligencia artificial como las redes neuronales, los sistemas difusos y neurodifusos, y los sistemas inmunes. Es evidente la gran cantidad de alternativas que han sido planteadas para abordar esta problemática.

Se han realizado múltiples esfuerzos para elaborar un “Benchmarking”, DAMADICS [9], proyecto que ha sido referenciado ampliamente en este trabajo es uno de los intentos de comparación con mayor relevancia, dada la gran cantidad de publicaciones derivadas de los datos provistos por este experimento. Otro referente importante a considerar es el proyecto CHEM [53], que consiste en un equipo multidisciplinario para la obtención de sistemas de soporte a la decisión para la industria química y petroquímica, un proyecto europeo de donde se generaron múltiples investigaciones a nivel de desarrollo de software y de tesis doctorales [54, 55] entre otros.

Una de las conclusiones importantes presentadas por trabajos de revisión previos [3] consiste en que las debilidades propias de cada una de las estrategias pueden ser mitigadas mediante el uso combinado de varias de ellas, lo que ha dado origen a múltiples técnicas híbridas, hecho que ha tenido amplia aceptación en las aplicaciones industriales de estos sistemas.

Como conclusión de la recopilación presentada en este artículo, la tabla 1 presenta el resultado de la comparación de las distintas estrategias aquí mencionadas frente a las características definidas en [1].

Tabla 1.
Comparación de técnicas de inteligencia artificial para detección y diagnóstico de fallas de acuerdo con las características definidas en [1].

Estrategia citada en	Aislamiento	Robustez	Identificación de novedades	Adaptabilidad	Explicabilidad	Tipo de Modelo del proceso	Costo computacional	Identificación fallas múltiples
[10]	Sí	Bajo	No	No	No	ANN	Medio	No
[11]	No	Bajo	No	No	No	Sin modelo	Medio	No
[12]	Sí	Bajo	No	No	No	Sin modelo	Medio	No
[13]	Sí	Medio	No	No	No	Sin modelo	Bajo	No
[14]	No	Bajo	No	No	No	ANN	Medio	No
[15]	Sí	Alto	Sí	Sí	No	Sin modelo	Medio	No
[16]	No	Bajo	No	No	No	Sin modelo	Bajo	No
[17]	Sí	Bajo	No	No	No	Sin modelo	Bajo	No
[18]	Sí	Medio	No	No	No	Sin modelo	Bajo	No
[19]	Sí	Medio	No	No	No	ANN	Medio	No
[20]	Sí	Medio	No	No	No	Sin modelo	Bajo	No
[21]	No	Medio	Sí	Sí	No	RBFNN	Alto	No
[22]	Sí	Medio	No	No	No	ANN	Alto	Sí
[24]	Sí	Medio	No	No	Sí	Difuso	Alto	No
[25]	Sí	Alto	No	No	Sí	Difuso	Bajo	No
[26]	Sí	Medio	Sí	Sí	Sí	Sin modelo	Alto	No
[27]	Sí	Medio	Sí	Sí	Sí	Sin modelo	Alto	No
[28]	No	Medio	Sí	No	No	Difuso	Bajo	Sí
[29]	Sí	Medio	No	No	Sí	Sin modelo	Alto	Sí
[30]	Sí	Bajo	No	No	Sí	Sin modelo	Alto	No
[31]	Sí	Medio	No	No	No	Sin modelo	Bajo	No
[32]	Sí	Medio	Sí	Sí	No	Difuso	Alto	No
[33]	Sí	Medio	No	No	No	Difuso	Alto	Sí
[34]	Sí	Medio	No	Sí	Sí	ANFIS	Alto	No
[35]	Sí	Alto	Sí	Sí	Sí	Sin modelo	Alto	No
[36]	Sí	Alto	No	No	No	ANFIS	Alto	Sí
[37]	Sí	Alto	No	No	Sí	ANFIS	Alto	Sí
[38]	Sí	Medio	No	No	Sí	ANFIS	Medio	Sí
[39]	Sí	Alto	No	No	Sí	ANFIS	Alto	No
[40]	Sí	Alto	No	No	Sí	ANFIS	Alto	No
[41]	Sí	Medio	No	No	No	ANFIS	Alto	Sí
[42]	Sí	Medio	No	No	No	ANFIS	Alto	No
[43]	Sí	Medio	Sí	Sí	Sí	ANFIS	Alto	No
[44]	Sí	Medio	No	No	No	ANFIS	Alto	Sí
[45]	Sí	Medio	No	No	Sí	ANFIS	Bajo	No
[46]	Sí	Medio	Sí	Sí	No	Sin modelo	Medio	No
[47]	Sí	Alto	No	No	No	ANFIS	Medio	No
[48]	No	Medio	No	No	No	Sin modelo	Bajo	No
[49]	Sí	Medio	No	No	No	Sin modelo	Bajo	No
[50]	Sí	Medio	No	Sí	No	Análítico	Bajo	No
[51]	No	Alto	No	No	No	Sin modelo	Alto	No
[52]	Sí	Alto	Sí	Sí	No	Sin modelo	Alto	No

Fuente: Los autores.

7. Conclusiones y oportunidades de trabajo futuro

El uso de técnicas de inteligencia artificial para abordar la detección y el diagnóstico de fallas constituye en la actualidad campo activo de investigación, hecho que se refleja en la extensa literatura disponible sobre propuestas metodológicas y aplicaciones derivadas de su uso.

En el presente artículo se han organizado, clasificado y comparado algunas de ellas teniendo en cuenta algunas de las características que pueden ser consideradas como deseables en un sistema de detección y diagnóstico de fallas. La primera gran división categórica está en aquellas estrategias orientadas a residuos, frente a las que se orientan al análisis de datos de entradas y salidas del proceso sin necesidad de un modelo explícito. Del análisis frente a los factores presentados en la Tabla 2, se evidencia que las estrategias que no utilizan modelos, son más eficaces en la detección de fallas.

Por otro lado, otro enfoque ampliamente utilizado consiste en el desarrollo de múltiples modelos de proceso, en distintas condiciones de operación, tanto normal como anormal, que se están comparando continuamente con el proceso real permitiendo así identificar su estado actual. Este enfoque permite la identificación de múltiples fallas, siempre y cuando estas no estén acopladas, pero restringe la adaptabilidad del sistema y lo limita únicamente a estados conocidos.

Como alternativa para alcanzar la detección de múltiples fallas se describen algunas técnicas que descomponen el sistema total en distintos subsistemas más simples de analizar, lo que, a pesar de elevar el costo computacional, facilita la obtención de modelos locales del proceso, permitiendo además identificar el origen de una falla favoreciendo la interpretación.

Del presente análisis se concluye que las futuras estrategias de detección y diagnóstico deberán centrarse en mejorar la robustez y la adaptabilidad, permitiendo la continua evolución del sistema, centrándose además en alcanzar diagnósticos interpretables por el operador en los que se aislen las localizaciones de las fallas y sus posibles causas.

Referencias

- [1] Venkatasubramanian, V., Rengaswamy, R., Yin K. and Kavuri, S., A review of process fault detection and diagnosis: Part I: Quantitative model-based methods, *Computers & Chemical Engineering*, 27(3), pp. 293-311, 2003. DOI: 10.1016/S0098-1354(02)00160-6.
- [2] Venkatasubramanian, V., Rengaswamy, R., Yin K. and Kavuri, S., A review of process fault detection and diagnosis: Part II: Qualitative models and search strategies, *Computers & Chemical Engineering*, 27(3), pp. 313-326, 2003. DOI: 10.1016/S0098-1354(02)00161-8.
- [3] Venkatasubramanian, V., Rengaswamy, R., Yin K. and Kavuri, S., A review of process fault detection and diagnosis: Part III: Process history based methods, *Computers & Chemical Engineering*, 27(3), pp. 327-346, 2003. DOI: 10.1016/S0098-1354(02)00162-X.
- [4] Angeli, C. and Chatziniakolaou, A., On-line fault detection techniques for technical systems: A survey. *International Journal of Computer Science & Applications*, 1(1), pp. 12-30, 2004. DOI: 10.1.1.100.6189.

- [5] [5] Hwang, I., Kim, S. Kim, Y. and Seah, C., A survey of fault detection, isolation, and reconfiguration methods, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 18(3), pp. 636-653, 2010. DOI: 10.1109/TCST.2009.2026285.
- [6] [6] Dash, S. and Venkatasubramanian, V., Challenges in the industrial applications of fault diagnostic systems, *Computers & Chemical Engineering*, 24(2-7), pp. 785-791, 2000. DOI: 10.1016/S0098-1354(00)00374-4.
- [7] [7] Marzat, J., Piet-Lahanier, H., Damongeot, F., Walter, E. et al, Autonomous fault diagnosis: state of the art and aeronautical benchmark, in *Proceedings of the 3rd European Conference for Aerospace Sciences, EUCASS'2009*, 2009. HAL: 00429743.
- [8] [8] Frank, P. and Köppen-Seliger, B., Fuzzy logic and neural network applications to fault diagnosis. *International Journal of Approximate Reasoning*, 16(1), pp. 67-88, 1997. DOI: 10.1016/S0888-613X(96)00116-8.
- [9] [9] DAMADICS, DAMADICS RTN Information Web site. [Online]. [Date of reference October 26th of 2015]. Available at: <http://diag.mchtr.pw.edu.pl/DAMADICS/>.
- [10] [10] Fekih, A. Xu, H. and Chowdhury, F., Two neural net-learning methods for model based fault detection, in *Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes 2006*, Hong-Yue Zhang, Ed. Oxford: Elsevier Science Ltd, 2007. pp. 72-77. DOI: 10.3182/20060829-4-CN-2909.00011.
- [11] [11] Madani, K., A survey of artificial neural networks based fault detection and fault diagnosis techniques, in *Neural Networks. International Joint Conference on Neural Networks, IJCNN'99*, 5, pp. 3442-3446, 1999. DOI: 10.1109/IJCNN.1999.836218.
- [12] [12] Demetgul, M., Unal, M., Tansel, I. and Yazıcıoğlu, O., Fault diagnosis on bottle filling plant using genetic-based neural network, *Advances in Engineering Software*, 42(12), pp. 1051-1058, 2011. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2011.07.004.
- [13] [13] Ghate, V. and Dudul, S., Optimal MLP neural network classifier for fault detection of three phase induction motor, *Expert Systems with Applications*, 37(4), pp. 3468-3481, 2010. DOI: 10.1016/j.eswa.2009.10.041.
- [14] [14] Krzysztof, S., Neural networks based diagnostic system for industrial purifying fumes installation, in *Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes 2006*, Hong-Yue Zhang, Ed. Oxford: Elsevier Science Ltd, 2007, pp. 681-686.
- [15] [15] Jakubek, S. and Strasser, T., Artificial neural networks for fault detection in large-scale data acquisition systems, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 17(3), pp. 233-248, 2004. DOI: 10.1016/j.engappai.2004.03.002.
- [16] [16] Eski, I., Erkaya, S., Savas, S. and Yildirim, S., Fault detection on robot manipulators using artificial neural networks, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 27(1), pp. 115-123, 2011. DOI: 10.1016/j.rcim.2010.06.017.
- [17] [17] Karpenko, M. and Sepehri, N., A neural network based fault detection and identification scheme for pneumatic process control valves, in *2001 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 1, pp. 93-98, 2001. DOI: 10.1109/ICSMC.2001.969794.
- [18] [18] Sadeghi, M., Rafiee, J., Arvani, F. and Harifi, A., A Fault detection and identification system for gearboxes using neural networks, in *International Conference on Neural Networks and Brain, ICNNB'05*, 2, pp. 964-969, 2005. DOI: 10.1109/ICNNB.2005.1614780.
- [19] [19] Kourd, Y. and Guersi, N., Faults diagnosis by neural networks application on DAMADICS Benchmark, in *4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP'2007*, 2007.
- [20] [20] Witczak, M., Korbicz, J., Mrugalski, M. and Patton, R., A GMDH neural network-based approach to robust fault diagnosis: Application to the DAMADICS benchmark problem, *Control Engineering Practice*, 14(6), pp. 671-683, 2006. DOI: 10.1016/j.conengprac.2005.04.007.
- [21] [21] Zhengdao, Z. and Weihua, Z., Neural network based fault detection and identification for fighter control surface failure, in *Control and Decision Conference, CCDC'09*, pp. 5256-5261, 2009.
- [22] [22] Samy, I., Postlethwaite, I. and Gu, D., Survey and application of sensor fault detection and isolation schemes, *Control Engineering Practice*, 19(7), pp. 658-674, 2011. DOI: 10.1016/j.conengprac.2011.03.002.
- [23] [23] Catelani, M. and Fort, A., Soft fault detection and isolation in analog circuits: some results and a comparison between a fuzzy approach and radial basis function networks, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 51(2), pp. 196-202, 2002. DOI: 10.1109/19.997811.
- [24] [24] White, C. and Lakany, H., A fuzzy inference system for fault detection and isolation: Application to a fluid system, *Expert Systems with Applications*, 35(3), pp. 1021-1033, 2008. DOI: 10.1016/j.eswa.2007.08.029.
- [25] [25] Mendonça, L., Sousa, J. and Sá da Costa, J., An architecture for fault detection and isolation based on fuzzy methods, *Expert Systems with Applications*, 36(2), Part 1, pp. 1092-1104, 2009. DOI: 10.1016/j.eswa.2007.11.009.
- [26] [26] Lemos, A. Caminhas, W. and Gomide, F., Adaptive fault detection and diagnosis using an evolving fuzzy classifier, *Information Sciences: An International Journal*, 222, 64-85, 2013. DOI: 10.1016/j.ins.2011.08.030.
- [27] [27] Lemos, A. Caminhas, W. and Gomide, F., Multivariable Gaussian Evolving Fuzzy Modeling System, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 19(1), pp. 91-104, Feb. 2011. DOI: 10.1109/TFUZZ.2010.2087381.
- [28] [28] Rigatos, G., Fault detection and isolation based on fuzzy automata, *Information Sciences*, 179(12), pp. 1893-1902, 2009. DOI: 10.1016/j.ins.2009.01.015.
- [29] [29] Srinivasan, D., Cheu, R. Poh, Y. and Ng, A., Automated fault detection in power distribution networks using a hybrid fuzzy-genetic algorithm approach, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 13(4), pp. 407-418, 2000. DOI: 10.1016/S0952-1976(00)00012-9.
- [30] [30] Lo, C., Chan, P., Wong, Y., Rad, A. and Cheung, K., Fuzzy-genetic algorithm for automatic fault detection in HVAC systems, *Applied Soft Computing*, 7(2), pp. 554-560, 2007. DOI: 10.1007/s12273-016-0285-4.
- [31] [31] Boutros, T. and Liang, M., Mechanical fault detection using fuzzy index fusion, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(11), pp. 1702-1714, 2007. DOI: 10.16/j.ijmachtools.2007.01.001.
- [32] [32] Lughofer, E. and Guardiola, C., Applying evolving fuzzy models with adaptive local error bars to on-line fault detection, in *3rd International Workshop on Genetic and Evolving Systems, GEFS 2008*, pp. 35-40, 2008. DOI: 10.1109/GEFS.2008.4484564.
- [33] [33] Ganjdanesh, Y., Manjili, Y., Vafaei, M., Zamanizadeh, E. and Jahanshahi, E., Fuzzy fault detection and diagnosis under severely noisy conditions using feature-based approaches, in *2008 American Control Conference*, pp. 3319-3324, 2008. DOI: 10.1109/ACC.2008.4587004.
- [34] [34] Shabanian, M., and Montazeri, M., A neuro-fuzzy online fault detection and diagnosis algorithm for nonlinear and dynamic systems, *International Journal of Control, Automation and Systems*, 9(4), pp. 665-670, 2011. DOI: 10.1007/s12555-011-0407-9.
- [35] [35] Tan, S., Lim, C. and Rao, M., A hybrid neural network model for rule generation and its application to process fault detection and diagnosis, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 20(2), pp. 203-213, 2007. DOI: 10.1016/j.engappai.2006.06.007.
- [36] [36] Kourd, Y., Guersi, N. and Lefebvre, D., Neuro-fuzzy approach for default Diagnosis: Application to the DAMADICS, in *4th IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies, DEST*, pp. 107-111, 2010. DOI: 10.1109/DEST.2010.5610663.
- [37] [37] Salahshoor, K., Khoshro, M. and Kordestani, M., Fault detection and diagnosis of an industrial steam turbine using a distributed configuration of adaptive neuro-fuzzy inference systems, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19(5), pp. 1280-1293, 2011. DOI: 10.1016/j.simpat.2011.01.005.
- [38] [38] Chen, J., Roberts, C. and Weston, P., Fault detection and diagnosis for railway track circuits using neuro-fuzzy systems, *Control Engineering Practice*, 16(5), pp. 585-596, 2008. DOI: 10.1016/j.conengprac.2007.06.007.
- [39] [39] Kowal, M., Fault detection under fuzzy model uncertainty, *International Journal of Automation and Computing*, 4(2), pp. 117-124, 2007. DOI: 10.1007/s11633-007-0117-1.
- [40] [40] Korbicz, J. and Kowal, M., Neuro-fuzzy networks and their application to fault detection of dynamical systems, *Engineering*

- Applications of Artificial Intelligence, 20(5), pp. 609-617, 2007. DOI: 10.1016/j.engappai.2006.11.009.
- [41] [41]Sadeghian, M. and Fatehi, A., Identification, prediction and detection of the process fault in a cement rotary kiln by locally linear neuro-fuzzy technique, *Journal of Process Control*, 21(2), pp. 302-308, 2011. DOI: 10.1016/j.jprocont.2010.10.009.
- [42] [42]Yüksel, T. and Sezgin, A., Two fault detection and isolation schemes for robot manipulators using soft computing techniques, *Applied Soft Computing*, 10(1), pp. 125-134, 2010. DOI: 10.1016/j.asoc.2009.06.011.
- [43] [43]Mok, H. and Chan, C., Online fault detection and isolation of nonlinear systems based on neurofuzzy networks, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 21(2), pp. 171-181, 2008. DOI: 10.1016/j.engappai.2007.04.002.
- [44] [44]Uppal, F., Patton, R. and Witczak, M., A neuro-fuzzy multiple-model observer approach to robust fault diagnosis based on the DAMADICS benchmark problem, *Control Engineering Practice*, 14(6), pp. 699-717, 2006. DOI: 10.1016/j.conengprac.2005.04.015.
- [45] [45]Calado, J., Sá da Costa, J. Bartys, M. and Korbicz, J., FDI approach to the DAMADICS benchmark problem based on qualitative reasoning coupled with fuzzy neural networks, *Control Engineering Practice*, 14(6), pp. 685-698, 2006. DOI: 10.1016/j.conengprac.2005.03.025.
- [46] [46]Bocaniala, C. and Sá da Costa, J., Application of a novel fuzzy classifier to fault detection and isolation of the DAMADICS benchmark problem, *Control Engineering Practice*, 14(6), pp. 653-669, 2006. DOI: 10.1016/j.conengprac.2005.06.008.
- [47] [47]Xu, Y. and Wang, Z., On a fault detection system based on neuro-fuzzy fusion method, in *Control and Decision Conference, CCDC*, 2010, pp. 3190-3193, 2010. DOI: 10.1109/CCDC.2010.5498631.
- [48] [48]Ruiz, D., Nougues, J. and Puigjaner, L., Fault diagnosis support system for complex chemical plants, *Computers & Chemical Engineering*, 25(1), pp. 151-160, 2001. DOI: 10.1016/S0098-1354(00)00638-4.
- [49] [49]Chen, X. and Huang, H., Immune feedforward neural network for fault detection, *Tsinghua Science & Technology*, 16(3), pp. 272-277, 2011. DOI: 10.1016/S1007-0214(11)70039-6.
- [50] [50]Laurentys, C., Palhares, R. and Caminhas, W., Design of an artificial immune system based on Danger Model for fault detection, *Expert Systems with Applications*, 37(7), pp. 5145-5152, 2010. DOI: 10.1016/j.eswa.2009.12.079.
- [51] [51]Laurentys, C., Palhares, R. and Caminhas, W., A novel Artificial Immune System for fault behavior detection, *Expert Systems with Applications*, 38(6), pp. 6957-6966, 2011. DOI: 10.1016/j.eswa.2010.12.019.
- [52] [52]Weng, L., Bikdash, M., Liao, X. and Song, D., Immune system inspired fault detection and identification with application to crew exploration vehicles, in *Proceeding of the Thirty-Eighth Southeastern Symposium on System Theory, SSST'06*, pp. 372-376, 2006. DOI: 10.1109/SSST.2006.1619127.
- [53] [53]Cauvin, S. and Celse, B., CHEM: Advanced decision support systems for chemical/petrochemical process industries, in *Computer Aided Chemical Engineering*, 18, A. Barbosa-Póvoa and H. Matos, Ed. Elsevier, pp. 1027-1032, 2004. DOI: 10.1016/S1570-7946(04)80237-2.
- [54] [54]Kempowski, T., Surveillance de procédés à base de méthodes de classification: conception d'un outil d'aide pour la détection et le diagnostic des défaillances, *INSA de Toulouse*, 2004. tel-00010247.
- [55] [55]Gamero, F., Colomer, J., Meléndez, J. and Berjaga, X., Qualtras: A tool for qualitative trend representations, in *20th International Workshop on Principles of Diagnosis*, Stockholm, pp. 187-194, 2009.

L.L. Hurtado-Cortés, obtuvo su título de Ing. Mecánico en 1995 de la Universidad INCCA de Colombia, su MSc. en Ingeniería en 2005 y su PhD. en Ingeniería en 2014 ambos de la Universidad Nacional de Colombia. Ha sido docente en la Universidad Nacional de Colombia, Universidad de San Buenaventura, Universidad INCCA de Colombia y Universidad Católica de Colombia. Actualmente es profesor asociado en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y profesor adjunto en la Universidad Autónoma de Colombia. Sus áreas de interés son control automático, automatización industrial y sistemas humano-máquina.
ORCID: 0000-0002-1675-9471

E. Villarreal-López, obtuvo su título de Ing. de Diseño y Automatización Electrónica en 2004 de la Universidad de la Salle, su MSc. en Automatización Industrial en 2008 de la Universidad Nacional de Colombia, actualmente cursa estudios de Doctorado en Ingeniería de Sistemas en la Universidad Nacional de Colombia. Ha sido docente en la Universidad de la Salle, Universidad Autónoma de Colombia, Universidad Manuela Beltrán y Universidad Jorge Tadeo Lozano. Actualmente es docente de la Universidad de San Buenaventura. Sus áreas de interés son control automático, automatización industrial y sistemas inteligentes.
ORCID: 0000-0002-1401-955X

L. Villarreal-López, obtuvo su título de Ing. Industrial en 2001 de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, su MSc. en Automatización Industrial en 2004 de la Universidad Nacional de Colombia. Ha sido profesor en la Universidad Católica, Universidad Autónoma de Colombia, Universidad Militar y Universidad Manuela Beltrán. Actualmente es docente de la Fundación Universitaria Agraria de Colombia. Sus áreas de interés son Control Automático y Automatización Industrial.
ORCID: 0000-0002-0921-035X



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería
de Sistemas e Informática

Oferta de Posgrados

Especialización en Sistemas
Especialización en Mercados de Energía
Maestría en Ingeniería - Ingeniería de Sistemas
Doctorado en Ingeniería- Sistema e Informática

Mayor información:

E-mail: acsei_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 5365

A college degree recommendation model^{*}

Milton Rafael Maridueña-Arroyave^a & Ailyn Febles-Estrada^b

^a Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Guayas, Ecuador, milton.mariduenaa@ug.edu.ec

^b Universidad de las Ciencias Informáticas, Habana, Cuba, ailyn@uci.cu

Received: November 25th, de 2015. Received in revised form: May 20th, 2016. Accepted: June 2nd, 2016

Abstract

Selecting a profession suitable to students' expectations implies taking into account multiple factors. Despite its usefulness and high impact, there are shortcomings in current university major recommendation models. Among these limitations are the lack of flexible models, the dependence on historical information and the inadequate weighting of the factors involved. In this paper, a new college degree recommendation model based on psychological student profiling and the analytical hierarchical process is presented. It includes database construction, student profiling, college degree information filtering and recommendation generation. Its implementation made it possible to improve reliability in the recommendation process of college degree. A case study is shown to demonstrate the model applicability.

Keywords: recommender systems, college degree recommendation, AHP, student profile.

Modelo de recomendación de carreras universitarias

Resumen

Con vistas a la elección de una profesión futura que resulte adecuada a las expectativas de una persona es necesario tomar en cuenta múltiples factores. A pesar de su potencial impacto persisten insuficiencias en el tratamiento del proceso de recomendación de las carreras universitarias. Entre ellas se destacan la falta de modelos flexibles no dependientes de datos históricos, y la correcta ponderación de los distintos factores que intervienen en la elección de la carrera. En el presente trabajo se propone un modelo para la recomendación de carreras universitarias basado en el perfilado psicológico del estudiante y en el proceso de jerarquía analítica. Su implementación posibilita mejorar la fiabilidad de las recomendaciones de carreras universitarias. Se desarrolla un estudio de caso real con especial énfasis en carreras relacionadas con las ciencias de la salud y de la información con el propósito de demostrar la aplicabilidad del modelo.

Palabras clave: sistemas de recomendación, recomendación de carreras universitarias, AHP, perfil del estudiante

1. Introduction

Selecting a future career is a complex decision process involving preferences, aptitudes, interests and qualities. Current process based solely on multicriteria decision models allows to handle only a limited number of options (college degrees) [1]. Recommendation models are more adequate due to the relative easiness to take into account users profiles and expectations [2]. Despite the high impact and usefulness of recommending a college degree, there is a group of limitations such as:

- Current models are based mainly on collaborative filtering [3-5] or data mining, like association rules and decision trees [6-8], nevertheless very frequently, there is a lack of historical information making impossible to use

these approaches. For example when dealing with new students, they do not have information about them, and they are then unable to generate recommendations.

- Another shortcoming is that current approaches are based solely on specific subject recommendation, not on whole college degrees.
- Similarity calculation is based in weighted averaging of features. This operator does not take into account interaction like compensation, orness and bipolarity [9-11].
- Models lack dealing with the psychological profile of students [12] to reach a more reliable recommendation.
- In this paper a new model of college degree recommendation is presented using a flexible similarity calculation based on weights obtained from the analytic hierarchy process (AHP), a hierarchical aggregation

How to cite: Maridueña Arroyave, M. R. & Estrada, A. F. A college degree recommendation model DYNA 83 (199) pp. 29-34, 2016

process using the weighted power mean [13] and the student's psychological profiling.

The outline of this paper is as follows: Section II is dedicated to recommendation models, Section III to AHP. The proposed framework is presented in Section IV. A case study is discussed in Section V. The paper closes with concluding remarks, and the discussion of future work in Section VI.

2. Recommendation models

Recommendation systems are useful in decision making process providing the user with a group of options hoping to meet expectations [2]. Based on the information they use and the algorithms used to generate the recommendations, we can distinguish the following techniques [14, 15]:

- Collaborative Filtering Recommender Systems: they use users' ratings to recommend items to a specific user. They aggregate preferences of the other users' preferences to generate new recommendations.
- Content-based Recommender Systems: They learn a user profile based on the features of the items that the user had liked. The user profile could be completed based on psychologic user profiling techniques.
- Knowledge Based Recommender Systems: these systems use the knowledge about users' necessities to infer recommendations. They use cased based reasoning techniques frequently.
- Utility Based Recommender Systems: they make recommendations by computing a utility value.

In the specific case of the systems for vocational guidance, existing proposals rely fundamentally on collaborative filtering approaches [3-5] or data mining techniques [6-8]. But often there is not historical information which makes it impossible to adopt these approaches. Within these systems the Degree Compass System of Austin Peay State University [16] stands out. However, this system shares a common limitation with the rest of the systems studied related to focusing only in the recommendation of specific courses rather than college degrees entirely.

It is possible to improve the reliability of the recommendations obtaining a student profile based on their psychological traits [17]. This profile allows developing recommendations based on content given the similarity of shared characteristics between the object to be recommended and the student profile [12].

3. Analytic Hierarchy Process

The Analytic Hierarchy Process is a technique created by Tom Saaty [18] for making complex decision based on mathematics and psychology. The steps for implementing the AHP proposed model are:

1. Decompose the problem into a hierarchy of goal, criteria, sub-criteria and alternatives.
2. Collect data from experts or decision-makers corresponding to the hierarchic structure, in the pairwise comparison of alternatives on a qualitative scale.

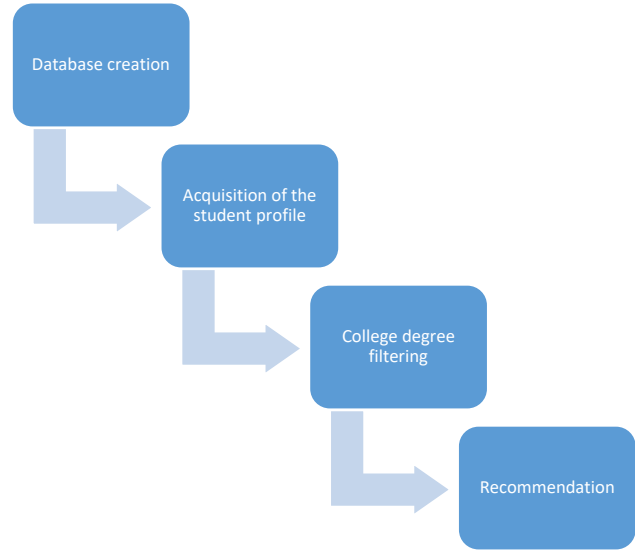


Figure 1 Proposed framework
Source: The authors.

3. Assign a weight to criteria and sub-criteria.
4. Calculate the score for each of the alternatives through pairwise comparison.

AHP can be used in addition to the group assessment [19]. In this case to obtain the final value, the weighted geometric mean [20] is used. The weighting could give different weights to the criteria of the specialists taking into account various factors such as authority, expertise, effort, etc.

The integration of AHP model with university degrees recommendation allows to assign a weight to each of the factors involved in the suggestion of a college career, doing this more in line with reality and therefore more reliable.

4. Proposed framework

The proposed framework is presented in Fig. 1. It is based mainly on the proposal made by Cordon [15] for recommendation systems based on content/knowledge adapted to the characteristics of the application domain and allowing flexibility in the aggregation of the similarity of the characteristics in the user profile with respect to ideal profiles of the college degree.

4.1. Database creation

A key for a recommendation model is the creation of the database. Each university degree a_i will be described by a set of characteristics that make up the profile:

$$C = \{c_1, \dots, c_k, \dots, c_l\} \quad (1)$$

Each of the features which are reflected in the psychological profile may be composed of sub-features.

Each university degree will be described by a vector of features:

$$F_{a_j} = \{v_1^j, \dots, v_k^j, \dots, v_l^j\}, j = 1, \dots, n \quad (2)$$

There are techniques for generating these profiles automatically or semi-automatically for recommendation systems based on psychological profiles [21]. In this case, an expert or group of experts is suggested.

Having described the university degrees in this set:

$$A = \{a_1, \dots, a_j, \dots, a_n\} \quad (3)$$

Then, it is stored in a database.

4.2. Acquisition of the user profile

The proposed framework presents a fundamental difference with previous proposals, it is focused in the fact that most of this information may be collected by psychological tests and can be supplied by psychologists to advise the student.

The student profile corresponds to his psychological profile. In this activity, this information is stored in the database.

$$P_e = \{p_1^e, \dots, p_k^e, \dots, p_l^e\} \quad (4)$$

This profile will be composed of a set of attributes:

$$C^e = \{c_1^e, \dots, c_k^e, \dots, c_l^e\} \quad (5)$$

Features such as skills and emotional intelligence are included.

4.3. College degree filtering

In this activity, college degrees according to the similarity with the user profile are filtered to find out which are the most appropriate for the student.

The similarity between user profile, P_e , and each ideal college degree profile a_j is calculated. For the calculation of the overall similarity a hierarchical aggregation is used taking into account the following factors:

- Degree of simultaneity.
- Relative importance of the inputs (weights).

Aggregation function [22]: $OAG: [0,1]^n \rightarrow [0,1]$ is obtained by a process of hierarchical aggregation. The weighted mean power, (WPM) as in the Logic Scoring of Preference (LSP) method [22] is used. The r th average power is defined as follows:

$$M_n^{[r]}(\underline{a}, \underline{w}) = \left(\sum_{i=1}^n a_i^r w_i \right)^{\frac{1}{r}}$$

where $w_i \in [0,1]$ y $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ and r can be selected to achieve desired logical properties. For determining each feature and sub-features weights AHP method [18] is used.

4.4. Recommendation

For the calculation of the similarity measures the following expression is used:

$$s_j = s(P_e, a_j) = OAG(V_{sim}(P_e, a_j)) \quad (7)$$

Where

$$V_{sim}(P_e, a_j) = \{sim(p_1^e, v_1^j), \dots, sim(p_k^e, v_k^j), \dots, sim(p_j^e, v_j^j)\}$$

is a vector containing the similarity of all user profile attributes regarding the description of the college degree a_j .

The similarity measure can be obtained from a distance measurement, if $d(x, y) \in [0, max]$ then [23] :

$$sim(p_k^e, v_k^j) = 1 - \frac{d(p_k^e, v_k^j)}{max} \quad (8)$$

In case of ordered lists, such as characterology, interest and professional competencies, Kendal Tau distance is used [24, 25].

4.5. Recommending

In this activity, a set of college degrees that match with the students profiles is suggested. After calculating the similarity between the student profile and each college degree profile in the database each college degree is ordered and is represented with the following similarity vector:

$$S = (s_1, \dots, s_n) \quad (9)$$

The best are those that best meet the needs of the student profile (greater similarity).

5. Case study

To show the applicability of the model, a case study at the University of Guayaquil is developed. College degree ideal profiles was acquired from experts taking into account features and sub-features as it is shown in Table 1.

Ideal college degree profiles are obtained in a group of college degree in Health and Information Sciences (Table 2). They are composed by numerical scores (skills, emotional intelligence) and ordered lists (interests, professional competencies, characterology) information.

Table 1.
Features included in the student profile

Feature s	Interests	Skills	Professional competencie s	Character ology	Emotional intelligence
Sub-feature s		Verbal			Intrapersona l
		Abstrac t			Interpersona l
					Adaptability
		Logic			Stress management
					General mood

Source: The authors.

Table 2.
Ideal college degree profile

College degree	SKILLS			INTERESTS	PROFESSIONAL COMPETENCIES	CHARACTEROLOGY		EMOTIONAL INTELLIGENCE					
	VERBAL	ABSTRAC	LOGIC					INTRAPERS ONAL	INTERPERSONAL	ADAPTABILITY	STRESS MANAGEMENT	GENERAL MOOD	
Bibliotecología y Archivología	60	53	40	G C L	D A O	PHLEGOMATIC	SANGUINE	90	86	100	116	110	
Odontología	60	60	60	A F E	I B O	PASSIONATE	SANGUINE	99	90	90	95	116	
Obstetricia	53	53	47	A G C	B F O	PASSIONATE	SANGUINE	99	90	90	116	116	
Enfermería	53	53	47	A N C	B M O	PASSIONATE	SANGUINE	99	90	99	116	116	

Source: The authors.

Table 3.
Student profile

SKILLS			INTERESTS	PROFESSIONAL COMPETENCIES	CHARACTEROLOGY			EMOTIONAL INTELLIGENCE				
VERBAL	ABSTRAC	LOGIC						INTRAPERSONAL	INTERPERSONAL	ADAPTABILITY	STRESS MANAGEMENT	GENERAL MOOD
33	47	20	A I B I B F		PASSIONATE	PHLEGOMATIC	AMORPHOUS	110	98	112	114	109

Source: The authors.

Table 4.

Features	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	Weights
Skills (c_1)	1	1/8	1/8	6	1/8	0,0408
Interest (c_2)	8	1	9	6	1/8	0,3012
Professional competencies (c_3)	8	1/9	1	6	1	0,1543
Characterology (c_4)	1/6	1/6	1/6	1	1/7	0,0238
Emotional intelligence(c_5)	8	8	1	7	1	0,48

Source: The authors.

Feature weights calculation

In the case of interest A, B, C, E, F, G, I, L and N correspond to Science Professionals (health areas), Technology sub-professional (engineering areas), Consumer Economics (business), Job Office (commerce and secretarial), Professional Art (design, general arts), Professional Social Service (related to providing services and care areas), sub-professional technologies (technologies, technical), Communication (use of language as part of the job) and Social Service sub-professionals (personal care) respectively.

In the case of professional skills A, B, D, F, I, M and O correspond to Politics and Law (jurisprudence), Biomedical (medical sciences), Education (educational sciences), Biotechnology (chemical sciences) Oral health (dentistry), Communication and Service (media) and Psychosocial Health (psychology) respectively.

Later, the psychologist obtained a student profile which is shown in Table 3, based on observation and psychological tests.

Using the AHP method the following weights structure

(Table 4) was obtained. These are translated into weight vector associated with the features $V = (0.0408, 0.3012, 0.1543, 0.0238, 0.48)$. In this case, equal weight to the sub-attributes are set.

Then, the aggregation structure is obtained (Fig. 2). Aggregation operators that reflect simultaneity as established LSP [26, 27] were used.

These operators reflect specific requirements and logic conditions, such as simultaneity and replaceability.

Then, the aggregation structure is obtained (Fig. 2). Aggregation operators that reflect simultaneity as established LSP [26, 27] were used.

These operators reflect specific requirements and logic conditions, such as simultaneity and replaceability.

Inputs	Operators	Block ID	Operator	Block ID
Verbal	0,33	C-	Skills	0,0408
Abstract	0,33			
Logic	0,33			
Interest		C-	Professional competencies	0,3012
Professional competencies				
Characterology				
Intrapersonal	0,20	C-	Emotional intelligence	0,48
interpersonal	0,20			
Adaptability	0,20			
Stress management	0,20			
General mood	0,20			

Figure 2. Components of the similarity calculation aggregation structure
Source: The authors.

Table 5.

Similarity between the ideal college degree and the student's profiles.

Bibliotecología y Archivología (a_1)	Odontología (a_2)	Obstetricia (a_3)	Enfermería (a_4)
0,651	0,877	0,815	0,822

Source: The authors.

The similarity of the ideal profile to different college degrees gives the following result.

In the phase of recommendation, those college degrees that come closest to student profile will be recommended. An ordering based on this comparison is:

$$\{a_2, a_4, a_3, a_1\}$$

If the system recommend the three college degrees more similar to the student profile, they would be the following: Odontology, Nursery and Obstetrics; which coincide with the actual recommendations given by the department of student welfare.

6. Conclusions

Despite the impact along life of deciding what career to pursue, shortcomings persist in treating recommendation process of college degrees. This paper presents a model for recommendation of college degrees following the content-based approach. It is based on the psychological student profiling and the database of ideal college degree profiles.

The AHP method allows a correct weighting of different factors involved. Additionally, the LSP method of aggregation operators permits to reflect simultaneity and replaceability in the process. The previous elements and the inclusion of the psychological profiling of students allows to reach a more reliable recommendation.

Future work will be related to the inclusion of context information in the model creation of the database from multiple experts, as well as obtaining the weights of the features using group assessments. Other areas of future work will be related to the management of heterogeneous information and the development of a software tool.

References

- [1] Rana, S., Dey, P.K. and Ghosh, D., Best engineering college selection through fuzzy multi-criteria decision making approach: a case study. *UNIASCIT Journal*, 2(2), pp. 246-256. 2012.
- [2] Leiva, J.L., et al., Realidad aumentada y sistemas de recomendación grupales: Una nueva perspectiva en sistemas de destinos turísticos. *Estudios y perspectivas en turismo*, 23(1), pp. 40-59. 2014.
- [3] Castellano, E.J. and Martínez-Orieb, L., A Crs for academic orientation using qualitative assessments. in *e-Learning*, 2008.
- [4] Castellano, E.J., Martínez, L. y Barranco, M., Recomendación de perfiles académicos mediante algoritmos colaborativos basados en el expediente. in *IADIS Ibero-Americana*, 2007.
- [5] Denley, T., Degree compass: A course recommendation system. *Educause Review Online*, 2013.
- [6] Bendakir, N. and Aïmeur, E., Using association rules for course recommendation. in *Proceedings of the AAAI Workshop on Educational Data Mining*, 2006.
- [7] Lin, C.F., et al., Data mining for providing a personalized learning path in creativity: An application of decision trees. *Computers & Education*, 68, pp. 199-210. 2013. DOI:10.1016/J.COMPEDU.2013.05.009
- [8] Whitten, L. and Sanders, A., Data-mining and predicting academic success: A recommendation system for college students. *Educational Technology*, 53(4), pp. 40-42, 2013.
- [9] Wang, X. and Yeung, D., Using fuzzy integral to modeling case based reasoning with feature interaction. in *Systems, Man, and Cybernetics, 2000 IEEE International Conference on*. IEEE. 2000. DOI:10.1109/ICSMC.2000.886578
- [10] Yager, R.R., Soft aggregation methods in case based reasoning. *Applied Intelligence*, 21(3), pp. 277-288. 2004. DOI:10.1023/B:APIN.0000043560.57137.20
- [11] Beliakov, G., Calvo, T. and James, S., Aggregation of preferences in recommender systems, in *Recommender systems handbook* Springer. pp. 705-734. 2011. DOI:10.1007/978-0-387-85820-3_22
- [12] Carrillo, G. y Ochoa, X., Recomendación de objetos de aprendizaje basada en el perfil del usuario y la información de atención contextualizada, en: *LACLO 2013-Octava Conferencia Latinoamericana de Objetos y Tecnologías de Aprendizaje*. 2013.
- [13] Hatch, K., Dragičević, S. and Dujmović, J., Logic scoring of preference and spatial multicriteria evaluation for urban residential land use analysis, in *Geographic Information Science*. Springer. pp. 64-80. 2014. DOI:10.1007/978-3-319-11593-1_5
- [14] Jannach, D., Tutorial: Recommender systems, in *International Joint Conference on Artificial Intelligence Beijing*, August 4, 2013.
- [15] Córdón, L.G.P., Modelos de recomendación con falta de información. *Aplicaciones al sector turístico*, Universidad de Jaén. 2008
- [16] Denley, T., Austin Peay State University: Degree Compass. *Educause Review* [Online]. Available at: <http://www.educause.edu/ero/article/austin-peay-state-university-degree-compass>, 2012.
- [17] Nunes, M.A.S.N. and Cerri, S.A., Recommender systems based on human psychological reputation. in *Recommenders' 06. com-The Present and Future of Recommender Systems*. MyStrands. 2006.
- [18] Saaty, T.L., What is the analytic hierarchy process?, in *Mathematical models for decision support*. Springer. pp. 109-121. 1988. DOI:10.1007/978-3-642-83555-1_5
- [19] Aguarón, J., Escobar, M.T. and Moreno-Jiménez, J.M., The precise consistency consensus matrix in a local AHP-group decision making context. *Annals of Operations Research*, pp. 1-15. 2014. DOI:10.1007/s10479-014-1576-8
- [20] Xu, Z., On consistency of the weighted geometric mean complex judgement matrix in AHP. *European Journal of Operational Research*, 126(3), pp. 683-687. 2000. DOI:10.1016/S0377-2217(99)00082-X
- [21] Nunes, M.A.S., Cerri, S.A. and Blanc, N., Towards user psychological profile. in *Proceedings of the VIII Brazilian Symposium on Human Factors in Computing Systems*. Sociedade Brasileira de Computação. 2008.
- [22] Pérez-Teruel, K., Leyva-Vázquez, M. and Estrada-Sentí, V., Mental models consensus process using fuzzy cognitive maps and computing with words. *Ingeniería y Universidad*, 19, pp. 173-188. 2015. DOI:10.1007/s10479-014-1576-8
- [23] Bonillo, M.L., Razonamiento basado en casos aplicado a problemas de clasificación. Tesis de grado. Universidad de Granada, España, 2003.
- [24] Ha, V. and Haddawy, P., Similarity of personal preferences: Theoretical foundations and empirical analysis. *Artificial Intelligence*, 146(2), pp. 149-173. 2003. DOI:10.1016/S0004-3702(03)00013-4
- [25] Knight, W.R., A computer method for calculating Kendall's tau with ungrouped data. *Journal of the American Statistical Association*, 61(314), pp. 436-439. 1966. DOI:10.1080/01621459.1966.10480879
- [26] Tapia-Rosero, A., et al., Fusion of preferences from different perspectives in a decision-making context. *Information Fusion*, 2016.29: pp. 120-131. DOI:10.1016/J.INFFUS.2015.07.006
- [27] Dujmović, J.J. and Nagashima, H., LSP method and its use for evaluation of Java IDEs. *International journal of approximate reasoning*, 41(1), pp. 3-22. 2006. DOI:10.1016/J.IJAR.2005.06.006

M.R. Maridueña-Arroyave, es Dr. (Ph.D.) en Ciencias Pedagógicas, Candidato a Dr. (Ph.D.) en Ciencias Informáticas, MSc. en Docencia Universitaria e Investigación Educativa, Candidato a MSc. en Investigación

Matemática, Ingeniero en Computación. Profesor con 18 años de experiencia docente universitaria en carreras de Ingeniería en Sistemas Computacionales, Informática y Networking. Actualmente Director de Investigaciones y Proyectos Académicos - DIPA de la Universidad de Guayaquil, Ecuador.
ORCID: 0000-0002-8876-1896

A. Febles-Estrada, es Lic. en Ciencias de la Computación de la Universidad de La Habana, Cuba. Dra. en Ciencias Técnicas (Ph.D.) del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. Profesora de la Universidad de las Ciencias Informáticas, La Habana, Cuba.
ORCID: 0000-0002-9678-2230



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería
de Sistemas e Informática

Oferta de Posgrados

Especialización en Sistemas
Especialización en Mercados de Energía
Maestría en Ingeniería - Ingeniería de Sistemas
Doctorado en Ingeniería- Sistema e Informática

Mayor información:

E-mail: acsei_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 5365

Evaluation of financial management using latent variables in stochastic frontier analysis

Marisol Valencia-Cárdenas^a & Jorge Anibal Restrepo-Morales^b

^a Institución Universitaria Tecnológico de Antioquia, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. mvalencia@unal.edu.co

^b Institución Universitaria Tecnológico de Antioquia, Fundación Universitaria Autónoma de las Américas, Medellín, Colombia. gifatdea@gmail.com

Received: December 11th, 2015. Received in revised form: August 12th, 2016. Accepted: Agosto 20th, 2016

Abstract

It is impossible to ascertain the quality of business Management through traditional financial indicators; these alone do not accurately infer about business states in such important aspects as the efficiency of business management. The concept of quality management is very abstract and such quantification underlies latent aspects of areas with no measure, within a structural financial classification. The process proposed in this paper, permits to identify, characterize and determine associations between areas related to the indicators of the CAMEL model (C, Capital Adequacy, A, Assets Quality, M, Management, E, Earnings, L, Liquidity) as latent variables, estimated from a Multivariate Data Analysis technique, the CFA. Using this result, it is estimated a Stochastic Frontier Analysis (SFA), and a model of Data Envelopment Analysis (DEA), whose comparison, analysis and contrast, permits the evaluation of the quality of the management of a Colombian financial sector.

Keywords: Financial Analysis, Latent Variables, Factor Analysis, Stochastic Frontier Analysis

Evaluación de la gestión financiera usando variables latentes en modelos estocásticos de fronteras eficientes

Resumen

No es factible dimensionar la calidad del Management empresarial por medio de los indicadores tradicionales financieros, éstos, por sí solos no permiten inferir con precisión acerca de los estados empresariales, en aspectos tan importantes como la eficiencia de la gestión empresarial. El concepto de calidad del management, es muy abstracto y en su cuantificación subyacen aspectos de áreas latentes, pero no medidas, dentro de una clasificación financiera estructural. El proceso propuesto en este trabajo, permite identificar, caracterizar y determinar asociaciones entre áreas acordes con los indicadores del modelo CAMEL, (C, Capital Adequacy; A, Assets Quality; M, Management; E, Earnings; L, Liquidity), como variables latentes, estimadas a partir de una técnica del Análisis Multivariado de Datos, conocida como Análisis del Factor Confirmatorio. Con dicho resultado se realiza la estimación de un Modelo Estocástico de Fronteras Eficientes (SFA), y un modelo de Análisis de Datos Envoltente (DEA), cuya comparación, análisis y contraste permiten evaluar la calidad del Management de un sector financiero colombiano.

Palabras clave: Análisis Financiero, Variables Latentes, Análisis del Factor, Modelos Estocásticos de Fronteras Eficientes.

1. Introducción

Existen algunos ratios financieros, que permiten describir un estado de gestión financiero, como el indicador de rotación: Ingresos/Activos, que refleja aproximadamente la eficiencia empresarial, pero sin tomar en cuenta otras variables que en

conjunto son importantes para la toma de decisiones. En este sentido, el análisis centrado en los indicadores, algunas veces puede llevar a conclusiones erradas sobre el verdadero comportamiento de la empresa, porque son medidas puntuales y determinísticas que no permiten inferir, por ejemplo, sobre tendencias, por sí solos, o incluso, sobre estados relativos de las empresas en comparación con otras de su misma naturaleza.

How to cite: Valencia-Cárdenas, M. & Restrepo-Morales, J. A. Evaluación de la gestión financiera usando variables latentes en modelos estocásticos de fronteras eficientes DYNA 83 (199) pp. 35-40, 2016

En este orden de ideas, los modelos Estocásticos de Fronteras Eficientes (Stochastic Frontier Analysis-SFA), pueden mejorar el análisis financiero [1–3]. Esta es una técnica econométrica basada en la estimación de máxima verosimilitud para encontrar una función de producción; la eficiencia se mide usando los residuales de la ecuación estimada y el error se divide en dos componentes: el término del error aleatorio y el error sistemático de la ineficiencia [4].

La propuesta para este artículo inicia con la cuantificación de variables latentes, que no se pueden medir de forma directa, pero que es factible valorar usando variables medibles, cuantitativas, que se relacionen con su definición. Para la estimación de las variables latentes, se propone usar la clasificación del modelo CAMEL: C, Capital Adequacy; A, Assets Quality; M, Management; E, Earnings; L, Liquidity; así, cada categoría se asume como una variable latente, y se estiman sus valores, usando una técnica del Análisis Multivariante [5,6]: Análisis de Ecuaciones Estructurales (SEM), que comprende el Análisis del Factor Confirmatorio (CFA). SEM es una técnica útil para identificar asociaciones estadísticas importantes entre las variables observables y las latentes [6,7] que no son observadas directamente. Con lo anterior, se utiliza el output ‘Management’ para estimar la eficiencia financiera; usando un modelo de fronteras estocásticas (SFA) [1,4,8], cuyos inputs son los demás factores latentes del modelo CAMEL. Sus resultados se comparan con los del modelo DEA, con el mismo output que el utilizado para el SFA; por medios gráficos y de la clasificación clúster para las empresas.

2. Metodología

La base informativa está conformada por un conjunto de 109 empresas del sector financiero colombiano, obtenida de la base de datos Benchmark, que proporciona variables financieras por empresa, como las ventas, activos, rentabilidad, con las cuales se pueden construir indicadores como $ROA = \text{Utilidad}/\text{Activos}$, etc. Luego de un análisis descriptivo y de eliminar puntos extremos para los indicadores como el ROA, se encuentran 4 empresas con valores inusuales, y se deja una base de 105 empresas. El proceso propuesto se resume en la Fig. 1.

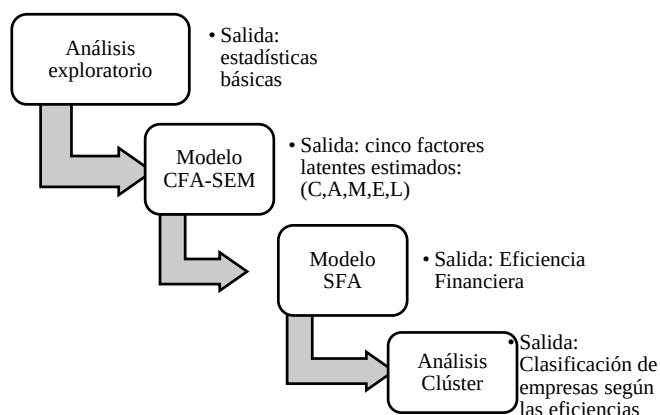


Figura 1. Proceso desarrollado en este trabajo.
Fuente: Los autores

Para todo el análisis se recurre a 48 variables asociadas con la gestión financiera, con las cuales se obtienen también indicadores, tales como: Ingresos/Activos, Utilidad/Activos, Ingresos/Patrimonio, Crecimiento de ingresos, de ventas, Rentabilidades, entre otras.

El paso siguiente es elaborar un diagrama causal sobre las relaciones entre las variables observables cuantitativas, derivadas de la base de datos, y las variables latentes, en este caso, dada la relevancia frente al tema de gestión financiera y sus campos de aplicación, corresponden a las cinco que conforman el modelo CAMEL: Capital Assets, Management, Earnings y Liquidity; con lo cual, se establece la estructura multivariada que permite estimar dichos factores latentes, usando la técnica de SEM. En este proceso, el Análisis del Factor Confirmatorio (CFA), estima los indicadores usando las variables observables, y seguido a esto, se relacionan usando análisis de Regresión, que permite realizar una interpretación de la significancia entre las variables y determinar así, cuáles tienen mayor asociación estadística. De éstos indicadores, la variable latente ‘Management’ es empleada para realizar una clasificación Clúster, que permite diferenciar empresas según la calidad financiera medida, y a su vez, se usa como respuesta para calcular la eficiencia con el modelo SFA.

Dicha eficiencia se utiliza como insumo de un segundo análisis de clúster [9], donde se agrupan las variables de acuerdo con sus similitudes. Se comparan ambas clasificaciones con el fin de determinar la adecuada segmentación.

2.1. Modelo Camel

Una de las formas de realizar una medición del riesgo de una organización y utilizar dicha medida como proxy de la calidad de la gestión empresarial, es recurrir a la definición del denominado índice CAMEL: C, Capital Adequacy; A, Assets Quality; M, Management; E, Earnings; L, Liquidity. Este modelo es útil en la identificación de crisis financieras o fragilidad, especialmente en bancos [10], cuyo origen es producto de fallas en la gestión de los factores microeconómicos que afectan la organización. Una clasificación CAMEL, entre los valores 3 y 5, considera la organización en problemas o con alto riesgo de quiebra. Los modelos son importantes para monitorear estados financieros y evitar crisis financieras, en especial en el sector bancario [10,11]. Dentro de los principales indicadores del modelo CAMEL se encuentran ratios relativos a los procesos de entradas y salidas en estados financieros, los que se consideran en este trabajo: Crecimientos en diversos indicadores como Activos, ventas, utilidades y patrimonio; rentabilidades, e indicadores de eficiencia tradicional como Ingresos/Activos, Utilidades/Activos, Ingresos/Costos, como lo proponen los autores citados.

2.2. Análisis Clúster

Con esta técnica se calculan las distancias [9,12] entre observaciones: la euclidiana o la de Manhattan. Las euclidianas son la raíz de la suma de cuadrados de diferencias entre puntos, la de Manhattan es la suma de diferencias absolutas, con respecto a unas componentes o vectores

elegidos de los datos (medoids). El método pam tiene una función objetivo que es minimizar la suma de las dissimilaridades [9]. En el proceso se renueva la cantidad de elementos por clúster elegido (k), estos se recalculan acorde con el algoritmo, quedando al final una cantidad (n_i) de elementos por cada grupo. Elige además un vector en los datos, por clúster que es el referente para estimar las distancias (medoid).

2.3. Análisis de Ecuaciones Estructurales

La técnica de Análisis del Factor Confirmatorio hace parte de los Modelos de Ecuaciones Estructurales (SEM) [6], útil para reducir dimensionalidad en un conjunto de variables, y que permite ajustar dicho conjunto explicando cierto porcentaje de variabilidad conjunto (CFI). Los componentes de estos modelos SEM se resumen así:

- Variables latentes: endógenas η , exógenas ξ
- Variables observadas: endógenas Y , exógenas X .
- Coeficiente de regresión: λ , que relaciona las variables latentes con los indicadores.
- Coeficientes de regresión γ , β , ϕ que relacionan las variables latentes entre sí, y las variables observadas entre sí.

Los modelos de Ecuaciones Estructurales (Structural Equation Modeling-SEM) son una familia de modelos estadísticos multivariantes que permiten estimar efectos entre variables observables sobre factores latentes, usando la matriz de covarianzas o de correlaciones [6] y análisis de regresión multivariable.

Estos modelos se basan en estructuras gráficas denominadas diagramas causales. Los diagramas representan una posible estructura de asociación entre variables cuantitativas, de forma multivariante. Las variables observables se representan en rectángulos, y las no medibles o latentes, en círculos o elipses (ver ejemplo en Fig.2).

Las flechas muestran cómo una variable puede ser afectada por otras si la flecha es hacia ella, o puede afectar a otras si la flecha va en otra dirección a ésta. Cuando no se traza tal línea, no se visualiza relación alguna. Algunas de las variables latentes se podrían afectar unas a otras. Las flechas bidireccionales involucran covarianzas entre dos variables.

Estos diagramas facilitan la previzualización de la posible asociación de un modelo multivariante, entre las variables observables y las latentes.

En estos modelos SEM, se consideran en primer lugar, hipótesis de los investigadores para crear dichas asociaciones, y es posible extraer los valores de factores estimados de Management

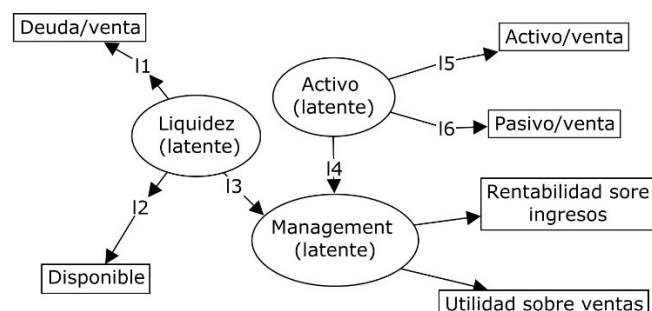


Figura 2. Ejemplo de modelo SEM.

Fuente: Los autores

para posteriores estadísticas, como en este caso, el modelo DEA y el modelo SFA.

2.3. Modelos de Fronteras Eficientes

El modelo (DEA), puede definirse como un método que permite estimar las mejores fronteras prácticas de producción y evaluar la eficiencia relativa de diferentes entidades (García, 2009). Pero por su naturaleza determinística, el DEA puede no capturar adecuadamente la medida de dicha eficiencia, por ello, surgen los Modelos Estocásticos de Fronteras Eficientes cuya ecuación general de un está dada por (1):

$$\ln(y) = \beta \ln(X) + v - \mu \quad (1)$$

El interés principal es estimar β, σ^2, λ y con estos, encontrar μ . La estimación se basa en máxima verosimilitud, y es desarrollada en [1].

3. Resultados

3.1. Análisis descriptivo

La base de datos financiera posee en total 109 empresas. Se estiman estadísticas generales, como media, desviación estándar, asimetría, curtosis, entre otras para los ratios como: Ingresos/Activos, Disponible/gasto, entre otros. Se detectan outliers, usando el criterio de puntos extremos izquierda: $x < Q1 - 3 * RIQ$, derecha: $x > Q3 + 3 * RIQ$, RIQ es el Rango Intercuartil ($Q3 - Q1$). Luego de depurar la base de datos, queda finalmente con 105 empresas. La estimación del modelo SEM produce los resultados vistos en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultado de la estimación del modelo SEM en R.

Number of observations	105			
P-value (Chi-square)	0,058*			
P-value	0,000*			
Comparative Fit Index (CFI)	0,955**			
Root Mean Square Error of Aproximation (RMSEA)	0,086***			
	Estimate	Std.err	Z-value	P(> z)
Latent variables:				
Capital =~				
Crecim.dl.Ptr	1			
Assets =~				
Crecim.dl.Actv	1			
Management =~				
Rentab.sob.Ing	1			
Cre2	0,009	0,256	0,037	0,971
Earnings =~				
ROA..	1			
ROE..	1,966	0,222	8,842	0
Liquidity =~				
Dispo/Gasto	1			
Regressions:				
Capital ~				
Assets	0,395	0,095	4,148	0
Management ~				
Assets	-0,064	0,069	-0,932	0,351
Earnings	2,45	0,33	7,433	0

Fuente: Los autores

En las líneas 2 a 5 de la Tabla 1, se muestran los índices que miden qué tan adecuado es el modelo. La estructura de covarianza estimada significativa (P-value (Chi-square) $\sim 0.058^*$), y la línea de base del modelo también (P-value 0^*). Además, la explicación de variabilidad del modelo de CFA es del 95.5% (CFI**) y la desviación del error es de 0.086 (RMSEA***), la cual es muy baja y adecuada. Con esto se afirma que la asociación encontrada entre latentes y observadas, explica de forma adecuada el conjunto completo de datos.

La estructura del modelo, que tiene una asociación significativa, permite ver cómo son los efectos de las covariables en las regresiones estimadas entre Capital con Activos y Management con activos y ganancias. Así, con el análisis CFA, se estiman los valores por cada una de las empresas, para las variables latentes: Capital, Assets, Management, Earnings y Liquidity, para ser usadas en el posterior análisis de SFA. En la Tabla 1 se analizan las significancias y los efectos encontrados

Tabla 2.
Resumen de efectos de las asociaciones CFA con variables latentes.

Variable latente	Posit	Negat	Interpretación
Análisis del Factor Confirmatorio			
Capital	Crec.Patrim	NO	Se puede observar la positiva influencia de la rentabilidad sobre ingresos, en el Management, así como la razón del crecimiento en utilidades vs el de activos, en el CFA.
Assets	Crec.en Acti		
Management	*Rent.Ingre		
	*Crec.		
Earnings	Util/Crec.Act		
	ROA:		Los activos, explicados por el crecimiento en activos. Las ganancias, representadas por índices de rentabilidades: ROA, utilidad sobre activos y ROE: Utilidad sobre patrimonio, tienen una asociación importante con el management medido.
Liquidity	Util/Activ		
	ROE:Util/Patr		
	Dispo/Gasto		
Regresiones			
Capital	Assets		Existe relación significativa de los Activos sobre el Capital. Es importante notar que las demás variables contempladas en el modelo CAMEL no resultan significativas o identificables en el modelo SEM, esto encuentra asidero conceptual debido a que una variable puede explicar de forma suficiente una respuesta, y no todas son necesarias.
Management	Ganancias	Activos	
			El efecto positivo de las ganancias se ve reflejado en el aumento de los índices de Management. Por el contrario, los activos tienen efecto negativo, lo cual es de esperar por la influencia del índice ROA sobre las ganancias.

Fuente: Los autores

por variable latente, mostrando las que son significativas si su valor p es menor del 5%, sin embargo, si los índices de ajuste generales del modelo son adecuados, no hay razones para descartar variables que puedan dar un efecto pequeño en el modelo, o cuya significancia no se refleje, pero, ayudan a identificar un buen resultado conjunto. En la Tabla 2 se interpretan los efectos encontrados.

De los modelos de regresión, se prueban dos hipótesis para el modelo CAMEL: las ganancias (Earnings) hacen incrementar el Management, pero los activos lo disminuyen, y todo el modelo en conjunto es significativo al 10%. La salida principal de dicho proceso es el Management, respuesta que es usada para estimar un modelo estocástico de fronteras eficientes (SFA), a continuación.

3.2. Análisis de Fronteras Eficientes

El modelo SFA analizado contempla las variables explicativas: Ganancias (Earnings) y Liquidez (Liquidity). Variable respuesta: Management. Los resultados de la estimación se ven en la Tabla 3.

En la Tabla 3 puede observarse que las variables Ganancias (Earnings) y Liquidez (Liquidity) son adecuadas, para explicar el Management, siendo el efecto de ganancias el más alto, aunque tenga un error estándar más alto que la liquidez. Con esto se estiman las eficiencias financieras, que servirán para clasificar el estado de las empresas evaluadas en la muestra.

3.3. Modelos de eficiencia DEA y SFA

La Fig. 3 muestra el comparativo de los valores de eficiencia estimados con los modelos de Datos Envoltentes (DEA) y de fronteras estocásticas (SFA).

Si bien aparentan menores los valores de eficiencia del Modelo DEA, la escala de valores del SFA es también baja, y su varianza no es tan alta como la primera. Sin embargo, hay empresas que aparentan coincidir en los picos de más alta eficiencia entre ambos modelos. Esto refleja que la elección de variables observables fue adecuada para la representación del Management, y por lo tanto, de la eficiencia medida. Todo esto, para determinar que el nivel general de eficiencia financiera no es muy adecuado y el sector debe entonces, encontrar estrategias de mejoramiento para el incremento de sus utilidades. Lo anterior se corrobora con el siguiente Análisis Clúster.

Tabla 3.
Resultado de la estimación del modelo SFA, en R

Coef	Parameters	Std, err	t-value	Pr(> t)
(Intercept)	1,2762	0,2531	5,042	0
Earnings	3,5894	2,6718	1,343	0,182
Liquididy	0,3777	0,1946	1,941	0,055
lambda	1,2229	0,2834	4,316	0
sigma2	4,7201			
sigma2v	1,891524	sigma2u	2,829	
log likelihood	-204,345			
Convergence	1			

Fuente: los autores

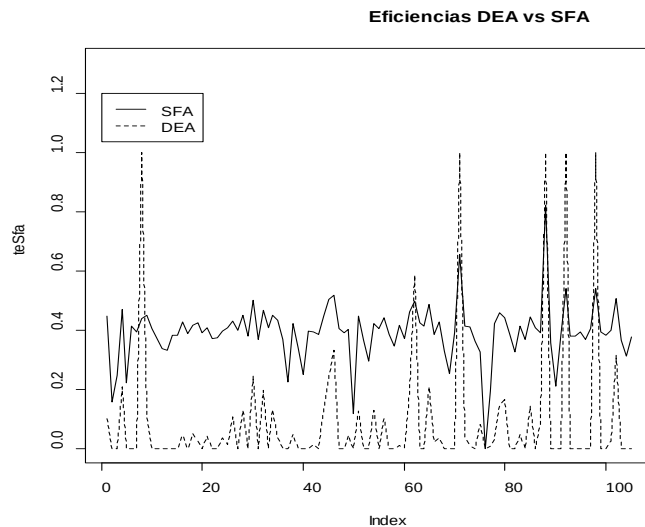


Figura 3. Resultado de la estimación del modelo SFA, en R
Fuente: Los autores

Tabla 4
Medias por Clúster de diferentes indicadores, con eficiencias del DEA y SFA

Clus	Cate.	Efic. Sfa	Efic. Dea	Rent.sob. Ingresos	% Empr
4	Bajo	0,00042	-	-130.661	0,95
2	Medio bajo	0,22171	-	0,00145	7,62
1	Medio	0,38641	0,0265	0,07921	68,57
3	Medio alto	0,47267	0,3001	0,1868	21,91
5	Alto	0,82145	100.000	104.547	0,95
Prom		0,39322	0,0934	0,09286	

Fuente: los autores.

3.4. Análisis de Clúster

Con la eficiencia estimada con el modelo SFA, se clasifican las empresas, usando análisis Clúster. Al comparar los grupos con los del Management, se observan muchas similitudes en ambos casos, y por ello, se muestra la clasificación final basada en la eficiencia de SFA, que se presenta en la Tabla 4. En la última columna se presenta el porcentaje de empresas por grupo.

La clasificación tiene una clara diferenciación de los grupos empresariales, que van en niveles de bajo a alto en relación a la eficiencia estimada, con similitudes en los niveles promedio de los dos tipos de eficiencia mostrados: SFA y DEA. Estos niveles muestran una relación directa con las rentabilidades, activos, ROE y ROA, los crecimientos en activos, entre otras (Tabla 1 de asociaciones). Es claro además que la mayoría de las empresas no se encuentran en niveles bajo o alto, muchas se agrupan en nivel medio (68.5%) indicando que hay una alta probabilidad de requerir mejoramientos de eficiencia para el sector.

4. Discusión

La clasificación empresarial realizada permite evaluar la calidad de la eficiencia medida, al agrupar las empresas en

una escala ordinal, y comparar con otros indicadores como rentabilidad sobre ingresos. Para lograr dicho resultado, previamente se encontró una adecuada asociación entre variables observables, entre estas, activos, ganancias, capital. La definición teórica del modelo CAMEL facilita la aplicación y asociación mediante los modelos de Análisis del Factor Confirmatorio (CFA) y de Análisis de Ecuaciones Estructurales (SEM), como una herramienta para que quienes se encuentren interesados, evalúen la calidad de la gestión empresarial, no obstante, se evidencia que no siempre será necesario usar todas las variables para un sólo modelo, en otras palabras, pueden existir variables redundantes para explicar la eficiencia empresarial. Este resultado permite a una empresa usar una base de datos observados para encontrar respuesta a diferentes hipótesis que conduzcan al desarrollo de posibles estrategias de mejoramiento de su gestión financiera.

5. Conclusiones

Usando el análisis de ecuaciones estructurales, se obtiene una adecuada asociación de las variables del modelo Camel: crecimiento en activos y utilidades, pero también, de la rentabilidad sobre ingresos, para la respuesta *Management*, permitiendo una clasificación de las empresas usando análisis clúster. De los modelos de regresión, se prueban dos hipótesis para el modelo CAMEL: *las ganancias* (Earnings) hacen incrementar el Management, *pero los activos lo disminuyen, y todo el modelo en conjunto es significativo al 10%*. Lo anterior, corrobora la teoría económica de la racionalidad financiera sustentaba en el concepto de eficiencia, que promulga obtener más con menos. Se deduce que las variables crecimiento en Activos, Patrimonio y Utilidades son las más importantes para la determinación de la calidad del Management con variables latentes. La eficiencia encontrada, logra clasificar las empresas en grupos claramente diferenciados, permitiendo diagnósticos convenientes sobre la gestión financiera.

Referencias

- [1] Bogetoft, P. and Otto, L., Benchmarking with DEA, SFA, and R. New York. Springer; 2010. DOI: 10.1007/978-1-4419-7961-2
- [2] Cullinane, K., Wang, T.F., Song, D.W. and Ji, P., The technical efficiency of container ports: Comparing data envelopment analysis and stochastic frontier analysis. *Transportation Research Part A: Policy Pract.* 40(4), pp. 354-374, 2006. DOI: 10.1016/j.tra.2005.07.003
- [3] Coelli, A.T., Henningsen, A. and Henningsen, MA., Package 'frontier' 2013.
- [4] Greene, W., Distinguishing between heterogeneity and inefficiency: stochastic frontier analysis of the World Health Organization's panel data on national health care systems. *Health economics.* 13(10), pp. 959-980, 2004. DOI: 10.1002/hec.938
- [5] Härdle, W. and Simar, L., *Applied multivariate statistical analysis.* New York. Springer, 2007. DOI: 10.1007/978-3-540-72244-1
- [6] Rosseel, Y., lavaan: An R package for structural equation modeling. *Journal of Statistical Software.* 48(2), pp. 1-36, 2012. DOI: 10.18637/jss.v048.i0.
- [7] Riedl, D.F., Kaufmann, L., Zimmermann, C. and Perols, J.L., Reducing uncertainty in supplier selection decisions: Antecedents and outcomes of procedural rationality. *Journal of Operations Management.* 31(1-2), pp. 24-36, 2013. DOI: 10.1016/j.jom.2012.10.003

- [8] Kraft, E. and Tirtiroğlu, D., Bank efficiency in Croatia: A stochastic-frontier analysis. *Journal of Comparative Economics*, 26(2). pp. 282-300, 1998. DOI: 10.1006/jcec.1998.1517
- [9] Kaufman, L. and Rousseeuw, P.J., Finding groups in data: An introduction to cluster analysis. Vol. 344. John Wiley and Sons, 2009.
- [10] Serra, C. y Zúñiga, Z., Identificando bancos en problemas. ¿Cómo debe medir la autoridad bancaria la fragilidad financiera? [en línea], *Estudios Económicos*. Banco Central de Reserva del Perú. pp. 1-2. 2002. [consulta, junio de 2015]. Disponible en: <http://www.bcrp.gob.pe/docs/Publicaciones/Documentos-de-Trabajo/2002/Documento-Trabajo-04-2002.pdf>
- [11] Gómez-González, J.E. y Orozco-Hinojosa, I.P., Un modelo de alerta temprana para el sistema financiero colombiano. *Borradores Economía*, Banco la República, 62(565), pp. 123-147, 2009.
- [12] López-Bazo, E., Definición de la metodología de detección e identificación de clusters industriales en España. Dirección General de la Pequeña y Mediana Empresa, (DGPYME), Madrid, 2006.

M. Valencia-Cárdenas, es Ing.Industrial, Esp. en Estadística, MSc. en Ciencias-Estadística. PhD en Ingeniería-Industria y organizaciones de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Docente de Institución Universitaria Tecnológico de Antioquia. Áreas de interés: métodos estadísticos, optimización con aplicaciones a la industria.
ORDIC: 0000-0003-3135-3012

J Restrepo-Morales, es Ing. Administrador; Universidad Nacional de Colombia. MSc. en Administración; Universidad EAFIT. PhD. Internacionalización de la Empresa de la Universidad San Pablo CEU – Madrid, España. Docente titular de la Institución Universitaria Tecnológico de Antioquia. Diploma de Estudios Avanzados de la Universidad San Pablo CEU y Tecnólogo en Sistematización de Datos del Politécnico Jaime Isaza Cadavid. Áreas de interés: Finanzas, Análisis de Riesgo empresarial.
ORCID: 0000-0001-9764-6622



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería Administrativa e
Ingeniería Industrial

Oferta de Posgrados

Especialización en Gestión Empresarial
Especialización en Ingeniería Financiera
Maestría en Ingeniería Administrativa
Maestría en Ingeniería Industrial
Doctorado en Ingeniería - Industria y Organizaciones

Mayor información:

E-mail: acia_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 52 02

Analysis of methanogenic and energetic potential from slaughterhouse wastewater using anaerobic digestion

Liliana del Pilar Castro-Molano, Humberto Escalante-Hernández, Oscar Julián Gómez-Serrato & Diana Paola Jiménez-Piñeros

Grupo de Investigación en Tecnologías de Valorización de Residuos y Fuentes Agrícolas e Industriales para la Sustentabilidad Energética (INTERFASE), Escuela de Ingeniería Química, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. licasmol@uis.edu.co, pilicasm84@gmail.com

Received: April 4th, 2016. Received in revised form: July 18th, 2016. Accepted: August 20th, 2016.

Abstract

Biomethane potential for slaughterhouse wastewater was determined at operation temperatures of 37°C and 30°C with pre incubated cattle manure as inoculum source. Methane yields reached values of 0,73 and 0,71 m³CH₄/kg VS_{add} at 37°C and 30°C respectively. The statistical analysis showed that no significant differences in the maximum methane production exist at the different temperatures evaluated. Additionally, energetic potential of slaughterhouse wastewater was evaluated. Wastewater produced monthly in the slaughterhouse case of study would produce 16440 m³CH₄, by mean anaerobic digestion. Methane production corresponding to approximately 47% electric energy (31235kwh) and 49% (62500kwh) of thermal energy of slaughterhouse consumption.

Keywords: Anaerobic digestion; cattle manure; energetic potential; slaughterhouse.

Análisis del potencial metanogénico y energético de las aguas residuales de una planta de sacrificio bovino mediante digestión anaeróbica

Resumen

El potencial de biometanización para las aguas residuales de una planta de sacrificio bovino fue determinado para las temperaturas de operación de 37°C y 30°C con estiércol bovino pre incubado como fuente de inóculo. Los rendimientos de metano alcanzados fueron de 0,73 y 0,71 m³CH₄/kg VS_{ad} para las temperaturas de 37°C y 30°C respectivamente. El análisis estadístico muestra que no existen diferencias significativas en la producción máxima de metano a las diferentes temperaturas evaluadas. Adicionalmente se evaluó el potencial energético de las aguas residuales. La digestión anaeróbica de las aguas residuales producidas mensualmente en la planta de sacrificio bovino caso de estudio permitiría producir 16440 m³CH₄. Esta cantidad, equivale a 31235kwh de energía eléctrica (47%) y 62500kwh (49%) de energía térmica del consumo de la planta

Palabras clave: Digestión anaeróbica; estiércol bovino; potencial energético; planta de sacrificio bovino.

1. Introducción

Para el año 2015, el sacrificio total de ganado vacuno en Colombia fue en promedio de 4.205.565 cabezas [1], ocupando el tercer lugar en Suramérica en sacrificio de ganado bovino [2]. El proceso de beneficio animal consta de cuatro etapas: (a) sacrificio, (b) deshuesado, (c) procesamiento de la panza o eviscerado y (d) procesamiento

y limpieza de menudencias [3]. Una planta de sacrificio bovino consume en promedio 1 - 8,3 m³ de agua potable de la cual se genera entre 0,4 y 3,1 m³ de agua residual /cabeza de animal sacrificado [4]. Estos volúmenes varían de acuerdo al proceso empleado en cada industria.

En Colombia, aun cuando la normatividad [5] exige que los planta de sacrificio bovinos deben tener planta de tratamiento para sus aguas residuales, ésta disposición no se

How to cite: Análisis del potencial metanogénico y energético de las aguas residuales de una planta de sacrificio bovino mediante digestión anaeróbica DYNÁ 83 (199) pp. 41-49, 2016

cumple y el 42% del agua residual de los planta de sacrificio bovinos es vertida sin tratamiento [2].

Las aguas residuales de plantas de sacrificio bovinos contienen un alto contenido de materia orgánica, que es potencialmente contaminante (DQO entre 3.500 y 12.000 mg/L; DBO₅ entre 1.200 y 7.000 mg/L). Por lo tanto, estos efluentes son adecuados como materia prima para procesos de degradación anaeróbica [6]. La degradación anaeróbica de las aguas residuales tiene costos de operación significativamente bajos comparados con el proceso aerobio [4].

El proceso de digestión anaeróbica (DA) descompone la materia orgánica en ausencia de oxígeno a partir de las etapas bioquímicas de hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. En la DA cada etapa es una función de las condiciones metabólicas de un consorcio microbiano, produciendo biogás (CH₄ y CO₂) y digerido, con lo que se asegura la recuperación de energía en forma de biogás [7].

El tratamiento de aguas residuales de una planta de sacrificio bovino mediante digestión anaeróbica depende de: a) la composición fisicoquímica del agua residual (particularmente el contenido de grasas), b) tiempo de residencia hidráulico, suficiente para garantizar la hidrólisis del material particulado, y c) establecer las condiciones de operación del proceso que favorezcan el crecimiento de las arqueas metanogénicas acetoclásticas, grupo trófico que cataliza la producción de biogás [8].

El potencial de biometanización (PBM) permite determinar la cantidad de metano generado por masa de sustrato (en términos de sólidos volátiles o DQO alimentados) [9]. El PBM permite evaluar la viabilidad del proceso anaerobio y proyectar su diseño en función de los parámetros operacionales: producción de metano ($G_{(t)}$), tiempo de adaptación del consorcio microbiano (λ) y fracción de materia degradable (f_d) [10].

Los rendimientos y parámetros cinéticos del proceso de DA obtenidos a partir del PBM dependen principalmente de la fuente de inóculo, relación inóculo/sustrato y la temperatura a la cual se lleva a cabo el proceso anaeróbico [11]. Por lo anterior, un mismo sustrato (aguas residuales de plantas de sacrificio) puede tener diferentes valores de PBM basado en las condiciones de operación del proceso. La producción de metano a partir de aguas residuales de plantas de sacrificio bovino ha alcanzado valores de PBM entre 0,5 y 1,0 m³ CH₄/kg SV; de acuerdo a las condiciones de temperatura que en promedio son entre 30°C y 38°C y las fuentes de inóculo como lodo granular procedente de plantas procesadora de leche y lodo PTAR [12, 13, 14, 8].

Los mejores rendimientos de PBM se alcanzan cuando la DA se lleva a cabo a 37°C, temperatura adecuada para el crecimiento microbiano de las arqueas metanogénicas [15]. Sin embargo, a nivel industrial realizar el proceso a temperaturas superiores a la cual sale el efluente (agua residual) implica costos energéticos que limitan su viabilidad económica. Con respecto a la fuente de inóculo, la mayoría de investigaciones utilizan lodo PTAR. Sin embargo, el estiércol bovino se presenta como una alternativa atractiva de fuente de inóculo por su alto recuento de grupos tróficos adecuados para el proceso de DA. En Colombia, las plantas de beneficio bovino generan diariamente alrededor de 8 kg

de estiércol/100 kg de peso de ganado bovino [16] el cual se convierte en otro residuo que puede ser gestionado y puede ser utilizado como fuente de inóculo. Sin embargo, la literatura es limitada con respecto a la influencia de la composición de carga orgánica y nutrientes del agua residual, fuente de inóculo empleada, temperatura de operación y potencial energético de los efluentes de plantas de sacrificio en Colombia.

Por lo anterior, en ésta investigación se evaluó el PBM de las aguas residuales de una planta de sacrificio bovino, ubicado en el municipio de Aguachica Cesar bajo las condiciones de la región y empleando como inóculo estiércol bovino. Con ésta investigación se abre la posibilidad de evaluar la implementación a escala industrial de los sistemas de bioconversión anaeróbica como una estrategia para el tratamiento de aguas residuales de planta de sacrificio bovinos en Colombia.

2. Materiales y métodos

2.1. Información del sitio de muestra

Se tomó como caso de estudio una planta de beneficio de ganado bovino y bufalino que sacrifica 200 animales/día, y se encuentra ubicada en el departamento de Cesar, Colombia (Lat: N 8°15' 34,2'' Long W 73°36'0,41'').

La planta de sacrificio bovino de estudio produce en promedio 3,5 L/s de aguas residuales provenientes de cada una de las actividades realizadas como el lavado de animales, pisos, vísceras, equipos, etc. Estas aguas residuales están compuestas por orinas, heces, sangre, pelos, residuos de carne y grasas.

2.2. Evaluación fisicoquímica del agua residual

2.2.1. Recolección y tratamiento de la muestra de agua residual

El agua residual (AR) fue recolectada en la planta de sacrificio, a temperatura de $\pm 23,1^\circ\text{C}$. Las muestras fueron almacenadas, refrigeradas para su preservación y trasladadas al laboratorio de la Universidad Industrial de Santander.

Debido a la presencia de sólidos (pellejos y coágulos de sangre) presentes en las muestras de agua, se realizó una homogenización de los sólidos mediante triturado durante 2 min.

2.2.2. Análisis fisicoquímicos

Los sólidos totales (ST) y los sólidos volátiles (SV) fueron medidos de acuerdo con los protocolos descritos por Standard Methods APHA/SM2540 [17]. La demanda química de oxígeno soluble (DQO_s) fue determinada por el método colorimétrico [17]. Los azúcares reductores totales (ART) se determinaron a partir del protocolo descrito por Miller [18]. Los ácidos grasos volátiles (AGV) y la alcalinidad total (AT) fueron cuantificados por titulación de acuerdo al protocolo propuesto por Purser y col [19]. Grasa y Nitrógeno Total (NTK) fueron medidas por el método gravimétrico/SM5520B y Kjeldahl-Titrimétrico/SM4500-N,

respectivamente. El contenido de proteínas fue calculado a partir de la concentración de NTK multiplicado por el factor de conversión de 6,25 (proteína de la carne). El pH fue determinado usando un pHmetro metrohm 744.

2.3. Evaluación del potencial de Biometanización

Los ensayos de biodegradabilidad anaeróbica se llevaron a cabo de acuerdo con el protocolo establecido por Angelidaki y col [9]. Los experimentos se realizaron por triplicado en reactores batch de 80 mL (35 mL de volumen de trabajo) a temperatura óptima de $37^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ de acuerdo al rango mesófilo para los procesos biológicos [15], y a temperatura de $30^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, la cual es el promedio del departamento del Cesar [20].

Como inóculo se utilizó estiércol bovino, recolectado en la planta de sacrificio bovino. Éste inóculo fue pre-incubado a 25°C para reducir el contenido de materia orgánica residual. La composición del inóculo fue 777mg DQO/L, 28,2 g ST/kg y 65% de SV con respecto a la fracción de los ST.

Al inóculo se le realizó el recuento de grupos tróficos (Número más probable de células por concentración de inóculo ($\text{NMP}_{\text{células/gSSV}}$) reportando la presencia de $2,8 \times 10^4$ arqueas metanogénicas acetoclásticas, $2,3 \times 10^4$ arqueas metanogénicas hidrogenotróficas y $2,9 \times 10^4$ arqueas metanogénicas del metanol [16].

Se estableció una relación inóculo-sustrato (RIS) de $1\text{gSV}_{\text{inóculo}}/\text{gSV}_{\text{sustrato}}$, teniendo en cuenta los resultados reportados en la literatura [7].

Con el objetivo de evaluar la producción de metano por actividad endógena del inóculo, se realizó por triplicado un experimento denominado blanco, el cual contenía solo inóculo y la cantidad de sustrato fue reemplazada con agua destilada. La producción de metano del experimento blanco se restó al PBM de cada ensayo.

Todos los ensayos se gasearon con nitrógeno durante 2 minutos para garantizar condiciones de anaerobiosis y posteriormente fueron tapados con corchos de butilo y sellados con agraphes de aluminio. Los biorreactores fueron agitados manualmente 1 vez al día durante 2 minutos.

El volumen de metano producido diariamente se cuantificó por el método de desplazamiento alcalino con una solución 0,1N de NaOH con pH 12 y fenolftaleína como indicador [9]. El potencial de biometanización (PBM), se expresó en unidades de volumen de metano a condiciones de presión y temperatura estándar por la masa de SV de agua residual adicionada ($\text{m}^3\text{CH}_4/\text{kg SV}_{\text{agua residual}}$).

Por otra parte, se cuantificó la variación de ART, DQO, AGV, AT y pH durante el proceso de digestión realizado a 30°C , dado que esa será la temperatura de aplicación de la tecnología anaeróbica en la planta de sacrificio bovino caso de estudio. Para esta determinación se realizaron experimentos a las mismas condiciones del ensayo de biodegradabilidad anaeróbica. Estos ensayos fueron destructivos y consistieron en una batería de 11 reactores uno por cada tercer día hasta los 30 días de operación. Cada tercer día se tomó muestra de un reactor para hacer las respectivas mediciones y posteriormente el ensayo es descartado.

2.3.1. Modelamiento y estimación de parámetros del proceso

Los parámetros cinéticos de degradación anaeróbica fueron estimados a partir de los ensayos de biometanización, ajustando los datos al modelo de Gompertz modificado ec. (1).

$$G(t) = G_0 \cdot \exp\left(-\exp\left(\frac{R_{\max} \cdot e}{G_0} (\lambda - t) + 1\right)\right) \quad (1)$$

Donde

$G(t)$: Producción acumulada de metano en un tiempo t ($\text{m}^3/\text{kg SV}$)

G_0 : Máxima producción de metano acumulada ($\text{m}^3/\text{kg SV}$)

$R_{\max}$: Máxima velocidad de producción de metano ($\text{m}^3/\text{kg SV d}$)

λ : Tiempo de adaptación del inóculo al sustrato (d)

e : Representa $\exp(1) = 2,7183$

Los parámetros (G_0 , K , $R_{\max}$, λ) fueron determinados utilizando la herramienta curve fitting (cftool) del software Matlab R2015a.

Por otra parte, se realizó un análisis de medias mediante el programa estadístico Minitab 17 para determinar la existencia de una diferencia estadística significativa entre los valores de los parámetros para los ensayos realizados a 30°C y 37°C .

Los potenciales energéticos eléctrico (P_{EE}) y calórico (P_{EC}) del efluente de la planta de sacrificio bovino se calcularon a partir de la ec. (2) y la ec.(3) respectivamente, teniendo en cuenta: a) caudal promedio de agua residual, horas de sacrificio durante el año 2015, consumo y costos de energía eléctrica y térmica en la planta de sacrificio (información suministrada por la planta) b) energía eléctrica generada en forma de biogás, determinada a partir de los resultados experimentales de $\text{PBM}_{30^{\circ}\text{C}}$ teniendo en cuenta los factores de conversión propuestos por Lombardi & Tricase [21].

$$P_{EE} = Q_{AR} \cdot \rho_{AR} \cdot \frac{[SV]_{AR}}{1000} \cdot \text{PBM} \cdot \alpha_E \quad (2)$$

$$P_{EC} = Q_{AR} \cdot \rho_{AR} \cdot \frac{[SV]_{AR}}{1000} \cdot \text{PBM} \cdot \alpha_C \quad (3)$$

Donde

P_{EE} : Potencial energético eléctrico

P_{EC} : Potencial energético calórico

Q_{AR} : Caudal de agua residual [m^3/mes]

ρ_{AR} : Densidad de agua residual [Kg/m^3]

$[SV]_{AR}$: Concentración sólidos volátiles [gSV/Kg]

PBM: Potencial de biometanización a 30°C [$\text{m}^3\text{CH}_4/\text{Kg SV}$]

α_E : Factor de conversión metano a Kwh para el potencial energético eléctrico, 1.9 [$\text{Kwh}/\text{m}^3\text{CH}_4$]

α_C : Factor de conversión metano a Kwh para el potencial energético calórico, 3.8 [$\text{Kwh}/\text{m}^3\text{CH}_4$]

Adicionalmente, se evaluó el ahorro energético a partir del cociente entre la energía producida en forma de biogás y el consumo energético de la planta ec. (4).

$$\% \text{Ahorro energético} = \frac{\text{energía en forma de biogás}}{\text{consumo energético de la planta}} * 100 \quad (4)$$

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización fisicoquímica del sustrato

La Tabla 1 presenta la caracterización del sustrato. Los parámetros evaluados indican que el agua residual de la planta de sacrificio bovino presenta un alto potencial para la producción de biogás.

La carga orgánica presente en el AR en términos de DQO está comprendida entre el rango de alta dureza (5.000-10.000mg/L) reportado en la literatura, referenciada en la Tabla 1. Estos resultados muestran que el AR tiene alta concentración de materia orgánica disponible para convertirse en biogás.

En cuanto a los sólidos (ST, SF, SV) son bajos comparados con los reportados por Ortner y col. [14]. Las diferencias expuestas se deben a que el AR es diluida con el agua de lavado utilizada durante el proceso de beneficio. La baja concentración de sólidos en el reactor favorece la actividad metanogénica específica de los microorganismos [25]

Los contenidos de grasa y proteína presente en el AR, indican la materia orgánica particulada disponible para ser hidrolizada a glicerol y a ácidos grasos volátiles de cadena larga [26]. En este estudio, el contenido de grasa fue de 0,01% de SV por efectos de dilución con agua de lavado del proceso y el de proteína fue de 16597 mg/l AR. La literatura reporta que para agua residual de planta de sacrificio bovino, el contenido de grasa se encuentra entre los 40 hasta los 710 mg/L dependiendo del proceso de sacrificio [4, 23] .

Tabla 1
Caracterización fisicoquímica del sustrato

Parámetro	Unidades	Valor	Valor en la literatura	Fuente
DQO	mg DQO/l	7467	>5000	[8]
			3979-7125	[22]
			12820	[23]
			5200-11400	[24]
ST	g ST/kg AR	22.8	80-120	[14]
SF	g SF/kg AR	0.9		
SV	g SV/kg AR	21.9	70-110	[14]
Grasas	mg/l	2.68	40 - 710	[4]
			250	[23]
ART	g glucosa/l	0.3	210-710	[24]
AGV	mg Ac. Acético/l	840		
pH		7.7	880	[23]
			900-1780	[4]
			6.3-6.6	[4]
			7.5	[23]
AT	mg CaCO ₃ /l	1000	6,24-7,85	[22]
			6.8-7.8	[24]
				[23]
			530	[23]
Nitrógeno Total	mg N/l	2655	366-512	[22]
			300-6000	[6]
			531	[23]
			54,7-99,8	[22]

Fuente: Los autores

Los valores de ART y AGV del AR, señalan que hay materia orgánica soluble fácilmente biodegradable disponible para ser metabolizada a acetato y posteriormente

a biogás.

El nitrógeno total representa un potencial nutriente presente en el AR que puede ser recuperado en el digerido (producto del proceso anaerobio), y posteriormente utilizado como fertilizante o mejorador de suelos [27].

3.2. Potencial de biometanización

El potencial de biometanización del agua residual (PBM_{AR}) a las temperaturas de operación utilizadas en éste estudio, se presenta en la Fig. 1. La alta concentración de materia orgánica soluble facilita la producción de biogás desde el primer día de operación. Las máximas producciones diarias de biogás se alcanzaron en los días 11, 12 y 15 con valores de 15.8, 17.3 y 17.3 ml respectivamente.

El máximo PBM_{AR} fue alcanzado a los 19 días para el experimento realizado a 37°C y a los 24 días para el ensayo a temperatura de 30°C. Aun cuando las temperaturas evaluadas en este estudio corresponden al rango mesófilico, la temperatura de 37°C alcanzó la estabilidad al 60% de avance del proceso, esto es evidente dado que la actividad enzimática en el rango mesófilico es mayor en el intervalo de 35°C a 37°C [28].

Los PBM reportados en la literatura se encuentran entre 0.25 y 0. 6 m³CH₄/kg SV; esta variación se debe a la utilización de diferentes residuos del proceso de sacrificio bovino como son estiércol, menudencias, vísceras entre otros [8, 29]. Sin embargo, en este estudio, los máximos rendimientos de producción de metano fueron de 0,73 m³CH₄/kg SV (2,15 m³CH₄/kg DQO) y 0,71m³CH₄/kg SV (2,14 m³CH₄/kg DQO) a 37°C y 30°C, respectivamente. Los valores alcanzados son altos debido a que el AR generada en la planta de sacrificio bovino se encuentra diluida con agua procedente del lavado de la planta, lo cual reduce el riesgo de inhibición por amonio y acumulación de ácidos grasos [26].

La ionización del amonio es una función de la temperatura y pH. Aunque la concentración del ión amonio no fue medida, se infiere que no se presenta inhibición por amonio dado que la operación se lleva a cabo en rango mesofílico y con agua residual diluida. Otra ventaja de la utilización de un residuo diluido, es reducir la inhibición causada por ácidos grasos de cadena larga. La literatura reporta que la dilución de efluentes provenientes de planta de sacrificio bovino es una opción atractiva para reducir inhibiciones causadas por ácidos grasos de cadena larga [15].

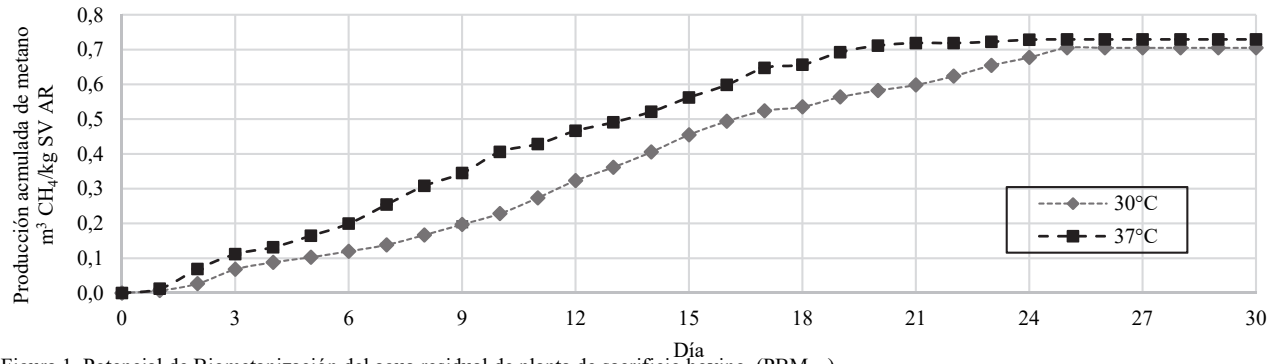


Figura 1. Potencial de Biometanización del agua residual de planta de sacrificio bovino (PBM_{AR}).
Fuente: Los autores

La producción de metano en los blancos (solo inóculo) fue de 0,03 m³CH₄/kg SV y 0,02 m³CH₄/kg SV, a 37°C y 30°C respectivamente. Estos resultados muestran que la fuente de inóculo (estiércol bovino) produce entre el 3% y el 4% del metano a causa de su metabolismo endógeno.

Desde el punto de vista microbiológico, es posible que el proceso de metanización fuese favorecido por la concentración de arqueas metanogénicas acetoclásticas $2,8 \times 10^4$ NMP_{células}/gSSV presentes en el inóculo utilizado; las cuales son un catalizador selectivo (actividad metanogénica específica de 0.60 g DQO CH₄/g SSV*d) [16] para la producción de biogás a partir de sustratos como el agua residual de plantas de beneficio bovino [8].

3.2.1. Análisis cinético

La Tabla 2 presenta los parámetros cinéticos de la ecuación de *Gompertz*, estimados a partir de los datos experimentales de PBM_{AR}. La máxima producción de metano acumulado G_0 , para los ensayos a 37°C y a 30°C es de 0,77 y 0,76 m³CH₄/kg SV, respectivamente. Con respecto a la velocidad de producción diaria de metano R_{max} , los resultados indican 0,05 m³CH₄/kg SVd y 0,04 m³CH₄/kg SVd, a 37°C y 30°C respectivamente.

Tabla 2.

Constantes cinéticas de *Gompertz* para la DA del agua residual de planta de sacrificio bovino.

Constante	Unidades	PBMAR a 37°C	PBMAR a 30°C
G_0	m ³ CH ₄ /Kg SV	0.77	0.76
R_{max}	m ³ CH ₄ /Kg SV d	0.05	0.04
λ	d	1.74	3.60

Fuente: Los autores

La comparación de medias para R_{max} representada en la Fig. 2 mostró que existen diferencias significativas (Valor $p=0,003$). Esto corrobora lo descrito en la literatura acerca de que la actividad enzimática depende de la temperatura y que los máximos valores de rendimiento diario se alcanzan a 37°C [28]. Sin embargo, en el caso del rendimiento acumulado de metano G_0 , el análisis de medias evidencia que no existen diferencias estadísticamente significativas (Valor $p=0,848$).

A partir del análisis estadístico se infiere que es viable producir biogás a la temperatura de 30°C donde se encuentra ubicada la planta de sacrificio bovino, reduciendo costos energéticos.

El tiempo de adaptación λ fue aproximadamente 1,7 días para el proceso realizado a 37°C y aproximadamente 3,6 días cuando la digestión se llevó a cabo a 30°C. Estos datos se correlacionan con la rapidez con la que el ensayo a 37°C alcanzó el estado estable (Fig.1).

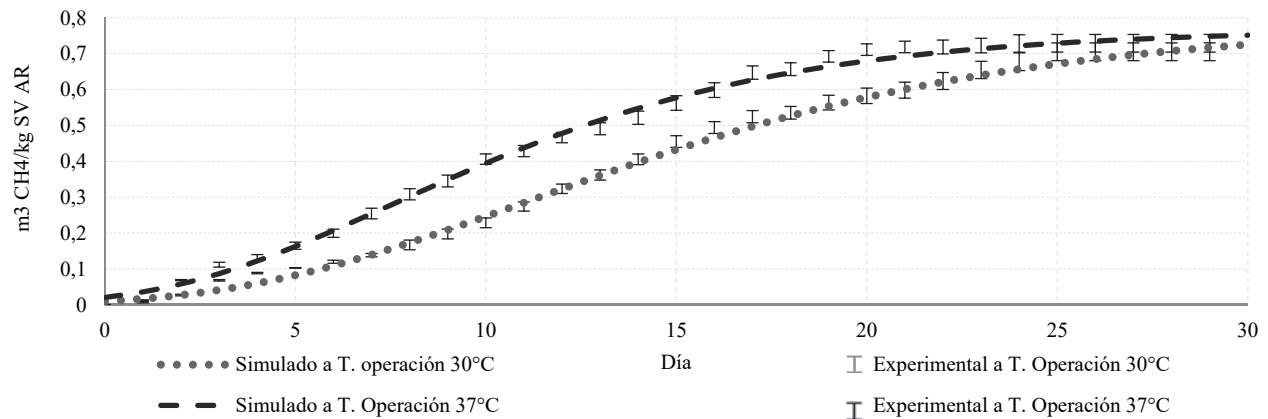


Figura 2. PBM del AR con datos experimentales y el modelo cinético de Gompertz a 30°C y 37°C

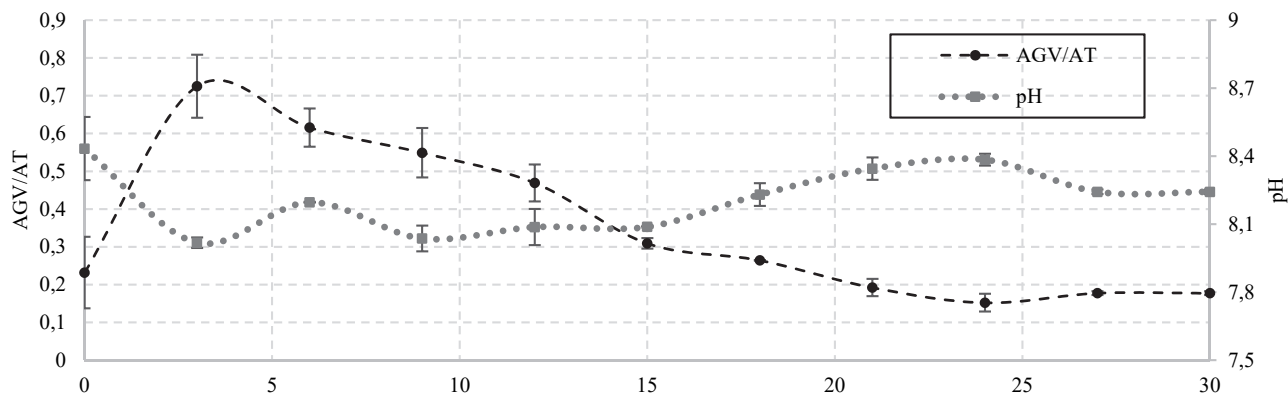


Fig. 5. Relación AGV/AT y variación del pH
Fuente: Los autores

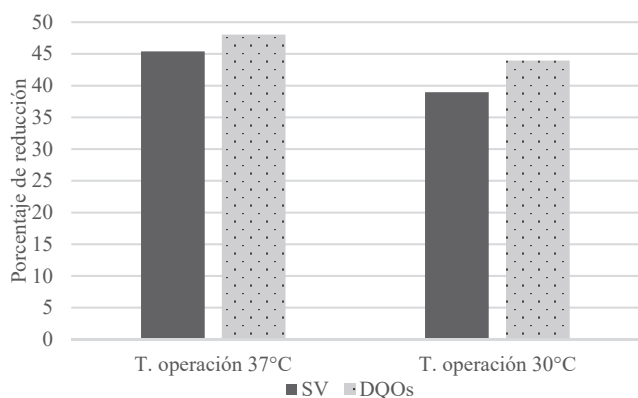


Figura 4. Porcentaje de remoción de demanda química de oxígeno y sólidos volátiles
Fuente: Los autores

En la Fig.2. se observa el comportamiento del PBM_{AR} experimental y el PBM_{AR} simulado con el modelo cinético de *Gompertz* modificado para cada una de las temperaturas evaluadas. Se aprecia que el modelo al incluir la fase de adaptación del consorcio; se ajusta satisfactoriamente a los datos experimentales. A partir de los resultados se infiere que la fase de adaptación se presenta por efectos de la temperatura (30°C) y por la fuente de inóculo empleado (estiércol bovino).

El comportamiento cinético de la materia orgánica soluble fácilmente biodegradable se representa en términos de AGV y ART (Fig. 3). En los tres primeros días se evidencia la máxima velocidad de consumo de ART por parte de los microorganismos acidogénicos, esta rápida degradación corresponde a la baja concentración de materia orgánica particulada en el agua residual (contenido de grasas). A partir de estos resultados se infiere que la hidrólisis no es la etapa limitante del proceso anaerobio para el agua residual de la planta de sacrificio bovino caso de estudio. Esta inferencia puede ser comprobada en futuros estudios determinando los parámetros cinéticos del proceso.

La máxima concentración de AGV (2700 mg/l) se alcanza en el día 6. Esta concentración corresponde a la materia orgánica soluble fácilmente biodegradable que se produce a

partir de la hidrólisis de carbohidratos, lípidos (grasas) y proteínas contenidas en el agua residual de matadero.

En este estudio, aun cuando la RIS fue de 1gSV inóculo/gSV sustrato, la concentración de AGV no afectó la producción de metano, puesto que el valor más bajo de producción de metano se obtuvo el día 18 cuando la concentración de AGV se redujo a 1000mg/l. Según los resultados mostrados, se deduce que durante el proceso no se presentó inhibición por acumulación de ácidos. A partir del día 9 se observó disminución en la concentración de AGV lo que se atribuye a la actividad metabólica de los microorganismos acetogénicos [30].

La estabilización de la materia orgánica del agua residual se evaluó en términos de DQOs y SV (Fig. 4). La digestión anaeróbica de las aguas residuales alcanzó remociones de 44% y 48% de DQOs y de 39% y 45% de SV para la temperatura de 30°C y 37°C, respectivamente. Estos porcentajes de remoción están acorde con las conversiones que alcanza la tecnología anaeróbica. Los resultados obtenidos demuestran que la reducción de la materia orgánica depende de la fuente de inóculo empleada, la relación inóculo sustrato (RIS) y el tiempo de digestión. Resultados similares del efecto del inóculo y su RIS fueron reportados para la digestión anaeróbica de agua residual de una porcícola empleando tres fuentes de inóculo diferentes (rumen, estiércol porcino previamente digerido y lodo PTAR) obteniendo producciones de metano de 0,078 m³ CH₄/kg SV, 0,244 m³ CH₄/kg SV y 0,256 m³ CH₄/kg SV para cada inóculo evaluado y porcentajes de remoción de DQO de 14,61%, 53,06% y 52,05 y de SV de 35,85%, 46,03% y 49,85% respectivamente [31].

3.2.2. Estabilidad del proceso

La estabilidad del proceso anaerobio a partir del agua residual, se evaluó en función del comportamiento de la relación AGV/AT y el pH (Fig. 5). Durante el tiempo de digestión se presentaron valores de relación AGV/AT en el intervalo entre 0,7 y 0,2, lo que demuestra que el proceso operó de forma estable sin riesgo de inhibición. Estos resultados se correlacionan con los obtenidos para el PBM_{AR} , considerando que la producción de metano obtenida en este estudio fue alta.

El comportamiento del pH fue estable en el rango entre

8,0 y 8,5. Durante los tres primeros días de digestión se observa una disminución del pH, la cual es causada por el aumento de la concentración de AGV. El aumento de pH durante los días 15 a 24 se correlaciona con el comportamiento de la relación AGV/AT.

3.3. Potencial energético

La disponibilidad mensual de agua residual de la planta de sacrificio bovino y bufalino durante un año, permite realizar un estimativo del potencial de energía eléctrica y calórica, a partir del biogás producido (Tabla 3). Durante el mes de enero la planta entró en receso por labores de mantenimiento. En promedio en la planta, se sacrifican 1844 cabezas/mes, que corresponden a 100 horas/mes de operación; conduciendo a variaciones mensuales en el caudal. Sin embargo, este caudal garantiza la viabilidad de la operación de digestión anaeróbica en continuo durante el año. El potencial promedio de metano generado en la planta es de 16440 m³CH₄/mes, que corresponde a 31235 kWh/mes de energía eléctrica y 62500 kWh/mes de energía calórica, dando lugar a un ahorro energético entre el 40% y el 50%.

El beneficio económico de considerar el tratamiento de aguas residuales del matadero mediante digestión anaeróbica, está asociado a una reducción de costos en la energía eléctrica de la planta correspondiente a 3200 dólares (referido a una base de 0.1 dólar/kWh en César, Colombia).

El potencial de energía eléctrica puede ser empleado en la planta en las etapas de insensibilización, izado, desollado, corte del cadáver y refrigeración del producto terminado.

Otra alternativa energética sería utilizar la combustión del biogás como energía térmica para la caldera y la planta tendría un ahorro de 1600 dólares/mes. Jensen y col. (2014), reportan potenciales de recuperación de energía a partir de residuos sólidos y líquidos de plantas alrededor de 40 Mwh de electricidad al día, para una capacidad de sacrificio de 800 cabezas por día [8]. El potencial energético estimado para la planta de sacrificio en Colombia, es coherente con los resultados de la literatura, teniendo en cuenta que el sustrato empleado fue únicamente efluente líquido. Por lo anterior, los resultados de este estudio ofrecen una oportunidad de estabilización y valorización energética para este tipo de efluentes.

4. Conclusiones

El agua residual de la planta de sacrificio bovino y bufalino contiene 7467mgDQO/L, que permite obtener un potencial de biometanización de 0,73m³CH₄/kgSV. Los parámetros cinéticos del modelo de *Gompertz*, que describen la digestión del agua residual de la planta de sacrificio bovino, indican que no existen diferencias significativas en la producción de biogás a las temperaturas de 30°C y 37°C. El potencial energético del agua residual de la planta de sacrificio bovino es en promedio de 31235 kWh/mes de energía eléctrica y 62500 kWh/mes de energía térmica. Por consiguiente, es viable digerir el agua residual a la temperatura de la planta de sacrificio bovino (30°C) y estudiar el uso de estiércol bovino como co-sustrato.

Tabla 3.
Potencial de energía eléctrica y calórica a partir de la producción de biogás de AR.

M es	Caudal AR (m ³ /mes)	Potencial de metano (m ³ CH ₄ /mes)	Potencial de energía eléctrica (kWh/mes)	Energía eléctrica consumida (kWh/mes)	Ahorro de energía, %	Potenci al de energía calóric a (kWh/ mes)	Energí a calóric a consu mida (kWh/ mes)	Ahorro de energía, %
Fe b	605	7862	14939	18621	80	29876	128025	23
M ar	1210	15725	29877	70810	42	59755	128025	47
Ab r	1512	19656	37346	77478	48	74693	128025	58
M ay	1210	15725	29877	76984	42	59755	128025	47
Ju n	1210	15725	29877	70810	39	59755	128025	47
Jul	1210	15725	29877	71872	42	59755	128025	47
Ag o	1512	19656	37346	72757	51	74693	128025	58
Se pt	1210	15725	29877	63443	47	59755	128025	47
Oc t	1512	19656	37346	72338	52	74693	128025	58
No v	1210	15725	29877	60655	49	59755	128025	47
Di c	1512	19656	37346	74006	50	74693	128025	58

Fuente: Los autores

Referencias

- [1] DANE, Sacrificio de ganado -ESAG- [en línea], Colombia, [consulta, 11 de noviembre de 2015]. Disponible en: <http://www.dane.gov.co/index.php/agropecuaria-alias/estadisticas-de-sacrificio-de-ganado-esag>
- [2] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Agenda prospectiva de investigación y desarrollo tecnológico para la cadena cárnica bovina de Colombia [en línea], Colombia, 2009 [consulta, 10 de diciembre de 2015]. Disponible en: http://sioc.minagricultura.gov.co/templates/sioc_cadenas/docs/1189.pdf
- [3] FAO, Departamento de Agricultura y Protección del Consumidor [En línea], 1996 [consulta, 12 de noviembre de 2015]. Disponible en: <http://www.fao.org/wairdocs/lead/x6114e/x6114e04.htm#2.%20slaughterhouses>
- [4] Caixeta, C.E., Cammarota M.C. and Xavier A.M., Slaughterhouse wastewater treatment: Evaluation of a new three-phase separation system in a UASB reactor, *Bioresource Technology*, 81, pp. 61-69, 2002. DOI: 10.1016/S0960-8524(01)00070-0
- [5] Ministerio de Salud y Protección Social, Resolución 240 del 31 de enero de 2013 [en línea], Colombia, 2013. Disponible en: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/rid/de/de/dij/resolucion-0240-de-2013.pdf>
- [6] Chaux, G., Rojas, G. y Bolaños, L., Producción más limpia y viabilidad de tratamiento biológico para efluentes de mataderos en pequeñas localidades. Caso: Municipio de El Tambo (Colombia). *Rev. Bio. Agro*, 7 pp. 102-114, 2009.
- [7] Slimane, K., Fathya, S., Assia, K. and Hamza, M., Influence of inoculums/substrate ratios (ISRs) on the mesophilic anaerobic digestion of slaughterhouse waste in batch mode: Process stability and biogas production. *Energy Procedia*, 50(1), pp. 57-63, 2014. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.06.007
- [8] Jensen, P., Sullivan, T., Carney, C. and Batstone, D., Analysis of the potential to recover energy and nutrient resources from cattle slaughterhouses in Australia by employing anaerobic digestion. *Applied Energy*, 136, pp. 23-31, 2014. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.09.009
- [9] Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J. L., Guwy, A.J., Kalyuzhnyi, S., Jenicek, P. and Van Lier, J.B., Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water Science & Technology*, 59(5), pp. 927-934, 2009. DOI: 10.2166/wst.2009.040
- [10] Jensen, P. D., Ge, H. and Batstone D.J., Assessing the role of biochemical methane potential tests in determining anaerobic degradability rate and extent. *Water Science & Technology*, 64(4), pp. 880-886, 2011. DOI: 10.2166/wst.2011.662
- [11] Moset, V., Al-zohairi, N. and Möller, H.B., The impact of inoculum source, inoculum to substrate ratio and sample preservation on methane potential from different substrates. *Biomass and Bioenergy*, 83, pp. 474-482, 2015. DOI: 10.1016/j.biombioe.2015.10.018
- [12] Massé, D., Massé, L. and Bourgeois, N., Anaerobic processing of slaughterhouse wastewater in a SBR, *Agriculture and Agri-Food Canada*, pp. In Press, 2000.
- [13] Cuetos, M.J., Gómez, X., Otero, M. and Morán, A., Anaerobic digestion of solid slaughterhouse waste (SHW) at laboratory scale: Influence of co-digestion with the organic fraction of municipal solid waste (OFMSW). *Biochemical Engineering Journal*, 40(1), pp. 99-106, 2008. DOI: 10.1016/j.bej.2007.11.019
- [14] Ortner, M., Leitzinger, K., Skupien, S., Bochmann, G. and Fuchs, W., Efficient anaerobic mono-digestion of N-rich slaughterhouse waste: Influence of ammonia, temperature and trace elements. *Bioresource Technology*, 174, pp. 222-232, 2014. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.10.023
- [15] Heinfelt, A. and Angelidaki, I., Anaerobic digestion of slaughterhouse by-products. *Biomass and bioenergy*, 33(8), pp. 1046-1054, 2009. DOI: 10.1016/j.biombioe.2009.03.004
- [16] Alzate, M.S. and Quintero, M., Characterization of trophic groups throughout an anaerobic digestion process with cattle manure slurry using a low-cost method. *Revista ION*, 29(1), pp. 117-123, 2016. DOI: 10.18273/revion.v29n1-2016010
- [17] APHA, AWWA & WEF, Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association, Washington, D.C.: American Public Health Association, 2005.
- [18] Miller, G., Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *Analytical Chemistry*, 31(3), pp. 426-428, 1959. DOI: 10.1021/ac60147a030
- [19] Jobling, B.J., Thai, S.M., Fritz, T., Esteves, S.R., Dinsdale, R.M. and Guwy, A.J., An improved titration model reducing over estimation of total volatile fatty acids in anaerobic digestion of energy crop, animal slurry and food waste. *Water Environment Research*, 64, pp. 162-170, 2014. DOI: 10.1016/j.watres.2014.05.020
- [20] AccuWeather, Tiempo meteorológico Aguachica [en línea]. Colombia, 2015 [consulta, 10 de diciembre de 2015]. Disponible en: <http://www.accuweather.com/es/co/aguachica/101961/month/101961?monyr=10/01/2015>
- [21] Lombardi, M. and Tricase, C., State of the art and prospects of Italian biogas production from animal sewage: Technical-economic considerations. *Renewable Energy*, 34(3), pp. 477-485, 2009. DOI: 10.1016/j.renene.2008.06.013
- [22] Aguilar, M., Sáez, J., Lloréns, M., Soler, A. and Ortuño, J., Nutrient removal and sludge production in the coagulation-flocculation process. *Water Research*, 36(11), pp. 2910-2919, 2002. DOI: 10.1016/S0043-1354(01)00508-5
- [23] Rodríguez, J., Rodríguez, I., Pedraza, E., Balagurusamy, N., Sosa, G. and Garza, Y., Kinetics of anaerobic treatment of slaughterhouse wastewater in batch and upflow anaerobic sludge blanket reactor. *Bioresource Technology*, 85(3), pp. 235-241, 2002. DOI: 10.1016/S0960-8524(02)00141-4
- [24] Ruiz, M., Veiga, P.d.S. and Blázquez, R., Treatment of slaughterhouse wastewater in a UASB reactor and an anaerobic filter. *Bioresource Technology*, 60(3), pp. 251-258, 1997. DOI: 10.1016/S0960-8524(97)00020-5
- [25] Le Hyaric, R., Chardin, C., Benbelkacem, H., Bollon, J., Bayard, R., Escudé, R. and Buffière, P., Influence of the substrate concentration and moisture content on the specific methanogenic activity of dry mesophilic municipal solid waste digestate spiked with propionate. *Bioresource Technology*, 102(2), pp. 822-827, 2011. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.08.124
- [26] Ware, A. and Power, N., What is the effect of mandatory pasteurisation on the biogas transformation of solid slaughterhouse wastes?. *Waste Management*, 48, pp. 503-512, 2016. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.10.013
- [27] Rivera, D., Plata, L., Castro, L., Guzmán, C. y Escalante, H., Aprovechamiento del subproducto sólido de la digestión anaerobia del bagazo de fique (*furcraea macrophylla*) para el acondicionamiento de suelos. *Revista Ion*, 25(1), pp. 25-34, 2012.
- [28] Khanal, S.K., *Anaerobic biotechnology for bioenergy Production: Principles and applications*, Iowa, USA: Blackwell Publishing, 2008, pp. 29-63. DOI: 10.1002/9780813804545
- [29] Pitk, P., Kaparaju, P. and Vilu, R., Methane potential of sterilized solid slaughterhouse wastes. *Bioresource Technology*, 116, pp. 42-46, 2012. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.04.038
- [30] Martí, N., *Phosphorus precipitation in anaerobic digestion process*, Florida, USA: Boca Raton, 2006, pp. 4-12.
- [31] Córdoba, V., Fernández, M. and Santalla, E., The effect of different inoculums on anaerobic digestion of swine wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(1), pp. 115-122, 2016. DOI: 10.1016/j.jece.2015.11.003

L.d.P Castro-Molano, es Ing. Química y Dra. en Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander, Colombia. Se ha desempeñado en las líneas de investigación de procesos biotecnológicos y digestión anaerobia, donde lleva diez años de experiencia. Ha publicado 11 artículos (revistas nacionales e internacionales) y 2 capítulos de libro en el área de la digestión

anaerobia. Ha participado como ponente en 14 eventos (nacionales e internacionales) y ha pertenecido a 2 proyectos de investigación. Se desempeña como docente en la Universidad Industrial de Santander, Colombia.

ORCID: 0000-0001-8893-6310

H. Escalante-Hernández, es Ing. Químico de la Universidad Industrial de Santander (UIS), MSc. en Ingeniería Química (UIS) y Dr. en Ingeniería Química de la Universidad de Cantabria, España, se ha desempeñado como investigador en el área de la ingeniería química y biotecnología industrial en la Universidad Industrial de Santander, Colombia, con 10 años de experiencia en digestión anaerobia. Ha publicado 30 artículos (revistas nacionales e internacionales), dos libros y dos capítulos de libro, ha presentado 38 ponencias (eventos nacionales e internacionales) y ha pertenecido a catorce proyectos de investigación. Se desempeña como docente en la Universidad Industrial de Santander, Colombia.

ORCID: 0000-0002-6257-8110

O.J. Gómez-Serrato, es Ing. Químico de nacionalidad colombiana egresado de la Universidad Industrial de Santander, Colombia. Su tesis de grado se enfocó en la digestión anaerobia de las aguas residuales de un matadero.

ORCID: 0000-0001-6131-7392

D.P. Jiménez-Piñeros, es Ing. Química de la Universidad Industrial de Santander, Colombia, quién participó en la investigación del PBM del agua residual de un matadero mediante digestión anaerobia.

ORCID:0000-0002-5501-2530



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN

FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería
Química e Ingeniería de Petróleos

Oferta de Posgrados

Maestría en Ingeniería - Ingeniería Química
Maestría en Ingeniería - Ingeniería de Petróleos
Doctorado en Ingeniería - Sistemas Energéticos

Mayor información:

E-mail: qcaypet_med@unal.edu.co

Teléfono: (57-4) 425 5317

Reduction of computational times using the equivalent rectangle concept in the physics-based surface – subsurface models

Juliana Hurtado ^a, Jesús Causapé ^b, Raphael Abrahao ^c & Anibal J. Pérez ^d

^a Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Antonio Nariño, Bogotá, Colombia. julihurtadop@gmail.com.

^b Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Zaragoza, España. j.causape@igme.es

^c Facultad de Energía Renovable, Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, Brasil. raphael@cear.ufpb.br

^d Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Antonio Nariño, Bogotá, Colombia. anibperez@uan.edu.co

Received: February 3rd, de 2016. Received in revised form: July 5th, 2016. Accepted: August 26th, 2016

Abstract

The interaction between surface and subsurface domains in a basin can be studied using a physics-based model; however, the calibration and validation processes require a high computational effort due to their complex geometry. The authors propose an alternative to reduce the computational times during the calibration model by simplifying the geometry of the watershed that applies the equivalent rectangle concept. A quasi-3D equivalent rectangle is used to define the specific soil parameters of the Lerma river basin through sensitivity analysis that will later be applied in the calibration. The simplified model can highly accurately identify the parameter range for the initial values of the calibration process as well as if the reduction in running times is significant. Thus, the rectangle equivalent concept offers an alternative to speed-up the calibration of a 3-D fully-coupled surface sub-surface model.

Keywords: Equivalent rectangle; calibration; parameterization; surface-subsurface model; hydrological modeling.

Reducción de tiempos computacionales usando el concepto de rectángulo equivalente en los modelos físicos superficiales – subsuperficiales

Resumen

La interacción entre la superficie y subsuperficie de una cuenca se puede estudiar utilizando modelos físicos, pero debido a su compleja geometría los procesos de calibración y validación requieren altos tiempos computacionales. Para ello, se propone una alternativa que permita reducir los tiempos de calibración del modelo, mediante la simplificación de la geometría de la cuenca y empleando el concepto del rectángulo equivalente. El rectángulo equivalente es usado para definir los parámetros del suelo de la cuenca del río Lerma, a través de un análisis de sensibilidad, que posteriormente son empleados dentro de la calibración. El modelo simplificado identifica con una gran precisión los rangos y valores iniciales de los parámetros utilizados para los procesos de calibración y además reduce significativamente los tiempos computacionales. Por lo tanto, el concepto de rectángulo equivalente ofrece una alternativa para acelerar la calibración de modelos acoplados superficie-subsuperficie.

Palabras Clave: Rectángulo equivalente; calibración; parametrización; modelos superficial-subsuperficial; modelación hidrológica.

1. Introduction

Modeling is a basic tool in hydrology since it enables predictions and diagnoses of the basin flows and it generally takes into account the study area's environmental

characteristics. Models can be physical, analogue, or mathematical. Physical models have been very important in the past. However, the mathematical group of models is the most easily and universally applied and the one with the most rapid development regarding having a scientific basis and

How to cite: Hurtado, J., Causapé, J., Abrahao, R. & Pérez, A. J. Reduction of computational times using the equivalent rectangle concept in the physics-based surface – subsurface models DYNA 83 (199) pp. 50-56, 2016

application [1]. According to the applicability and the objective of the simulation, there are different types of models that can be used (lumped, distributed, conceptual, physics-based, among others) and these accurately represent the analyzed natural system. Among these models, the fully-coupled physics-based models have arisen as useful tools to represent hydrological processes of a catchment area [2–9]. The study focused on the interaction between surface and subsurface flow in a basin using the physics-based hydrological models [10–12]. These describe water movement by solving the diffusive wave approximation of the shallow water equations in the overland flow, and are helped by Richard's equation. However, for the calibration and validation processes, these models need longer computational times due to the high temporal and spatial resolution required.

Considering the spatial accuracy needed in the model, the whole catchment area and its boundaries are discretized by several thousand grid nodes. Each node has specific values for the parameters used in the model. To reduce the number of calibration parameters, zones of homogeneous parameter values have been set; this is in order to evaluate and identify which parameters are available from field data and which ones need some fitting. An additional condition for the calibration parameter selection is that parameters must influence the model output, i.e. model predictions should be sensitive to changes in the values of the parameters: this feature is called identifiability.

In these types of models, parameters' values are estimated with a manual trial-and-error procedure since the automated calibration codes -which use mathematical optimization algorithms-, have difficulties with sparse data or require too many model runs [13]. Therefore, the modeler's experience is very important for the success and quality of the results.

Sensitivity studies are a suitable tool to quantify the influence of the initial set of parameters' values on the model outputs. Commonly, the methods use direct numerical differentiation, and the simulation repeats with a slightly different parameters value. There are two different kinds of sensitivity analysis, the first, local sensitivities, evaluates the sensitivity at one point of the parameter space and is usually applied in simple hydrological modeling cases. The second, global analysis, repeats the first method at many points of the parameter space. These processes require the previously mentioned huge computational effort; however, the physics-based models demand a high temporal and spatial resolution. Thus, a method to solve these problems is proposed using a geometrical simplifications model, where the topography and geology become simpler.

A quasi-3D equivalent rectangle model (ERM), similar to that presented in [14] is suggested as a substitute for the 3-D fully-coupled model, and it has the purpose of speeding up the parameterization and calibration processes. In this method, certain geometrical characteristics such as surface area and perimeter remain the same as in the original model, while other parameters are simplified, such as the elevation distribution of the watershed, which is represented by the hypsometric curve. The ERM may be applied to small to moderate catchments, in which the slope has an important feature in the basin and can be represented without taking

into account lateral variation in the geology.

The aim of the study is to show that the simplified proposed approximation can assess and identify the suitable parameter ranges and the respective sensitivity. It will then transfer it to a realistic model (3-D physic-based model), which will reduce computational times. The study focuses on the Lerma basin, which is located in the southeast of the Arba watershed in Spain.

2. Materials and methods

The first step before performing the calibration is to define the parameters that will be used in this process. This activity is referred to in the literature as parameterization [1], which involves a sensitivity analysis. Since calibration is typically manual is important to define relatively small parameter ranges that help to reduce the demanding computational times. Also, for the sensitivity study, it is adequate to identify the starting parameters' values (initial guess) as these help to reduce the number of iterations that are required.

Sensitivity is an important analytical tool for parameterization as it evaluates and quantifies the influence of the parameters in the model outputs. If the outputs are sensitive to the change of parameter values, the parameter is set as identifiable, which is a significant characteristic for parameterization. For most models, including the physics-based one, the sensitivities are calculated through numerical differentiation, which define the model output at a location (x) and a time (t), given a vector of parameters values $\mathbf{p}$ with a total of parameter values (n_{par}), defined as $f = f(x, t, \mathbf{p})$. In this case, $f(x, t, \mathbf{p})$ can be a simulated hydraulic head of the subsurface domain or a simulated discharge in the surface domain. To determine sensitivities, only the model outputs at a location and time where previous data is recorded or observations have been previously made are considered. A numerical approximation of the sensitivity $\partial f / \partial p_i$ using a forward-difference scheme can be computed as:

$$\frac{\partial f(x, t, \mathbf{p})}{\partial p_i} \approx \frac{f(x, t, \mathbf{p} + e_i \Delta p_i) - f(x, t, \mathbf{p})}{\Delta p_i} \quad (1)$$

Where e_i is the standard basis vector at position i , and Δp_i is the change (increase) that is applied to each of the analyzed parameters respective to a defined variable (henceforth perturbation).

If $f(x, t, \mathbf{p})$ depends linearly on $\mathbf{p}$, more specifically, when small perturbations generate the same effect on the model output no matter the original parameter value, $n_{par} + 1$ simulations will be needed for the computational process. One will be used for the parameter vector $\mathbf{p}$ and the other for the n_{par} for each parameter perturbation (small increment). Moreover, if the dependence of $f(x, t, \mathbf{p})$ on $\mathbf{p}$ is nonlinear, the local sensitivities can vary significantly since each parameter perturbation depends not only on the perturbed value, but also on the parameters' values that are unperturbed. In this case, global sensitivity evaluation is used, for which the local sensitivities (s_i) are calculated for

different values of each parameter studied $p_i (i, i = 1, 2 \dots n_{par})$. This increases the number of required simulations.

In our surface-subsurface model, nonlinearity is present in both governing equations, the diffusive wave, and the Richards equation. If within the parameterization, global sensitivities at different parameter values are similar, nonlinearity is not a problem. However, if sensitivity of one or more parameters changes drastically, there can be many inconsistencies. It should also be pointed out that a parameter in local sensitivity could be considered unimportant in terms of hydrological response, but it may be very important in global evaluation. Thus, for the present study and for the physics-based model, the global sensitivities analysis is used for each parameter.

As previously stated, global sensitivity can also be affected by the values chosen for the remaining parameters (i.e., unperturbed parameters) [15]; therefore, the global evaluation should be repeated for several different values in parameter space for the $n_{par} - 1$ remaining parameters. These will also increase the required simulations up to $(n_{par} + 1)(s_1 s_2 \times s_3 \times \dots \times s_{n_{par}})$. For this analysis, the computational effort is high due to the large number of simulations that are required in order to calculate an absolute global sensitivity (i.e., the total of the global sensitivity measures) in a physics-based model.

In order to estimate the global sensitivity, the Composite Scaled Sensitivities (CSS) is applied. CSS evaluates the local sensitivities for a range of parameters' values; it then groups the data, classifies each of the parameter analyzed, and finally averages the values based on the results. CSS was introduced by Hill [16] and can be expressed as [17]:

$$(CSS_i)^2 = \frac{1}{n_{obs}} [P(J^T \omega J)P] \quad (2)$$

Where n_{obs} is the total number of observations considered to calculate the composited scaled sensitivities, P is a diagonal matrix ($n_{par} \times n_{par}$) of the parameter values used to calculate the sensitivity, J is the local sensitivity matrix ($n_{obs} \times n_{par}$) containing all terms of the form $\partial f / \partial p_i$, and ω is a weighting matrix ($n_{obs} \times n_{obs}$). For the purposes of comparison, in order to evaluate the applicability of the simplified model proposed, CSS are computed for both the simplified model and the real catchment.

In conclusion, the parameterization process in the physics-based surface-subsurface model includes a global sensitivity analysis. This helps to identify the parameters that are important in model fitting and at what ranges of values these parameters are sensitive. This would help to define the correct parameter values for the calibration.

After the relevant parameters are defined, calibration is performed. The purpose of the calibration is to establish that the model can reproduce field measurements and estimate parameter values based on measured quantities. Calibration can be performed manually or automatically. While manual calibration is deemed to be subjective due to the arbitrary decision of the modeler about the performance of the model, automatic calibration may imply significant computation times that are not affordable in very complex applications.

The choice of the calibration method depends on the modeler and is conditioned by the model running time.

In order to test whether the calibrated model performs well, in the sense that the deviations between the measured and simulated values are within an acceptable range, an χ^2 -test of the objective function normalized by the covariance matrix of the error, C_{yy} , is often calculated. In particular, the optimization function $\frac{\chi^2}{DoF} = 1$ is used, where DoF is the model's degree of freedom, which is defined as the difference between the number of observations and the number of calibration parameters [11].

2.1. A quasi-3D equivalent rectangle model (ERM)

In order to reduce the computational times in the parameterization, the geometrical characteristics of the catchment were simplified by using the equivalent rectangle. What this method does is convert the watershed 3-D fully coupled model into a quasi-3-D equivalent rectangle. The model total surface area A and the perimeter P_e are preserved; these variables are useful to be able to determine the width (w) and length (l) of the ERM base plane. The solution for w and l are the following systems:

$$wl = A \quad (3)$$

$$2(l + w) = P_e \quad (4)$$

The previous equations follow the equivalent rectangle concept, which was introduced by Roche [18]. They study the influence of the geometrical characteristics of a basin on its hydrological response. However, the topographic structure is simplified into a single hillslope, which keeps the hypsometric curve of the natural basin [14]. The hypsometric curve is an empirical cumulative distribution function, $F_n(z)$, that is discretized by a digital elevation model (DEM). Since the resolution (cell size) of the DEM is known, the elevation value is associated with frequency $\frac{\Delta A}{A}$, where ΔA is the area of one DEM cell, and A is the total area of the watershed that is plotted against the elevation values z_i . The cumulative frequency $\left(\frac{\Delta A}{A}\right)$ is plotted along the abscissa and the elevation along the ordinate. This can be expressed as:

$$F_n(z) = P(x \leq z) \approx \frac{1}{u} \sum_{i=1}^u I(x \leq z) \quad (5)$$

Where u , is the DEM's number of cells and I is an indicator of a random variable, which is set to 1 when the property $x \leq z$ is accomplished. Otherwise the value is zero.

Since the rectangle is uniform in the y-direction, w is set to be uniform and a quasi-3D model is assumed. For the subsurface domain, given the DEM, the ERM can be reproduced by representing the hypsometric curve of the aquifer top and bottom surface. Thus, it assumes that vertical geometry is simple where the catchment boundaries of the surface coincide with the boundaries of the subsurface. In order to test the ERM in the parameterization process of the physic-based surface-subsurface model we used the Lerma catchment.

3. Case study: Lerma basin

The Lerma basin has an area of approximately 7.5 km² and is located south-east of the Arba catchment, which is within the Ebro basin [2,9]. The catchment is a semi-arid area that was formerly fallows land that was transformed into an irrigation agriculture catchment in 2006. It has two lithological units that are characterized by a quaternary deposit, and the overlying tertiary bedrock is made of lutites and marlstones [9]. The upper unit represents a phreatic aquifer, hereafter called “glacis”, that is seasonally fed by precipitation and irrigation (agriculture is a strong activity at the basin). The glacis has permeable characteristics, it is unconsolidated, and has clastic deposits that generally are present in arid or semi-arid climates. The tertiary unit represents an aquitard, hereafter called “buro”. This formation is relatively sensitive to weathering and fracturing processes, and there is possible filtration of water from upper layers [9]. Despite being an aquitard, the model includes the top part of this formation for the simulation.

A digital elevation model (DEM) of 25 m cell-sized was used. Hydrological information (daily rainfall, air temperature, wind velocity, relative humidity and solar radiation) was obtained from a climatological station located five kilometers from the Lerma basin. A soil characterization campaign was performed in 10 different points of the Lerma basin, in order to obtain soil properties. The samples collected (depth of one meter) were classified by different textures (clayey, clayey-loam and sandy-clayey-loam) and bulk densities. Porosities ($\emptyset$) were calculated from soil densities at saturated and dry conditions; specific storage (S_s) and residual water saturation ($S_{w,r}$) were defined from literature. To define hydraulic conductivities (k_s), information from a pumping test performed within the Arba catchment was used. Values obtained were between 1 and 7.7 m/d, which are larger than the ones found in the literature (0.005 and 1.0 m/d) for the same lithologic unit. To determine the van-Genuchten parameters (used in the subsurface domain, together with Richards equation), α and n , we faced some difficulties as in the literature review there are only typical values for these parameters [19,20]: α varies between 0.05 and 6.0 m⁻¹, while n is between 1.01 and 2. As previously described, the soil properties reflect a huge uncertainty in the parameter values. For this reason the hydraulic conductivity and the van-Genuchten parameters are taken into account for the parameterization process.

Another parameter that commonly has a significant influence on hydrological models is the overland flow friction coefficient. Previous investigations [21] suggest that the overland flow friction coefficient may have a very high sensitivity on the calibration of flow-coupled models. Therefore, Manning’s roughness coefficient, n_m , which is very often used to express overland flow friction, was also subject to investigation during the parameterization of the Lerma basin model.

Boundary conditions for the ERM are set to no flow except for the outlet that is defined as critical depth. This is similar to the conceptual model of the Lerma Basin presented in [2,3]. These assumptions were incorporated into the ERM in order for the results to be comparable. Subsurface

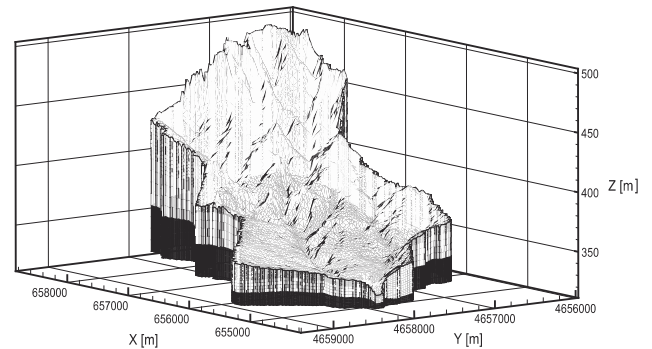
parameters were assumed to be isotropic in the whole domain. For the initial conditions of the model, the dynamic water balance approach presented by [9] was used. Following this approach, the ERM was repeatedly forced with one-year meteorological input data (rainfall and evapotranspiration) until a steady-state was reached.

4. Results

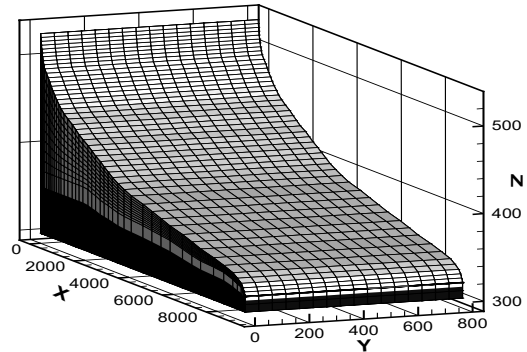
As previously mentioned, a simplification of the Lerma basin 3-D fully-coupled was performed in order to reduce the computational times in the calibration process of a physics-based surface-subsurface model. The main idea behind reducing these times was to achieve an adequate parameterization (correct choice of the calibration parameters), where a quasi-3D model based on the concept of equivalent rectangle was used to study the sensitivity of certain parameter ranges. In the simplification, the elevation distribution of the watershed is represented by the hypsometric curve.

In the ERM, glacis and buro units have uniform parameter values (area-weighted average value). This results in a simplified two-layer scheme in the subsurface structure; the first is a phreatic aquifer overlying an aquitard. Both the 3-D fully coupled model (hereafter called the complex model) and the Lerma basin ERM are shown Fig 1.

The parameters chosen for the parameterization process are hydraulic conductivity (k_s), the van Genuchten parameters,



a) Lerma basin 3D-model: gray: glacis (aquifer) and black: tertiary materials (aquitard)



b) ERM: gray: glacis (aquifer) and black: tertiary materials (aquitard)

Figure 1. Lerma basin model and the simplified model, Equivalent Rectangle (ERM)

Source: Author’s own design

Table 1.

Parameter range for the sensitivity studies of saturated hydraulic conductivity, k_s , inverse of the air entry pressure, α , pore distribution factor, n , and Manning's roughness coefficient (n -manning) for the Lerma basin.

Parameter	Min. Value	Max. Value	Δp_i
K_s [m/d]	0.04	8.64	0.01
α [m ⁻¹]	0.01	6.0	0.005
n [-]	1.0	3.0	0.05
n – Manning [s/m ^{1/3}]	0.03	0.05	0.001

Source: Author's own design

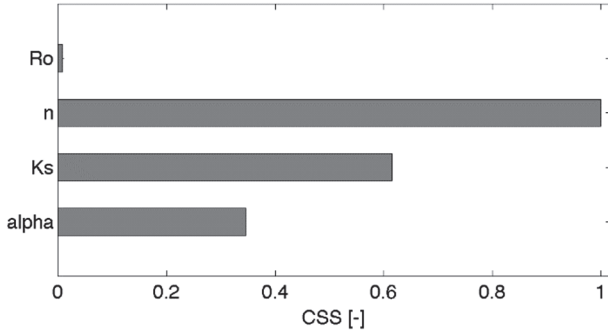


Figure 2. Composite – Scale Sensitivities (CSS) calculated using the Equivalent Rectangle Model (ERM).

Source: Author's own design

inverse air entry pressure (α), and pore distribution factor (n). The Manning's roughness coefficient (Ro) was also being investigated. Table 1 presents the range of the parameter values and the perturbation (Δp_i) used for each parameter (p_i) in the sensitivity analysis. When this analysis was performed, only physical values of the soils and predominant land-use within Lerma basin [9] were tested.

The first step in the parameterization process is to define the parameters that have a relevant effect on the hydrological response of the watershed. Thus, we undertook a sensitivity assess and then a ranking parameter (i.e. k_s , α , n and Ro) was calculated using the ERM. Larger CSS values indicate parameters that are more meaningful. CSS' Fig 2. presents the CSS normalized ranking, and it can be observed that the CSS value for Manning's roughness coefficient is very low compared to k_s , α , and n ; this is also detailed in Perez et al. [19]. Hence, the parameterization exercise presented in this paper focused on the remaining three parameters (k_s , α , and n). It is important to mention that the values of Ro used ranged from 0.03 to 0.05 as these values correspond to values are typically presented in the literature in terms of the cropping patterns associated with the Lerma Basin.

In order to speed up the calibration, it is important to narrow down the dimension of the significant parameter space and set the range for which the parameters are sensitive. In order to do this, we used multiple simulations with different parameter value combinations for k_s , α , and n . We calculated CSS values for each range of parameters, we assumed the weighting factor (ω) to be the inverse of the measurement error matrix (C_{yy}^{-1}), and we set a relative error of 10% for the discharge measurements. The results provided

a ranking for each parameter that shows the variation of the sensitivity in the parameter space (see Fig 3). This helps to reduce the parameter range for calibration and consequently the computational times. For the three rankings, it is possible to observe values for which the sensibility on the model output is higher.

To demonstrate the applicability of the ERM, the sensitivity study (CSS) was also performed using the 3-D fully coupled model of the Lerma basin with more than 200,000 elements. For a comparable analysis between these two models, the homogeneous glaciais was also assumed in the complex model. The CSS was calculated as having equivalent conditions to those used in the ERM, i.e. having equivalent combinations of parameter values, precipitation, evapotranspiration, and irrigation data. The results of the CSS values for the ERM and the 3-D fully-coupled model are shown in Fig 4.

The calculated CSS values for both models are very similar and they show the applicability of the simplification on parameter studies. According to the figure, values of CSS for the inverse of the air-entry pressure, α , are higher (around 1). They decrease around 3 and 5 and increase again for higher values of α . CSS for n show higher values around $n = 1.2$. CSS values decrease for higher values of n . For the case of k_s , CSS values slightly decrease when of k_s values increase.

To further investigate the applicability of the ERM, the model is used in the Lerma basin calibration process. [2] proposed a calibration of the Lerma basin, but as it is highlighted by [3], the approach presented is slow. In this study, the ERM is used to speed-up the calibration process.

To calibrate the model, instead of using the complex model the ERM was used. Also, values of the calibration parameters (i.e. k_s , α , and n) were systematically changed by using an automatic approach performed using the software PEST [22] within the pre-defined ranges. This was undertaken until a reasonably good performance of the model, compared to the measured data, was found. To improve the agreement between simulated and measured data, the set of calibrated parameters obtained using the ERM was introduced to the complex model. Five more iterations were then needed to achieve the model's best performance.

While with the original approach (using the complex model) more than 100 manual iterations that took 50,000 minutes were needed to achieve the best performance, the approach using the ERM that included more than 1000 automatic iterations and five iterations with the complex model only took less than 7000 minutes. This reduction in the time required to calibrate the model was more than 700%.

In Fig 5, the evolution of the performance of the model expressed as the ratio X^2/DoF is presented. As is shown, the optimal value of the ratio (best performance of the model) was reached after 1000 automatic iterations using the ERM model and five more iterations using the complex model.

Calibrated values obtained for the glaciais formation were $k_s = 0.95 \text{ m/d}$, $\alpha = 0.8 \text{ 1/m}$, and $n = 1.54 [-]$; and for the buro formation $k_s = 0.01 \text{ m/d}$, $\alpha = 1.0 \text{ 1/m}$, and $n = 1.35 [-]$, are very close to the average calibrated values reported by [2,3] for the glaciais and the buro.

5. Conclusions

The reduction in running times with the simplification of the watershed geometry is significant: while a single run with the 3-D fully-coupled model of the Lerma basin takes between 420 and 600 minutes, for the ERM it only takes between 3 and 8 minutes. This means, that for a sensitivity study of a physics-based superficial-subsuperficial model for a one year simulation of the Lerma basin (around 1000 runs) using a single 1.3 GHz Intel Core i5 computer, it would take around 300 days to obtain representative results. With the ERM, it would take less than four days using a computer with the same specifications. The situation appears to be worse when more layers are used, as well as when feedbacks between soil moisture and evapotranspiration are used as simulations for more than 37 hours for a single run and they have been reported for the same basin [3].

Simplification of the geometry of the basin using the rectangle equivalent concept appears to be a good approximation to speed up the calibration of 3-D fully-coupled, physics-based models.

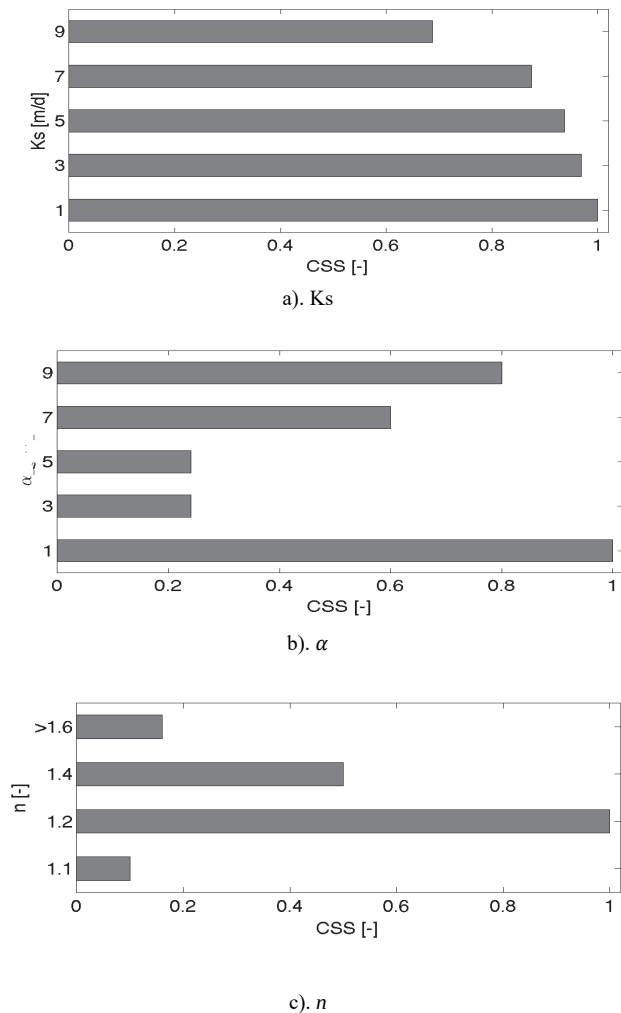


Figure 3. Sensitivity analysis using the ERM.
Source: Author's own design

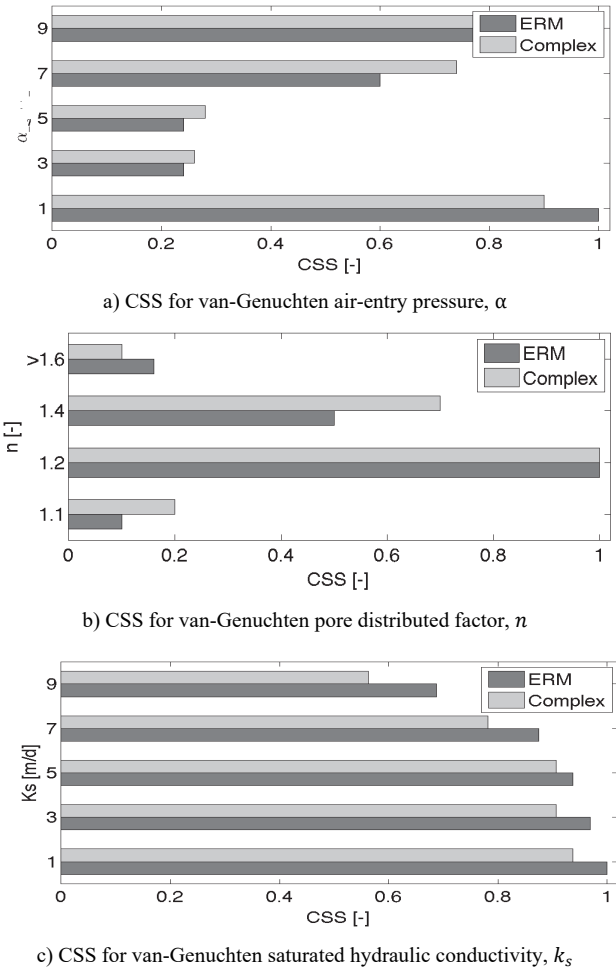


Figure 4. CSS calculated for the Lerma basin's complex and simplified models (ERM).

Source: Author's own design

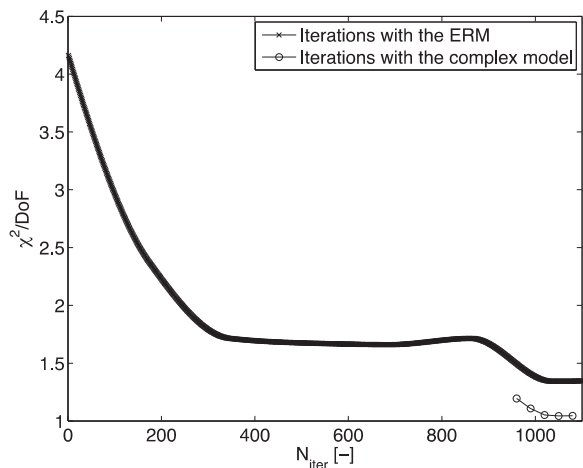


Figure 5. Calibration process using a combination of the ERM and the complex model.

Source: Author's own design

By speeding up the process, the ERM may also help to reduce subjectivity during the calibration, promote the use of

more appropriate automatic algorithms, and improve the performance of physics-based, fully-coupled hydrologic models.

Results suggest that the ERM may be applied for small to moderate catchments where the slope denotes an important feature in the basin and it can be represented without taking into account lateral variation in the geology.

References

- [1] Refsgaard, J. and Storm, B., Construction, calibration and validation of hydrological models. Distributed hydrological modelling. pp. 41-54 69-97, 1996.
- [2] Pérez, A.J., Abrahão, R., Causapé, J., Cirpka, O. and Bürger, C., Simulating the transition of a semi-arid rainfed catchment towards irrigation agriculture. *J Hydrol.*, 409(3), pp. 663-681, 2011. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.08.061.
- [3] Von Gunten, D., Wöhling, T., Haslauer, C., Merchán, D., Causapé, J. and Cirpka, O.A., Efficient calibration of a distributed pde-based hydrological model using grid coarsening. *J Hydrol.*, 519, pp. 3290-2304, 2014. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.10.025.
- [4] Li, Q., Unger, A.J.A., Sudicky, E.A., Kassenaar, D., Wexler, E.J. and Shikaze, S., Simulating the multi-seasonal response of a large-scale watershed with a 3D physically-based hydrologic model. *J Hydrol.*, 357(3), pp. 317-336, 2008. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2008.05.024.
- [5] Maxwell, R.M. and Kollet, S.J., Quantifying the effects of three-dimensional subsurface heterogeneity on Hortonian runoff processes using a coupled numerical, stochastic approach. *Adv Water Resour.*, 31(5), pp. 807-817, 2008. DOI: 10.1016/j.advwatres.2008.01.020.
- [6] Smerdon, B.D., Mendoza, C.A. and Devito, K.J., Simulations of fully coupled lake-groundwater exchange in a subhumid climate with an integrated hydrologic model. *Water Resour Res* [Online], 43(1), 2007 [cited 2016 Aug 5]. DOI: 10.1029/2006WR005137.
- [7] Dong, Q., Xu, D., Zhang, S., Bai, M. and Li, Y., A hybrid coupled model of surface and subsurface flow for surface irrigation. *J Hydrol.*, 500, pp. 62-74, 2013. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.07.018.
- [8] Weill, S., Mazzia, A., Putti, M. and Paniconi, C., Coupling water flow and solute transport into a physically-based surface-subsurface hydrological model. *Adv Water Resour.*, 34(1), pp. 128-136, 2011. DOI: 10.1016/j.advwatres.2010.10.001.
- [9] Tian, Y., Zheng, Y., Wu, B., Wu, X., Liu, J. and Zheng, C., Modeling surface water-groundwater interaction in arid and semi-arid regions with intensive agriculture. *Environ Model Softw.*, 63, pp. 170-184, 2015. DOI: 10.1016/j.envsoft.2014.10.011.
- [10] Freeze, R.A. and Harlan, R.L., Blueprint for a physically-based, digitally-simulated hydrologic response model. *J Hydrol.*, 9(3), pp. 237-258, 1969. DOI: 10.1016/0022-1694(69)90020-1.
- [11] Panday, S. and Huyakorn, P.S., A fully coupled physically-based spatially-distributed model for evaluating surface/subsurface flow. *Adv Water Resour.*, 27(4), pp. 361-382, 2004. DOI: 10.1016/j.advwatres.2004.02.016.
- [12] VanderKwaak, J.E., Numerical simulation of flow and chemical transport in integrated surface-subsurface hydrologic systems. University of Waterloo, 1999.
- [13] Poeter, E.P., Hill MC. UCODE, A computer code for universal inverse modeling. *Comput Geosci.*, 25(4), pp. 457-462, 1999. DOI: 10.1016/S0098-3004(98)00149-6.
- [14] Pérez-García, A., Physics-based numerical modeling of surface-groundwater flow and transport at catchment scale. Universität Tübingen, 2011.
- [15] Van Griensven, A., Meixner, T., Grunwald, S., Bishop, T., Diluzio, M. and Srinivasan, R., A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *J Hydrol.*, 324(1-4), pp. 10-23, 2006. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.09.008.
- [16] Hill, M.C., A computer program (MODFLOWP) for estimating parameters of a transient, three-dimensional ground-water flow model using nonlinear regression. In Denver, Colorado, 1992.
- [17] Hill, M.C., Comment on Two statistics for evaluating parameter identifiability and error reduction, by John Doherty and Randall J. Hunt. *J Hydrol.*, 380(3-4), pp. 481-488, 2010. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.10.011.
- [18] Roche, M., Hydrologie de surface. Paris, France: Gauthier-Villars et ORSTOM, 1963.
- [19] Perez, A.J., Abrahao, R., Causape, J., Cirpka, O.A. and Claudius, M.B., Implications of diffusive wave cascading plane simulations for the study of surface water - groundwater interaction with a 3-D fully - integrated catchment model. In: XVIII International Conference on Water Resources. Barcelona, 2010.
- [20] Carsel, R.F. and Parrish, R.S., Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resour Res.*, 24(5), pp. 755-769, 1988. DOI: 10.1029/WR024i005p00755.
- [21] Delfs, J.-O., Park, C.-H., Kolditz, O., A sensitivity analysis of Hortonian flow. *Adv Water Resour.*, 32(9), pp. 1386-1395, 2009. DOI: 10.1016/j.advwatres.2009.06.005.
- [22] Moore, C. and Doherty, J., Role of the calibration process in reducing model predictive error. *Water Resour Res.*, 41(5), pp. 1-14, 2005. DOI: 10.1029/2004WR003501.

J. Causapé, is a geological scientist who studied at the Universidad de Zaragoza, Spain and has a PhD. in Geosciences from the same University. He was associated professor at the Universidad de Zaragoza between 2002-2003 and a Postdoc fellow at the University of Wageningen, Netherlands and Universidad Politécnica de Catalunya, Spain, between 2004 and 2006. In 2008, he joined the Instituto Geológico Minero de España (IGME), as associated researcher in hydrogeology and environmental quality, where he has conducted several research projects and published more than 40 papers. ORCID: 0000-0002-9165-9710.

R. Abrahao, his BSc. degree in Agricultural Engineering in 2004 from the Universidade Federal de Campina Grande, Brazil and his MSc. degree in 2006 from the Universidade Federal de Paraíba, Brazil. In 2011, he was awarded his PhD. in Chemical Engineering from the Universidad de Zaragoza, Spain. Since 2012 he has been working as professor at the Universidade Federal de Paraíba. He has published more than 20 papers and participated in more than 40 events. ORCID: 0000-0002-2945-2604.

A.J. Perez, received his BSc. in Civil Engineering from the Universidad Javeriana, Colombia. He was awarded his MSc. from the same university and wrote his thesis on geostatistics in hydrogeology. Subsequently, he joined the environmental engineering Department at the Universidad Antonio Nariño, Colombia and lectured on water resources and numerical modeling. In 2007, he started his PhD. and joined the Hydrogeology group at the Center of Applied Geosciences at the University of Tübingen, Germany. In 2011, he was awarded his PhD and his thesis was based on physics-based numerical modeling on catchment scale. He has currently been working as assistant professor at the Universidad Antonio Nariño, Colombia and consultant specialist of the Colombian Government in water resources-related matters. ORCID: 0000-0001-5581-013X

J. Hurtado-Patiño, her BSc. in Environmental Engineering degree from the Universidad de Los Andes, Colombia. She worked as a young researcher in the field of anaerobic bioreactors for the treatment of industrial wastewater in the Environment Research Center – CIIA at the Universidad de Los Andes, Colombia. She also has experience in environmental consulting focused on prevention and mitigation of environmental impact for public and private industries. She is currently working as a graduate assistant researcher at the Universidad Antonio Nariño, Colombia. ORCID: 0000-0001-6257-7081.

Automated detection of photoreceptors in *in-vivo* retinal images

Piero Rangel-Fonseca,^{a,b} Armando Gomez-Vieyra,^c Daniel Malacara-Hernandez^a & Mario C. Wilson^d

^a Centro de Investigaciones en Óptica, León, Guanajuato, México. pierorf@gmail.com, dmalacara@cio.mx

^b Laboratorio de Visión Robótica e Inteligencia Artificial, Universidad de Guanajuato, Salamanca, Guanajuato, México. piero@laviria.org

^c Laboratorio de Sistemas Complejos, Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco, D.F., México. agvte@correo.azc.uam.mx

^d Centro de Investigaciones en Óptica, León, Guanajuato, 37150, México.

^d CONACYT - CICESE, Ensenada, B.C. México. mwilson@cicese.mx

Received: December 8th, de 2015. Received in revised form: August 8th, 2016. Accepted: August 26th, 2016

Abstract

The inclusion of adaptive optics (AO) into ophthalmic imaging technology has allowed the study of histological elements of retina *in-vivo*, such as photoreceptors, retinal pigment epithelium (RPE) cells, retinal nerve fiber layer and ganglion cells. The high-resolution images obtained with ophthalmic AO imaging devices are rich with information that is difficult and/or tedious to quantify using manual methods. Thus, robust, automated analysis tools that can provide reproducible quantitative information about the tissue under examination are required. Automated algorithms have been developed to detect the position of individual photoreceptor cells and characterize the RPE mosaic. In this work, an algorithm is presented for the detection of photoreceptors. The algorithm has been tested in synthetic and real images acquired with an Adaptive Optics Scanning Laser Ophthalmoscope (AOSLO) and compared with the one developed by Li and Roorda. It is shown that both algorithms have similar performance on synthetic and cones-only images, but the one here proposed shows more accurate measurements when it is used for cones-rods detection in real images.

Keywords: Photoreceptor; adaptive optics; image processing.

Detección automatizada de fotorreceptores en imágenes retinianas *in-vivo*

Resumen

La inclusión de la óptica adaptativa (adaptive optics, AO) en la tecnología de imágenes oftálmicas ha permitido el estudio *in-vivo* de los elementos histológicos de retina, como los fotorreceptores, células del epitelio pigmentario de la retina (retinal pigment epithelium, RPE), la capa de fibras nerviosas de la retina y células ganglionares. Las imágenes de alta resolución obtenidas con dispositivos oftálmicos con AO son ricas en información, que es difícil y/o tediosa de cuantificar por medio de métodos manuales. Por lo tanto, se requieren herramientas de análisis automatizadas robustas que puedan proporcionar información cuantitativa reproducible del tejido bajo examen. Algoritmos automatizados han sido desarrollados para detectar la posición de células individuales fotorreceptoras y caracterizar el mosaico RPE. En este trabajo, se presenta un algoritmo para la detección de los fotorreceptores. El algoritmo ha sido probado en imágenes sintéticas y reales adquiridas con un oftalmoscopio de barrido láser con óptica adaptativa (Adaptive Optics Scanning Laser Ophthalmoscope, AOSLO) y comparado con el desarrollado por Li y Roorda. Se muestra que ambos algoritmos tienen un rendimiento similar en imágenes sintéticas e imágenes con sólo conos, pero el algoritmo propuesto muestra mediciones más precisas cuando se utiliza para la detección de conos-bastones en imágenes reales.

Palabras clave: Fotorreceptores; óptica adaptativa; procesamiento de imágenes.

1. Introduction

Typically, the retina is shown to have several layers: inner limiting membrane, retinal nerve fiber layer (RNFL), retinal ganglion cell layer, inner plexiform layer, inner nuclear layer,

outer plexiform layer, outer nuclear layer, external limiting membrane, photoreceptor layer and retinal pigment epithelium (RPE) layer [1]. The RNFL conducts signals from the eye. The ganglion cell layer contains the cell bodies of ganglion cells and displaced amacrine cells; the ganglion cell

How to cite: Rangel-Fonseca, P., Gomez-Vieyra, A., Malacara-Hernandez, D. & Wilson M. C. Automated detection of photoreceptors in *in-vivo* retinal images DYNA 83 (199) pp. 57-62, 2016

dendrites are in the plexiform layer, where they receive bipolar cell and amacrine cell inputs, while their axons are in the RNFL. The photoreceptors are responsible for visual transduction, the transformation of light energy into electrical energy, a process called isomerization [2,3]. Finally, the RPE is vital for the maintenance of photoreceptor function, since it contains nutrients and enzymes [4].

In the retina, there are two types of photoreceptors: cones and rods. Structurally, the photoreceptors are different in shape, as their names indicate, and in size, rods being longer than cones, and cones wider than rods; they also have different functional properties that affect our perception. Cones cover all the retina, although higher density is in the fovea, where there are no rods. There are about 120 million rods, and they are in the periphery of the retina [2,4,5].

It is very important to know where the photoreceptors, cones and rods, are located and how many photoreceptors there are in the retina, which could be used to monitor the evolution of therapies for ocular globe diseases. A method previously used for cell detection and their characterization is shown in [6]; it uses adaptive optics scanning light ophthalmoscopy (AOSLO), which has become an important tool for the study of retinal diseases [6-22]. Our interest is primarily in detecting the cones and rods. Since changes in the photoreceptor mosaic may precede cell death, it is possible that morphometric changes can be measured before larger damages are observed, allowing early therapeutic intervention.

Accuracy in the detection and classification of patterns in biomedical images is central to detecting and monitoring tissue damage, as well as to quantifying its extent. Hence, it is necessary to have robust and reliable methods for classifying and quantifying retinal structures in in-vivo retinal images. This is the reason why, in recent years, there has been an increased attention to this area [6-8,22-29], and it spurred our interest in developing a more efficient algorithm for the detection of retinal cones and rods. The algorithm that we propose quantifies and locates the photoreceptors using the local maximum value, maximum absolute deviation and binary operations.

This paper is organized as follows. In section 2, the methods used for the development of the algorithm, as well as the generation of synthetic and real AO images, are discussed. In section 3, the comparison between the algorithm proposed by Li and Roorda and the one here presented is undertaken. Finally, the main discussion and conclusions are in section 4.

2. Method

2.1. Algorithm

The aim of the algorithm is to quantify and locate photoreceptors in in-vivo retinal images. Fig. 1 shows the schematic representation of the algorithm.

2.1.1. Adaptive threshold using local maximum values

Let $I(x,y)$ be a bidimensional intensity function (a matrix) where x and y are the spatial coordinates of a pixel; let $I_{max}(x,y)$ be the local maximum value within a window of 3x3 pixels, being:

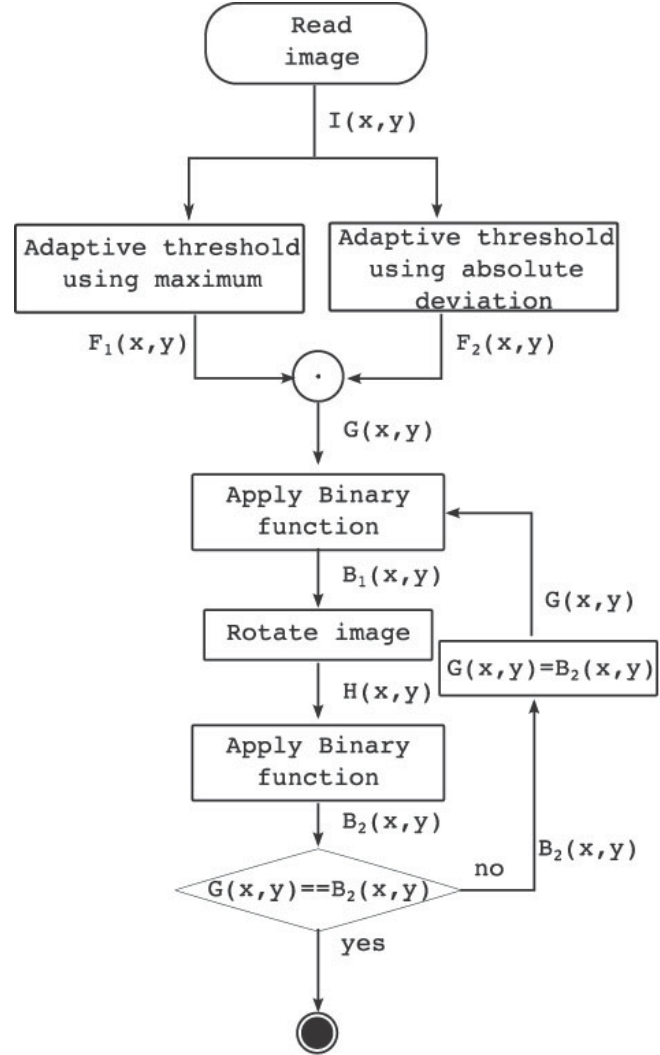


Figure 1. Schematic representation of the algorithm

Source: The authors

$$I_{max}(x,y) = \max\{I(x+s,y+t) | -1 \leq s \leq 1 \text{ and } -1 \leq t \leq 1\} \quad (1)$$

Thereby, $F_1(x,y)$ is defined as follows:

$$F_1(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{if } I(x,y) == I_{max}(x,y) \\ 0 & \text{if } I(x,y) \neq I_{max}(x,y) \end{cases} \quad (2)$$

2.1.2. Adaptive threshold using absolute deviation

Let $M(x,y)$ be the maximum absolute deviation (Eq. 3), which determines the sufficient variance in intensity, with n being the number of elements, and let $I_{max}(x,y)$ be the local maximum value (Eq. 1). Then, let m be a threshold that determines the sufficient variance in intensity of $I(x,y)$.

$$M(x,y) = \left(\sum_{s=-1}^1 \sum_{t=-1}^1 |I(x+s,y+t) - I_{max}(x,y)| \right) / n \quad (3)$$

Thereby, $F_2(x,y)$ is defined as shown in Eq. 4.

$$F_2(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{if } M(x, y) \geq m \\ 0 & \text{if } M(x, y) < m \end{cases} \quad (4)$$

The next step in this stage is the generation of a binary image $G(x, y)$ using Eq. 5, through the logic operation AND of the results from Eqs. 2 and 4.

$$G(x, y) = F_1(x, y) \cdot F_2(x, y) \quad (5)$$

2.1.3. Binary operations

Eq. 6 is a binary function that works within a window of 3 X 3 pixels; it was designed to reduced over-detection of cells, where over-detection of a cell can be represented as elements $a_1, a_2, \dots, a_{33}$ shown in Figs. 2. Element a_1 from Fig. X can be represented by a binary function $a_1 = \overline{i_{11}} + i_{12} + i_{13} + i_{21} + \overline{i_{22}} + i_{23} + i_{31} + i_{32} + i_{33}$; where $i_{11} = I_{(x-1, y-1)}$, $i_{12} = I_{(x, y-1)}$, $i_{13} = I_{(x+1, y-1)}$, $i_{21} = I_{(x-1, y)}$, $i_{22} = I_{(x, y)}$, $i_{23} = I_{(x+1, y)}$, $i_{31} = I_{(x-1, y+1)}$, $i_{32} = I_{(x, y+1)}$ and $i_{33} = I_{(x+1, y+1)}$; which means that the central element i_{22} is eliminated to avoid over-detection. Thus, every element from Fig. 2 can be represented by a binary function where the central element i_{22} has been eliminated, and it is based on that fact that every element can be represented by a binary function, and the combination of all these functions yields cell location. This equation was reduced by the Quine-McCluskey method; afterward, Postulates and Theorems of Boolean Algebra were used to minimize it. This binary function is applied onto the image $I(x, y)$. Later, the obtained image is rotated 180 degrees, $H(x, y) = \text{rotate180}(B(x, y))$, with the goal of eliminating the multiple detection in the opposite direction. Then, Eq. 6 is applied onto the rotated image $H(x, y)$. Finally, the result is rotated back to the original orientation. This process is performed until algorithm convergence is reached.

$$B(x, y) = i_{22} \cdot [\overline{i_{11}} + i_{13} + i_{23} + i_{33} + i_{32} + i_{31}] \cdot [i_{11} + \overline{i_{13}} + i_{32} + i_{31} + i_{21} + (i_{33} \cdot \overline{i_{23}})] \cdot [i_{13} + i_{23} + i_{33} + \overline{i_{21}} + (i_{12} \cdot \overline{i_{31}}) + (\overline{i_{11}} \cdot i_{32})] \cdot [\overline{i_{12}} + i_{33} + i_{32} + i_{31} + (\overline{i_{11}} \cdot i_{23}) + (\overline{i_{13}} \cdot i_{21})] \cdot [i_{11} + i_{12} + \overline{i_{23}} + \overline{i_{33}} + i_{31} + i_{21} + (\overline{i_{13}} \cdot i_{32})] \cdot \{i_{11} + i_{12} + i_{13} + \overline{i_{32}} + (i_{23} + \overline{i_{31}}) \cdot [\overline{i_{33}} + i_{21} + (i_{23} \cdot \overline{i_{31}})]\} \quad (6)$$

2.2. Synthetic images

The synthetic images were generated using a pre-determined number of pseudo-photoreceptors, which in turn were generated through the use of a Gaussian function and an elliptical one [30]. The pseudo-photoreceptors varied at random in terms of size and reflectance, and they were symmetrically (in equidistant square and hexagonal arrays) and randomly distributed. Background illumination was added to each of the generated images, which corresponds to the illumination in the real images acquired with the AOSLO utilized at the University of Rochester [18].

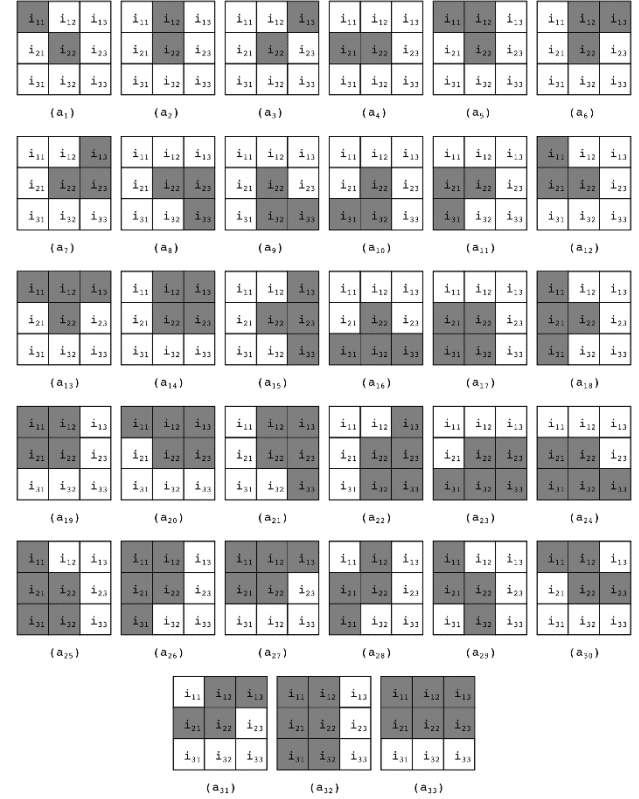


Figure 2. Masks used to obtain the binary function $B(x, y)$, Eq. 6. Source: The authors

2.3. Real AO images

We used AOSLO images obtained for current and previous experiments at the Center for Visual Science of the University of Rochester to test the algorithm. Data shown from human participants are from experiments that were approved by the Research Subjects Review Board at the University of Rochester and adhered to the tenets of the Declaration of Helsinki. Participants gave informed written consent after the nature of the experiments and any possible risks were explained both verbally and in writing.

3. Results

The algorithm developed by Li and Roorda [6] (Algorithm 1) and the algorithm here proposed (Algorithm 2) have been tested on synthetic and real images, Fig. 3 shows the results obtained with both algorithms on synthetic images. In the caption, we show the color code that was used to identify where a pseudo-cell was positioned and the results obtained by each algorithm.

For each function-distribution combination, 1000 synthetic images of 100x100 pixels in size were generated. To those images, we applied algorithms 1 and 2, and the results obtained were later evaluated. The outcome of such evaluation is shown in Tables 1 and 2. Table 1 shows the relative error obtained for each of the combinations, whereas Table 2 shows the number of cells that were correctly detected as corresponding exactly with the place where the center of the pseudo-cells had been positioned.

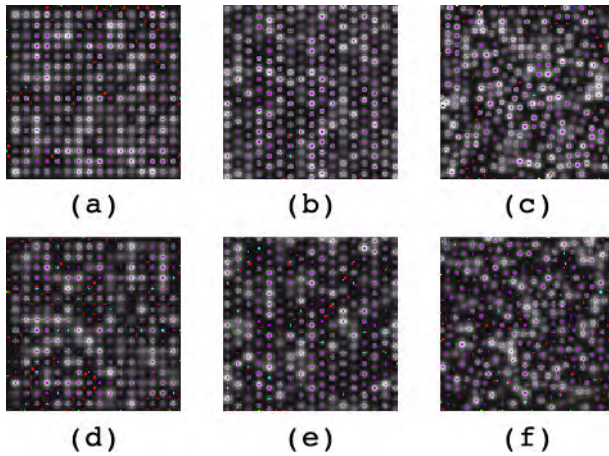


Figure 3. Synthetic images results. (a) Gaussian-Square, (b) Gaussian-Hexagonal, (c) Gaussian-Random (d) Elliptical-Square, (e) Elliptical-Hexagonal and (f) Elliptical-Random. Purple points represent correct detection for both algorithms; yellow points represent where both algorithms fault detecting a cell; cyan points represent where only algorithm 2 detected an actual result; magenta points represent where only algorithm 1 detected correctly; red points represent a wrong detection with algorithm 1; green points represent a wrong detection with algorithm 2; blue points represent non detected cells.

Source: The authors

Table 1.

Relative error obtained from synthetic images

Function	Distribution	Pseudo-cells (mean)	Relative error (%)	
			Algorithm 1	Algorithm 2
Gaussian	Square	256.00	15.18	6.10
	Hexagonal	289.00	0.41	0.42
	Random	288.14	9.36	3.15
Elliptical	Square	256.00	21.77	5.8
	Hexagonal	289.00	3.12	3.73
	Random	288.45	14.09	4.62

Source: The authors

Table 2.

Correctly detected from synthetic images

Function	Distribution	Pseudo-cells (mean)	Correctly detected (%)	
			Algorithm 1	Algorithm 2
Gaussian	Square	256.00	99.16	100
	Hexagonal	289.00	99.42	100
	Random	288.14	96.70	97.71
Elliptical	Square	256.00	91.54	100
	Hexagonal	289.00	93.59	100
	Random	288.45	92.16	97.70

Source: The authors

4. Discussion and conclusions

For all the images, both real and synthetic, a threshold $m = 2.0$ was used to calculate the maximum absolute deviation M_{ij} , and it was determined empirically; it is based on different tests that we conducted. If $m > 2.0$, we have a very prominent peak, but if $m < 2.0$, there is a tendency to flatness. The manual count presented in Table 3 was carried out on the basis of the authors' appreciation. For algorithm [6], $\text{cut_off_frequency} = 0.61\pi$ and $\text{threshold} = 0$ were used to test the all the images.

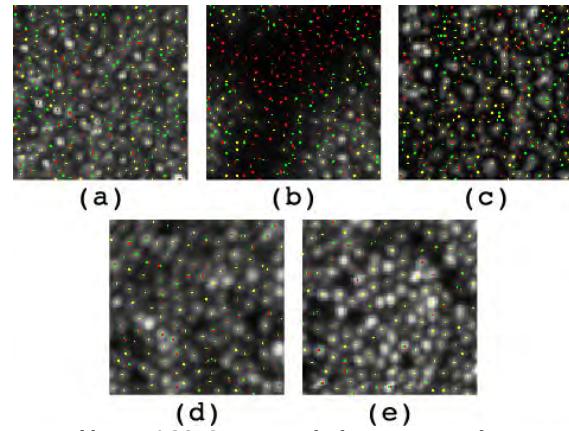


Figure 4. Real human AOSLO images with photoreceptors. red points represent the cell location detected with algorithm 1; green points represent the cell location detected with algorithm 2; and yellow points represent the result of algorithm 1 and 2.

Source: The authors

Table 3.

Cells detected in real AOSLO images

Figure	Manual	Algorithm 1	Algorithm 2
3(a)	305	219	287
3(b)	168	240	187
3(c)	279	247	295
3(d)	151	140	144
3(e)	152	144	145

Source: The authors

Fig. 4 shows the results obtained on real images. In the caption, we describe the color code used to identify the outcome of the algorithm that was utilized in each case. Table 3 shows the number of cells that were manually detected by the authors and those detected by each algorithm.

As shown in Tables 1 and 2 and in Fig. 3, both algorithms exhibited similar performances on synthetic images.

When the algorithm was applied to real images that included cones, rods and vascular tissue, Fig. 4 (a - c), the algorithm developed by Li and Roorda [6] showed detection of cells in the vascular tissue, as well as poor detection of rods. It is evident that there are photoreceptors in these zones, but since the vessels cause the photoreceptor layer to be below or above the blood vessel, it cannot be stated that photoreceptor detection in this zone is adequate.

Both algorithms exhibited similar performances on real images that included only cones, Fig. 4 (d, e). It is worth mentioning that Li and Roorda's algorithm does not show multiple detection for a single photoreceptor, whereas ours does.

As aforementioned, it is very important and useful to know where photoreceptors are located and how many photoreceptors there are in the retina, because that information could be used for the analysis of the distribution and orientation of cones and rods in-vivo as well as to monitor the evolution of therapies for retinal diseases.

Acknowledgments

The authors thank Alfredo Dubra, PhD, and Ethan Rossi, PhD, for the AOSLO images they kindly provided. We also

acknowledge the support of CONACYT through grant 162031 and projects 166326 and 166070. M. W. Acknowledges FONDECYT N° 3140387.

References

- [1] Oyster, C.W., Eye. Sinauer Associates, 1st ed, 1999. DOI: 10.1046/j.1475-1313.2000.00552.x
- [2] Goldstein, E.B., Sensation and perception. Wadsworth, 6th ed, 2002.
- [3] Rodieck, R.W., The first steps in seeing. Sinauer Associates, 1st ed., 1999.
- [4] Levin, L.A., Nilsson, S.F.E., Hoeve, J.V., Wu, S., Kaufman, P.L. and Alm, A., Adlers physiology of the eye. Elsevier, 11th ed., 2011. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0039-6257\(03\)00069-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0039-6257(03)00069-9)
- [5] Curcio, C.A., Sloan, K.R., Kalina R.E. and Hendrickson, A.E., Human photoreceptor topography. The Journal of Comparative Neurology, 292, pp. 497-523, 1990. DOI: 10.1002/cne.902920402
- [6] Li, K.Y. and Roorda, A., Automated identification of cone photoreceptors in adaptive optics retinal images. J. Opt. Soc. Am. A, 24, pp. 1358-1363, 2007. DOI: 10.1364/JOSAA.24.001358.
- [7] Doble, N., Choi, S.S., Codona, J.L., Christou, J., Enoch J.M. and Williams, D.R., In vivo imaging of rod photoreceptor mosaic. Opt. Lett., 36, pp. 31-33, 2011. DOI: 10.1364/OL.36.000031.
- [8] Putnam, N.M., Hammer, D.X., Zhang, Y., Merino, D. and Roorda, A., Modeling the foveal cone mosaic imaged with adaptive optics scanning laser ophthalmoscopy. Opt. Express, 18, pp. 24902-24916, 2010. DOI: 10.1364/OE.18.024902
- [9] Fisher, J.B., Jacobs, D.A., Markowitz, C.E., Galetta, S.L., Volpe, N.J., Nano-Schiavi, M.L., Baier, M.L., Frohman, E.M., Winslow, H., Frohman, T.C., Calabresi, P.A., Maguire, M.G., Cutter, G.R. and Balcer, L.J., Relation of visual function to retinal nerve fiber layer thickness in multiple sclerosis. Ophthalmology, 113, pp. 324-332, 2006. DOI: 10.1016/j.ophtha.2005.10.040.
- [10] Miller, D.T., Williams, D.R., Morris, G.M. and Liang, J., Images of cone photoreceptors in the living human eye. Vision Research, 36, pp. 1067-1079, 1996. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989\(95\)00225-1](http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989(95)00225-1)
- [11] Takayama, K., Ooto, S., Hangai, M., Arakawa, N., Oshima, S., Shibata, N., Hanebuchi, M., Inoue, T. and Yoshimura, N., High-resolution imaging of the retinal nerve fiber layer in normal eyes using adaptive optics scanning laser ophthalmoscopy. PLoS ONE, 7, e33158, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0033158>.
- [12] Hunter, J.J., Masella, B., Dubra, A., Sharma, R., Yin, L., Merigan, W.H., Palczewska, G., Palczewski, K. and Williams, D.R., Images of photoreceptors in living primate eyes using adaptive optics two-photon ophthalmoscopy. Biomed. Opt. Express, 2, pp. 139-148, 2011. DOI: 10.1364/BOE.2.000139
- [13] Liang, J., Williams, D.R. and Miller, D.T., Supernormal vision and high-resolution retinal imaging through adaptive optics. J. Opt. Soc. Am. A, 14, pp. 2884-2892, 1997. DOI: 10.1364/JOSAA.14.002884
- [14] Jonnal, R.S., Rha, J., Zhang, Y., Cense, B., Gao, W. and Miller, D.T., In vivo functional imaging of human cone photoreceptors. Opt. Express, 15, pp. 16141-16160, 2007. DOI: 10.1364/OE.15.016141
- [15] Baraas, R.C., Carroll, J., Gunther, K.L., Chung, M., Williams, D.R., Foster, D.H. and Neitz, M., Adaptive optics retinal imaging reveals s-cone dystrophy in tritan color-vision deficiency. J. Opt. Soc. Am. A, 24, pp. 1438-1447, 2007. doi: 10.1364/JOSAA.24.001438.
- [16] Morgan, J.I.W., Dubra, A., Wolfe, R., Merigan, W.H. and Williams, D.R., In vivo autofluorescence imaging of and macaque retinal pigment epithelial cell mosaic. Investigative Ophthalmology & Visual Science, 50, pp. 1350-1359, 2009. DOI: 10.1167/iov.08-2618
- [17] Carroll, J., Choi, S.S. and Williams, D.R., In vivo imaging of the photoreceptor mosaic of a rod monochromat. Vision Research, 48, pp. 2564-2568, 2008. DOI: 10.1016/j.visres.2008.04.006
- [18] Rossi, E.A., Chung, M., Dubra, A., Hunter, S.S., Merigan, W.H. and Williams, D.R., Imaging retinal mosaics in the living eye. Eye, 25, pp. 301-308, 2011. DOI: 10.1038/eye.2010.221
- [19] Williams, D.R., Imaging single cells in the living retina. Vision Research, 51, pp. 1379-1396, 2011. DOI: 10.1016/j.visres.2011.05.002.
- [20] Morgan, J.I.W., Hunter, J.J., Masella, B., Wolfe, R., Gray, D.C., Merigan, W.H., Delori, F.C. and Williams, D.R., Light-induced retinal changes observed with high-resolution autofluorescence imaging of the retinal pigment epithelium. Visual Science, 49, pp. 3715-3729, 2008. DOI: 10.1167/iov.07-1430
- [21] Roorda, A., Zhang, Y. and Duncan, J.L., High-resolution in vivo imaging of the rpe mosaic in eyes with retinal disease. Investigative Ophthalmology & Visual Science, 48, pp. 2297-2303, 2007. DOI: 10.1167/iov.06-1450
- [22] Rossi, E.A., Rangel-Fonseca, P., Parkins, K., Fischer, W., Latchney, L. R., Folwell, M.A., Williams, D.R., Dubra, A. and Chung, M.M., In vivo imaging of retinal pigment epithelium cells in age related macular degeneration. Biomed. Opt. Express, 4, 2527-2539, 2013. DOI: 10.1364/BOE.4.002527
- [23] Organisciak, D.T. and Vaughan, D.K., Retinal light damage: Mechanisms and protection. Progress in Retinal and Eye Research, 29, pp. 113-134, 2010. DOI: 10.1016/j.preteyeres.2009.11.004
- [24] Garrioch, R., Langlo, C., Dubis, A.M., Cooper, R.F., Dubra, A. and Carroll, J., Repeatability of in vivo parafoveal cone density and spacing measurements. Optometry and Vision Science, 85, pp. 632-643, 2012. DOI: 10.1097/OPX.0b013e3182540562
- [25] Wojtas, D.H., Wu B., Ahnelt, P.K., Bones, P.J. and Millane, R.P., Automated analysis of differential interference contrast microscopy images of the foveal cone mosaic. J. Opt. Soc. Am. A, 25, pp. 1181-1189, 2008. DOI: 10.1364/JOSAA.25.001181
- [26] Sekhar, S., El-Samie, F.E.A., Yu, P., Al-Nuaimy, W. and Nandi, A.K., Automated localization of retinal features. App. Opt., 50, pp. 3064-3075, 2011. DOI: 10.1364/AO.50.003064.
- [27] Takayama, K., Ooto, S., Hangai, M., Ueda-Arakawa, N., Yoshida, S., Akagi, T., Ikeda, H.O., Nonaka, A., Hanebuchi, M., Inoue, T. and Yoshimura, N., High-resolution imaging of retinal nerve fiber bundles in glaucoma using adaptive optics scanning laser ophthalmoscopy. Am. J Ophthalmology, 155(e3), pp. 870-881, 2013. DOI: 10.1016/j.ajo.2012.11.016.
- [28] Rangel-Fonseca, P., Gómez-Vieyra, A., Malacara-Hernández, D., Wilson, M.C., Williams, D.R. and Rossi, E.A., Automated segmentation of retinal pigment epithelium cells in fluorescence adaptive optics images. J. Opt. Soc. Am. A, 30, pp. 2595-2604, 2013. DOI: 10.1364/JOSAA.30.002595.
- [29] Chiu, S.J., Toth, C.A., Rickman, C.B., Izatt, J.A. and Farsiu, S., Automatic segmentation of closed-contour features in ophthalmic images using graph theory and dynamic programming. Biomed. Opt. Express, 3, pp. 1127-1140, 2012. DOI: 10.1364/BOE.3.001127
- [30] Valencia-Estrada, J.C. and Bedoya-Calle, A.H., Trigonometría elíptica para su uso en ingeniería. Jornada de Investigación EIA (Escuela de Ingeniería de Antioquia), 2, pp. 84-92, 2009.

P. Rangel-Fonseca, is PhD candidate, received his BSc. of Electronics Engineering in 2003, in 2005 he received his MSc. in Electrical Engineering, at Universidad de Guanajuato, Mexico. Currently he is working towards on his PhD. Degree at Centro de Investigaciones en Optica A.C. His main research interest is image processing application in the biomedical area. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6254-0550>

A. Gómez-Vieyra, is PhD, received obtained his BSc. of Electronics Engineering in 2004 at Universidad Autonoma Metropolitana, Mexico, in 2005 he received his MSc and in 2010 he received his PhD in Optics at Centro de Investigaciones en Optica A.C. His current research interest includes vision science and optical engineering. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0290-1518>

D. Malacara-Hernández, his PhD. in Optics in 1965 from the University of Rochester. He has published more than one hundred and thirty refereed papers in Optical Engineering optics journals. He is a Fellow, both of the *Optical Society of America* and *The International Society for Optical Engineering* (SPIE). In 1987 he was elected a Vice-president of the *SPIE - International Commission for Optics*. He has served the *Optical Society of America* as a Topical Editor for *Applied Optics* from 1989 to 1992. He also has served *SPIE - The International Society for Optical Engineering*, as a member of the Board of Governors from 1990 to 1991. In 1989 he was granted the *Rudolf and Hilda Kingslake Chair in Optical Engineering*, at the Institute of Optics of the University of Rochester. He also received in 1994

the A. E. Conrady Award for Scientific Achievement by *SPIE-International Society for Optical Engineers* and in 1996 the Galileo Galilei Award, by the *International Commission for Optics*, and the Joseph Fraunhofer Award.-Robert M. Burley, from the *Optical Society of America* in 2002. He also received in 2012 the Gold Medal Award by *SPIE - International Society for Optical Engineers*.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8564-0119>

M. C. Wilson, is PhD., in Optics in 2011 at Centro de Investigaciones en Óptica A.C. His main research interests are Nonlinear Optics, Fiber Optics Sensors, Vision and Geothermal Sciences.

He is referee of Optics and Physics Journals.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9261-2589>



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería
Eléctrica e Ingeniería de Control

Oferta de Posgrados

Maestría en Ingeniería - Ingeniería Eléctrica

Mayor información:

E-mail: ingelcontro_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 52 64

Effect of amplitude and pulse in low frequency ultrasound on oil/water emulsions

María Alejandra Cabrera-Trujillo ^a, Luz Indira Sotelo-Díaz ^{a*}, María Ximena Quintanilla-Carvajal ^a

*Maestría en Diseño y Gestión de Procesos, Facultad de Ingeniería, Universidad de La Sabana, Campus Puente del Común, Bogotá, Colombia.
maria.cabrera1@unisabana.edu.co; maria.quintanilla1@unisabana.edu.co*

^b Programa Gastronomía. EICEA Universidad de La Sabana, Puente del Común, Bogotá, Colombia. indira.sotelo@unisabana.edu.co

Received: March 14th, de 2016. Received in revised form: August 8th, 2016. Accepted: August 31th, 2016

Abstract

The application of ultrasound within advanced or emerging technologies requires selecting parameters that depend on the target application. This study evaluated pulse and amplitude parameters of oil/water emulsions (20:80% w/w) using low frequency probe ultrasound equipment (20 KHz). A categorical multilevel factorial design was used with Design Expert® in which the following pulse treatments were defined: continuous, pulse 20:20 (on:off) and pulse 30:30 (on:off), for five minutes. Six amplitudes (30, 36, 42, 48, 54 and 60 μm) were evaluated for the following response variables: separation of phases in emulsion, temperature and accumulated power. The results showed that the best condition to obtain an emulsion with less phase separation was the 20:20 (on:off) treatment with an amplitude of 42 μm . The ultrasound probe application parameters that were obtained will enable the design of stable products from low-fat emulsions.

Keywords: Ultrasound probe, low frequency; emulsion; pulse; amplitude; phase separation.

Efecto de la amplitud y pulsación en ultrasonido de sonda a baja frecuencia sobre emulsiones aceite/agua

Resumen

La aplicación de ultrasonido dentro del concepto de tecnologías avanzadas o emergentes, requiere de la selección de parámetros según sea el objetivo de su aplicación. En esta investigación fueron evaluados parámetros de pulsación y amplitud para mezclas aceite/agua (20:80 % p/p), empleando un equipo de ultrasonido de sonda de baja frecuencia (20KHz). Los tratamientos de pulsación utilizados fueron: continuo, pulsación 20:20 (on:off) y pulsación 30:30 (on:off) durante cinco minutos; se evaluaron seis amplitudes (30, 36, 42, 48, 54 y 60 μm) sobre las variables de respuesta: separación de fases en la mezcla, temperatura y potencia acumulada. Los resultados obtenidos analizados por Design Expert® por medio de un diseño factorial multinivel categórico mostraron que la mejor condición para obtener una mezcla con menor separación, fue el tratamiento 20:20 (on:off), con una amplitud de 42 μm . Lo anterior evidencia el uso de ultrasonido de sonda como una metodología potencial para la homogenización de mezclas.

Palabras clave: Sonda de ultrasonido, baja frecuencia; emulsión; pulsación; amplitud; separación de fases.

1. Introduction

Ultrasound is characterized by the generation of acoustic waves, which require a medium to propagate at a rate that is characteristic to the nature of the wave and the medium through which it propagates [1]. Usually ultrasonic waves are classified according to the human hearing limit by frequency

(20 kHz) [2–6]. Ultrasound parameters include 1) the frequency, which is defined as the number of cycles completed by the wave per unit time ($f = 1/T$), and 2) the intensity, which is defined as the average energy transmitted through unit area that is perpendicular to the direction of wave propagation ($I = (P_A^2)/2\rho C$), where I corresponds to the acoustic intensity (W/m²), P_A is the

How to cite: Cabrera-Trujillo, M. A., Sotelo-Díaz, L. I. & Quintanilla-Carvajal M. X. Effect of amplitude and pulse in low frequency ultrasound on oil/water emulsions DYNA 83 (199) pp. 63-68, 2016

maximum pressure (atm), ρ is the density (kg/m³), and c is the wave velocity in the medium (m/s). The acoustic power is the total energy irradiated by a source per unit time ($W = IS$) where S represents the surface radiant area (m²), and W represents the acoustic power (W). [7].

The effect of high power ultrasound (frequency >20 kHz) is due to wave propagation through materials of different natures, inducing compressions and decompressions of the propagation medium that generate the acoustic cavitation phenomenon. This phenomenon is transmitted through waves that compress and extend the molecular structure of the medium through which waves pass, and this cavitation generates high temperatures and pressures in the medium, generating bubbles [5,8]. Cavitation has been identified as transitory at low ultrasonic frequencies (<100 kHz) where cavitation causes the rapid growth of bubbles, leading them to collapse [7].

Low frequency and high power ultrasound (<20 kHz) is known in the food industry because it changes the physical and chemical properties of food. Different applications of ultrasound in food matrices were studied by [9–12], among which emulsification, an anti-foaming effect, microbiological inactivation, extraction, colour change, and lipid oxidation, among others, have been found. Thus, power ultrasound applications have been considered to be emerging technologies, and they are considered a green technology that offers great potential for a variety of processes [13]. One of the main uses of high-power ultrasound is the application in designing emulsions with a minimum amount of surfactant, wherein the effect depends on the characteristics of the matrix on which it is applied. For example, in the case of two immiscible liquids, if a bubble collapses near the phase boundary of the liquid, the resulting shock wave can provide a very effective mixing of the layers, causing them to require fewer surfactants and producing emulsions, with smaller drop sizes within a size distribution, i.e., producing micro or nanoemulsions, compared to other methods [6,9].

The mixing of two insoluble substances, generally oil in water, can produce emulsions as liquid-liquid dispersing systems. However, these type of emulsions constitute thermodynamically unstable systems and show phase separation or degradation due to temperature changes with phenomena such as flocculation, creaming and coalescence. The above characteristics mean that the system requires energy to disperse a liquid phase (dispersed phase) as droplets into a second phase (continuous phase) [14–17]. However, the use of ultrasound in mixtures as acoustic emulsification systems has been described by [13], in which stable particles were produced in the submicron range with a very narrow particle size distribution, permitting the use of a suitable emulsifier ratio with less energy. Thus, for the food industry, ultrasonic emulsification is of interest for the treatment of products such as fruit juices, mayonnaise, sauces, and salad dressings and for the encapsulation of aromas [6]. The effect of the power of the ultrasound on the emulsification process was explained by M.A.T.J. Mason [8] as a process of successive disintegration that consists of two stages. In the first stage, the instability of the oil-water interface appears, as illustrated by large oil drops with a diameter of approximately 70 microns, and in the second

stage, these large drops breakdown via shockwaves that are produced by cavitation bubbles. Chemat, Zill-E-Huma, and Khan [24] stated that the energy required to produce emulsions via acoustic waves is less than that needed via conventional methods that are used in mechanical emulsification, such as rotor-stator systems and high-pressure homogenizers [14].

Cárcel [7] and Peshkovsky and Bystryak [18] studied the importance of selecting different parameters, such as the frequency, wavelength, intensity, amplitude and power, for ultrasound applications to achieve more stable emulsions over time to preserve their properties and physical characteristics to scale up to the industrial level. The probe size was found to affect the intensity of the emitted wave, and this is a challenge for this technology scaling. Thus, food processing is constantly evolving, which is represented by the different challenges that the food industry should address. The evaluation of ultrasound application parameters, depending on the stability and accumulated power, is necessary to obtain stable emulsions for food applications. Thus, the aim of this study was to choose the amplitude and pulse conditions in a probe-type system for applying continuous or pulsed power ultrasound, depending on oil/water (O/W) emulsion stability, which was defined by the phase separation time.

2. Materials and methods

2.1. Materials

Borges® extra virgin olive oil, which was purchased at a local supermarket in Bogota, and type I ultrapure deionised water that had a resistance of 18.2 M Ω -cm (PURELAB option-Q) were used to prepare the O/W emulsions. The samples were placed in 50 ml falcon tubes.

2.2. Preparation of the O/W emulsion

The O/W emulsion (w/w) was prepared using 80% water and 20% olive oil.

2.3. Ultrasound application

Ultrasound was applied to the O/W emulsion in an ultrasound device (Qsónica®, Q700 sonicator, 700 W RMS, USA) at 20 kHz for 5 minutes via a continuous and pulsed process, this time was selected in order to avoid the overheating [19]. The ultrasound probe was placed inside a sound-reduction box whose interior walls were coated with water-resistant acoustic foam (Fig 1). A 25.4 mm titanium alloy probe with a cylindrical diameter and geometry was used. The probe was placed 10 mm below the surface of the O/W emulsion with a height of 100 mm, and the amplitudes levels were changed between 30, 36, 42, 48, 54 and 60 μ m (50%, 60%, 70%, 80%, 90% and 100%, respectively) in the continuous and pulsed processes. Two pulsed treatments were applied: one 20:20 on/off and another 30:30 on/off. These treatments were performed in triplicate.

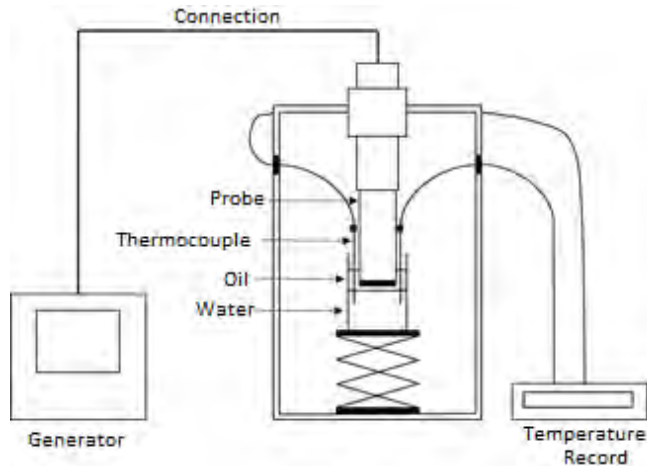


Figure 1. Experimental setup for ultrasound preparation of the emulsion O/W.

Source: Authors

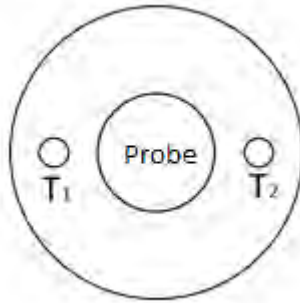


Figure 2. Schematic location of Thermocouples. Source: Authors

The temperature increase for the sonication time for each of the pulse and amplitude conditions was determined using two thermocouples (Digisense®) at a distance of 1 cm from the probe (Fig 1). The following fixed variables were defined: (i) Two types of pulses – continuous pulses in which the wave was transmitted without intermittence, and 20:20 and 30:30 on/off pulses in which the wave was intermittent in time. In the case of the 20:20 (on/off) pulsation, intermittency occurred for 20 seconds during which the wave propagated through the medium and for 20 seconds in which the wave stopped its propagation through the medium. For the 30:30 (on/off) condition, intermittency occurred for 30 seconds during which the wave propagated through the medium and for 30 seconds during which the wave propagation stopped [3]. (ii) Six amplitude levels (30, 36, 42, 48, 54 and 60 μm) were used for the three evaluated pulses. (iii) A sonication time of five minutes was defined as a fixed factor [20–23]

2.4. Application of ultrasound treatments

The O/W emulsion was subjected to continuous ultrasound treatment for five minutes for each amplitude. Pulse treatments of 20:20 and 30:30 on-off were performed. Each treatment was evaluated for five minutes for the chosen

amplitudes. The temperature ($^{\circ}\text{C}$) and energy (J) values were recorded for every minute.

After the pulsed or continuous sonication time, the emulsions were kept at room temperature (19°C) for the next three hours for the phase separation measurement.

2.5. Response variables

2.5.1. Phase separation

The time required for the phase separation was evaluated for each treatment during the three hours after sonication. A visible mark on the outer surface of the falcon tubes that contained the samples was labelled every 30 minutes, and an image was captured with a 13 Mpx camera. The images were analysed using ImageJ®.

2.5.2. Temperature record

The temperature was measured using a Digi-Sense Scanning Thermometer (model 92000-0). The temperature was recorded every minute for the continuous ultrasound, after 20 seconds in the on position for the 20:20 pulsed ultrasound, and after 30 seconds in the on position for the 30:30 pulsed ultrasound.

2.5.3. Accumulated power

The power (P) was calculated based on the power dissipated in all of the samples according to the different evaluated amplitude and pulse conditions. The calorimetric method was used for the P calculation using the ratio presented in equation (1):

$$P = mC_p \left(\frac{\Delta T}{\Delta t} \right) \quad (t = 0) \quad (1)$$

where “m” is the mass of the sample (kg), C_p is the specific heat of the emulsion ($\text{kJ/kg } ^{\circ}\text{C}$), and $\Delta T/\Delta t$ is the temperature change over time ($^{\circ}\text{C/s}$) [19]. The C_p was calculated using the method by Choi and Okos (1986). The accumulated power was calculated as the sum of the power that dissipated at each measurement point.

2.5.4. Experimental design

The effects of different pulses (continuous, 20:20 and 30:30) and amplitudes (30, 36, 42, 48, 54 and 60 μm) were evaluated in the O/W emulsion. A multilevel categorical factorial design was performed using the statistical software Design Expert Version 9 (Statease Inc., Minneapolis, USA) to process the data. The pulsation and amplitude were the two categorical factors that were defined at different levels. Table 1 shows the experimental design in which analysis of variance (ANOVA) was performed to find significant differences for the pulses and amplitudes in the results of the phase separation. The fit of the model was evaluated using the R^2 and adjusted R^2 values.

Table 1.
Experimental Design

Run	Pulse	Amplitude μm
1	Continuous	48
2	20:20	54
3	20:20	48
4	20:20	42
5	30:30	30
6	30:30	60
7	30:30	48
8	Continuous	30
9	30:30	36
10	30:30	54
11	20:20	60
12	Continuous	54
13	Continuous	36
14	20:20	30
15	Continuous	42
16	20:20	36
17	30:30	42
18	Continuous	60

Source: Authors

3. Results and discussion

The selection of parameters as power, frequency and pulse type, helps to define the different effects that are produced by high-power ultrasound when it passes through a medium, which demonstrates their significance depending on the features of the material [6]. Therefore, the density difference between both phases under the influence of gravity leads to phase separation [25]. The following effects are described in our study: (1) the effect of amplitude on the medium temperature and phase separation, (2) the accumulated power during the sonication time, and (3) the effect of the treatment on the phase separation. As stated by Gaikwad and Pandit [26], the use of ultrasonic emulsification can be described using four characteristics: (1) a minimum intensity is required to start the emulsification process, (2) an increase in the power emitted to the matrix enhances the emulsion stability, (3) an increase in the sonication time decreases the dispersed phase droplet size, favouring the formation of microjets, and (4) the forces responsible for the emulsification are the ratio of the force acting on the droplets and the surface tension, which represent the physicochemical properties of the system.

3.1. Effect of amplitude and pulse type on temperature

The effect of different amplitudes on the temperature for each ultrasound pulse treatment was evaluated for the three types of pulse. Thus, Fig 3 shows the temperature increase during the 5 minutes of treatment for each type of pulse. This increase has been widely described by Shanmugam, Chandrapala, and Ashokkumar [26] and Pingret, Fabiano-Tixier, and Chemat [27] as being caused by the cavitation phenomenon. Thus, the ultrasound generates a strong resonance in the pulses that are represented in bubbles in the form of microjets, which significantly influences the acoustic environment of the liquid [29]. However, amplitude conditions are directly

related to temperature increases; thus, the highest temperature was obtained in the range of 60 μm for the pulse treatments in continuous 62°C, 20:20 pulse 55.1°C and 30:30 pulse 57.7°C. This allowed some of the acoustic energy to be degraded as heat, leading to an increase in medium temperature due to the direct relation between the temperature and the solubility of water and oil [7,30]. The pulse and amplitude were found to be significant regarding the effect of the pulses for each amplitude on the temperature ($P < 0.05$).

Figure 3 shows that the 20:20 and 30:30 pulsed treatments have a lower temperature increase compared to the continuous treatment due to the off period of the pulsed wave effect.

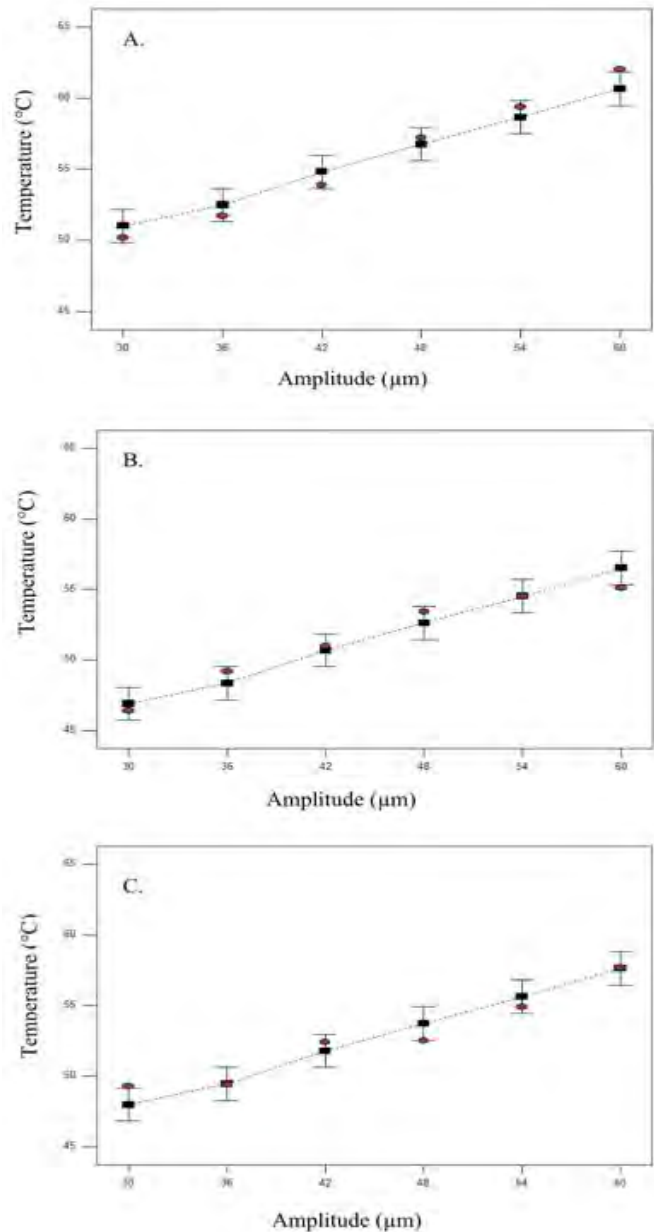


Figure 3. Temperature ($^{\circ}\text{C}$) during the five minutes of sonication A. Continuous process, B. 20:20 pulse and C. 30:30 pulse.

Source: Authors

Table 2.
Specific heat and accumulated power for continuous process, 20:20 pulse and 30:30 pulse

Amplitude	Continuous		20:20		30:30	
	Cp (kJ/kg°C)	Accumulated Power (W)	Cp (kJ/kg°C)	Accumulated Power (W)	Cp (kJ/kg°C)	Accumulated Power (W)
30 μ m	3.756	101.75	3.754	268.77	3.749	188.06
36 μ m	3.759	105.42	3.757	295.65	3.756	193.19
42 μ m	3.757	113.26	3.758	312.77	3.758	210.73
48 μ m	3.760	122.97	3.755	327.98	3.758	218.42
54 μ m	3.762	129.92	3.759	337.85	3.752	230.58
60 μ m	3.763	137.10	3.759	341.17	3.761	247.77

Source: Authors

3.2. Power accumulated during the sonication time

Table 2 shows the accumulated power, as calculated from equation (1). An increased accumulated power in relation to the increase in amplitude for all the pulses showed significant differences ($P < 0.05$) between the treatments. The 20:20 pulsed treatment with the amplitude of 60 μ m accumulated the largest power during the five minutes of experimentation, which is explained by the stronger and more violent cavitation of bubble collapse in the on:off pulsation moments that generated more power. Anihouvi, Danthine, Kegelaers, Dombree, and Blecker [31] reported that cavitation is the most significant mechanism of power dissipation in a low frequency ultrasound system; thus, changes in cavitation intensity can be related directly to changes in power.

3.3. Effect of treatments on phase separation

The homogenization technology in emulsions has a relevant role in the stability of its phase, and this can be measurement as the minima distance of separation. As shown in Fig 4, the lowest phase separation occurs in the continuous treatment followed by the 30:30 pulsed treatment to 60 μ m, with significant differences between them ($P < 0.05$).

However, in relationship with the temperature smaller increases benefit O/W emulsion stability over time;

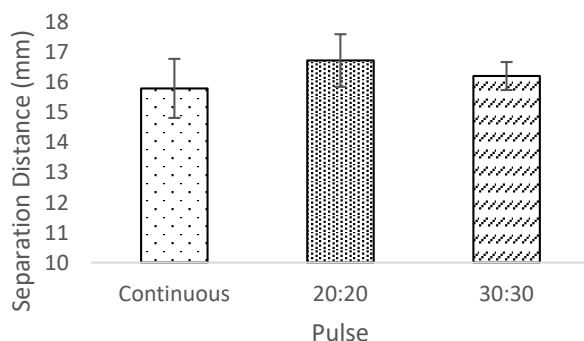


Figure 4. Phase Separation, amplitude 60 μ m.
Source: Authors

Table 3.
Correlation of temperature, accumulated power and separation distance

	Temperature	Accumulated Power (W)	Separation Distance (mm)
Std. Dev.	1.12	8.45	0.29
Mean	53.34	215.74	16.39
R ²	0.9536	0.9942	0.6942
R ² adjusted	0.9212	0.9901	0.6535

Source: Authors

nevertheless an increase in O/W emulsion temperature leads to a cavitation decrease. Therefore, it is necessary to maintain the lowest temperature possible for O/W emulsification processes, which is why the 20:20 pulsed treatment in this experiment exhibited a smaller increase in temperature of 27.4°C, 30.2°C, 32°C, 34.4°C, 35.5°C, and 36.1°C for each of the evaluated amplitudes.

3.4. Results of the correlation

Table 3 shows the correlation of the response variables, temperature, accumulated power and separation distance. We observed a high correlation with accumulated power, followed by a correlation with temperature and, finally, with the separation distance.

4. Conclusions

The use of technologies such as ultrasound to obtain O/W emulsions requires analysis of the parameters for improved application. Transient cavitation that is generated by the pulse that is related to the temperature during the emulsification process is highlighted. The relevance of the cavitation that is generated by low frequency ultrasonic waves contributes to the degradation of the acoustic energy into heat, favouring the increase in the emulsion temperature. However, smaller temperature increases that do not favour emulsion stability were found due to the accumulation of more power; thus, emulsions exhibiting less separation were obtained with continuous pulsing. This study helped to define the application parameters of ultrasound at a frequency of 20 kHz with a continuous pulse with an amplitude of 60 μ m for a tip of 25.4 mm on O/W (20:80) emulsions. These results will allow the application of an advanced and emerging technology with less use of surfactants for low oil-content emulsions that can be the basis for low-fat food products. The aim of this work was to select the best conditions for emulsification, but it must be considered the formulation and the process time because shelf-life of emulsions is determined by lipid oxidation; fat/oil has an important role in determining the properties of emulsions, it influences the appearance (optical properties), sensory evaluation, texture (rheology) and stability

References

- [1] Guillaume, C., Katline, L., Benoit, A.T, and Stefan, M., Changes in ultrasound velocity and attenuation indicate freezing of xylem sap, *Agric. For. Meteorol.*, 185, pp. 20-25, 2014. DOI: 10.1016/j.agrformet.2013.10.009

- [2] Canselier, J.P., Delmas, H., Wilhelm, A.M. and Abismail, B., Ultrasound emulsification - An overview, *J. Dispers. Sci. Technol.*, 23(1-3), pp. 333-349, 2002. DOI:10.1080/01932690208984209
- [3] Coupland, J.N., Low intensity ultrasound, *Food Res. Int.*, 37, pp. 537-43, 2004. DOI: 10.1016/j.foodres.2004.01.011
- [4] Cárcel, J.A., García-Pérez, J.V., Riera, E. and Mulet, A., Influence of high intensity ultrasound on drying kinetics of persimmon, *Dry. Technol.*, 25, pp. 185-193, 2007. DOI: 10.1080/07373930601161070
- [5] Patist, A. and Bates, D., Ultrasonic innovations in the food industry: From the laboratory to commercial production, *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, 9(2), pp. 147-154, 2008. DOI: 10.1016/j.ifset.2007.07.004
- [6] Cárcel, J.A., García-Pérez, J.V., Benedito, J. and Mulet, A., Food process innovation through new technologies: Use of ultrasound, *J. Food Eng.*, 110(2), pp. 200-207, 2012. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2011.05.038
- [7] Cárcel, J.A., Influencia de los ultrasonidos de potencia en procesos de transferencia de materia., Tesis Doctorado Departamento de Tecnología de Alimentos. Universidad Politécnica de Valencia. España, 2003.
- [8] Mason, M.A.T.J. and Chemat, F., Power ultrasonics for food processing, Chapter 6. In *Ultrasound of Food Processing*. London: Blackie Academic & Professional. 1998.
- [9] Mason, T., The uses of ultrasound in food technology, *Ultrason. Sonochem.*, 3(3), pp. S253-S260, 1996. DOI: 10.1016/S1350-4177(96)00034-X
- [10] Soria, A.C. and Villamiel, M., Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of food: A review, *Trends Food Sci. Technol.*, 21(7), pp. 323-331, 2010. DOI: 10.1016/j.tifs.2010.04.003
- [11] Awad, T.S., Moharram, H.A., Shaltout, O.E., Asker, D. and Youssef, M.M., Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review, *Food Res. Int.*, 48(2), pp. 410-427, 2012. DOI: 10.1016/j.foodres.2012.05.004
- [12] Pingret, D., Fabiano-Tixier, A.S. and Chemat, F., Degradation during application of ultrasound in food processing: A review, *Food Control*, 31(2), pp. 593-606, 2013. DOI: 10.1016/j.foodcont.2012.11.039
- [13] Gallego-Juárez, J.A., Rodríguez, G., Acosta, V. and Riera, E., Power ultrasonic transducers with extensive radiators for industrial processing, *Ultrason. Sonochem.*, 17(6), pp. 953-964, 2010. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2009.11.006
- [14] Behrend, O., Ax, K. and Schubert, H., "Influence of continuous phase viscosity on emulsification by ultrasound, *Ultrason. Sonochem.*, 7(2), pp. 77-85, 2000. DOI: 10.1016/S1350-4177(99)00029-2
- [15] McClements, D.J., *Food Emulsions: Principles, Practices, and Techniques*. New York: CRC Press, 2005.
- [16] McClements, D.J., Edible nanoemulsions: fabrication, properties, and functional performance, *Soft Matter*, 7(6), pp. 2297-2298, 2011. DOI: 10.1039/C0SM00549E
- [17] Mancinelli, R., Bruni, F., Ricci, M.A. and Imberti, S., Microscopic structure of water in a oil emulsion, 204503, pp. 1-8, 2013. DOI: 10.1063/1.4807601.
- [18] Peshkovsky, A.S. and Bystryak, S., Continuous-flow production of a pharmaceutical nanoemulsion by high-amplitude ultrasound: Process scale-up, *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, 82, pp. 132-136, 2014. DOI: 10.1016/j.cep.2014.05.007
- [19] Abbas, S., Bashari, M., Akhtar, W., Li, W.W. and Zhang, X., Process optimization of ultrasound-assisted curcumin nanoemulsions stabilized by OSA-modified starch, *Ultrason. Sonochem.*, 21(4), pp. 1265-1274, 2014 DOI: 10.1016/j.ultsonch.2013.12.017
- [20] Kiokias, S., Dimakou, C. and Oreopoulou, V., Activity of natural carotenoid preparations against the autoxidative deterioration of sunflower oil-in-water emulsions, *Food Chem.*, 114(4), pp. 1278-1284, 2009. DOI: 10.1016/j.foodchem.2008.10.087
- [21] Kaltsa, O., Michon, C., Yanniotis, S. and Mandala, I., Ultrasonic energy input influence on the production of sub-micron o/w emulsions containing whey protein and common stabilizers, *Ultrason. Sonochem.*, 20(3), pp. 881-891, 2013. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2012.11.011
- [22] Shanmugam, A. and Ashokkumar, M., Functional properties of ultrasonically generated flaxseed oil-dairy emulsions, *Ultrason. Sonochem.*, 21(5), pp. 1649-1657, 2014. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2014.03.020
- [23] Paradiso, V.M., Giarnetti, M., Summo, C. Pasqualone, A., Minervini, F. and Caponio, F., Production and characterization of emulsion filled gels based on inulin and extra virgin olive oil, *Food Hydrocoll.*, 45, pp. 30-40, 2015. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2014.10.027
- [24] Chemat, F., Zill, E.-H. and Khan, M.K. Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction, *Ultrason. Sonochem.*, 18(4), pp. 813-835, 2011. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2010.11.023
- [25] Anihouvi, P.P., Danthine, S., Kegelaers, Y., Dombree, A. and Blecker, C., Comparison of the physicochemical behavior of model oil-in-water emulsions based on different lauric vegetal fats, *Food Res. Int.*, 53(1), pp. 156-163, 2013. DOI: 10.1016/j.foodres.2013.04.011
- [26] Gaikwad S.G. and Pandit, A.B., Ultrasound emulsification: Effect of ultrasonic and physicochemical properties on dispersed phase volume and droplet size, *Ultrason. Sonochem.*, 15(4), pp. 554-563, 2008. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2007.06.011
- [27] Shanmugam, A., Chandrapala, J. and Ashokkumar, M., The effect of ultrasound on the physical and functional properties of skim milk. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, 16, pp. 251-258, 2012. DOI: 10.1016/j.ifset.2012.06.005
- [28] Pingret, D., Fabiano-Tixier, A.-S. and Chemat, F., Degradation during application of ultrasound in food processing: A review, *Food Control*, 31(2), pp. 593-606, 2013. DOI: 10.1016/j.foodcont.2012.11.039
- [29] Leighton, T.G., What is ultrasound?, *Prog. Biophys. Mol. Biol.*, 93(1-3), pp. 3-83, 2007. DOI: 10.1016/j.pbiomolbio.2006.07.026
- [30] Jiménez-Manguía, C.E.K.M.T., Factores principales que intervienen en la estabilidad de una emulsión doble, [En línea]. 2, pp. 1-18, 2012. Temas selectos de Ingeniería de Alimentos. Disponible en: <http://web.udlap.mx/tsia/files/2013/12/TSIA-62Kosegarten-Conde-et-al-2012.pdf>
- [31] Leong, T.S.H., Wooster, T.J., Kentish, S.E. and Ashokkumar, M., Minimising oil droplet size using ultrasonic emulsification, *Ultrason. Sonochem.*, 16(6), pp. 721-727, 2009. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2009.02.008

L.I. Sotelo-Díaz, received her BSc in Food Engineering in 1992, at the Universidad Jorge Tadeo Lozano, Bogotá, Colombia. She was Dra. in Food Science and Technology in 2000, at the Universidad Politécnica de Valencia, Spain. Is associate researcher Colciencias in Agroindustrial Process Group. She works as professor in Food science and Technology at the Universidad de La Sabana in the programs: Gastronomía, Master of Process Management and Design and Biociencias Doctorate. Her main research topics are the applications of traditional and emerging technologies in design food products and food process.
ORCID: 0000-0002-6594-2539

M.X. Quintanilla-Carvajal, received her BSc in Agroindustrial Production Engineering in 2007, at the Universidad de La Sabana, Bogotá, Colombia. She was Dra. in Food Science in 2011, at the Instituto Politécnico Nacional de México. She works as professor in Agroindustrial Processes at the Universidad de La Sabana in the programs: Agroindustrial Production Engineer, Master of Process Management and Design and Biociencias Doctorate. Her main research topics are focuses on Food and Beverage, Production Engineering, Nanoprocesses (Nanoscale applications) and nanomaterials (Production and Properties).
ORCID: 0000-0001-8219-7246

M.A. Cabrera-Trujillo, received her BSc in Agroindustrial Production Engineering in 2013, at the Universidad de La Sabana, Bogotá, Colombia. She is currently finishing her studies in the Master of Process Management and Design with Food Emphasis at the University of La Sabana.
ORCID: 0000-0003-4178-6946

An adaptive controller applied to an anti-lock braking system laboratory

Cuauhtémoc Acosta-Lúa ^a, Stefano Di Gennaro ^b & María Eugenia Sánchez-Morales ^a

^a Centro Universitario de la Ciénega - Universidad de Guadalajara, Ocotlán, Jalisco, México. cuauhtemoc.acosta@cuci.udg.mx, eugenia.sanchez@cuci.udg.mx

^b Department of Information Engineering, Computer Science and Mathematics; also: Center of Excellence DEWS
University of L'Aquila, Coppito, L'Aquila, Italy. stefano.digennaro@univaq.it

Recibido: July 13th, 2015. Recibido en versión revisada: April 11th, 2016. Aceptado: June 13th, 2016.

Abstract

Controlling an antilock braking system is difficult due to the existence of nonlinear dynamics and the uncertainty of its characteristics and parameters. To overcome these issues, we propose two controllers. The first controller is designed under the complete knowledge of the parameters hypothesis. Then, an adaptive nonlinear controller is designed using an estimate of the tire-road friction coefficient. This second controller is implemented in an ABS laboratory setup in order to test its performance, and the results show that the adaptive controller ensures the tracking of the desired reference and identifies the unknown parameter.

Keywords: Adaptive Control, Anti-lock braking system, Real-Time Systems, Wheel Slip Control.

Control adaptivo aplicado a un laboratorio de un sistema de frenos antibloqueo

Resumen

El control para un sistema de frenos antibloqueo (ABS) es un problema complejo debido a la existencia de dinámicas no lineales y perturbaciones en algunos parámetros. Para hacer frente a estos problemas, se proponen dos controladores. El primer controlador es diseñado bajo la hipótesis de que se conocen todos los parámetros. Enseguida, se diseña un controlador adaptivo usando una estimación del coeficiente de fricción neumático-carretera. Este segundo controlador es implementado en un laboratorio de ABS para probar la eficacia del mismo, y los resultados muestran que el controlador adaptivo asegura el seguimiento de la referencia deseada e identifica el parámetro desconocido.

Palabras clave: Control Adaptivo; Sistema de Frenos Antibloqueo, Sistemas en Tiempo real, Control de Deslizamiento en las ruedas.

1. Introduction

The Antilock Braking System (ABS) is an electronically controlled system that helps the driver to maintain the control of the vehicle during emergency braking. It achieved this by preventing the wheels from locking-up. This prevents the slippage of the wheels on the surface, adjusting the brake fluid pressure level of each wheel, and helps the driver to keep the control of the vehicle [1]. Increasing the braking efficiency and maintaining the vehicle's maneuverability, the ABS reduces driving instability and decreases the braking

distance by adjusting the maximum braking power applied to the brake pad. Modern ABS systems aim to obtain maximum wheel grip on the surface while the vehicle is braking [2] as well as preventing the wheels from locking-up.

Several algorithms have been designed to control ABS systems. These control algorithms can be grouped in two main categories: wheel acceleration and tire slip control. The first category approaches slip control indirectly by controlling the deceleration/acceleration of the wheel through the brake pressure from the actuator. The second control is a direct wheel slip control. This kind of controller

How to cite: Acosta-Lúa, C., Di Gennaro, S. & Sánchez-Morales, M. U. An Adaptive Controller Applied to an Anti-lock Braking System Laboratory DYNA 83 (199) pp. 69-77, 2016

is not easy to design because of the highly nonlinear and uncertain structure of the ABS system.

One of the main issues is that the controller has to operate at an unstable equilibrium point in order to achieve optimal behavior. Small perturbations of the controller input may induce drastic changes in the output. The performance of the ABS system is not always satisfactory due to the high dependency of the system parameters on the road conditions, which may vary over a wide range and in an unexpected manner. All these factors complicate the development of an accurate mathematical model for the ABS system. Therefore, advanced control design techniques are required so that the wheel slip control can cope with uncertainties in the dynamic models.

Different (linear and nonlinear) techniques have been developed to control ABS systems. The design of braking control systems faces important challenges, generally associated with velocity and vehicle parameters estimation. In [3] an extended Kalman filter is used to estimate the friction coefficient with the corresponding simulations in CarSim. Using intelligent control, in [4], a self-learning fuzzy sliding-mode control (SLFSMC) design method was proposed. In [5], a fuzzy model reference learning controller, a genetic model reference adaptive controller, and a general genetic adaptive controller were designed. Another ABS control technique is the hybrid control that was introduced by [6,7]. Moreover, [8] describes the analysis, modeling and simulation of an electric vehicle (EV) focused on developing a test bench to reproduce EV dynamics using the ABS system. In [9], an ABS for an electric vehicle was designed, whereas [10] introduces an electrical ABS actuating in wheel motors.

In this article a mechatronic system, the ABS laboratory setup manufactured by Inteco Ltd, was used to test a proposed nonlinear adaptive controller. This experimental setup represents a quarter car model and consists of two rolling wheels. The lower wheel, made of aluminum, emulates the relative road motion of the car, whereas the upper wheel, made of rigid plastic, is mounted on the balance lever and simulates the wheel of a vehicle. In order to accelerate the lower wheel, a large DC motor is coupled on it. The upper wheel is equipped with a disk-brake system that is driven by a small DC motor where the control input is applied [11]. Encoders on the wheels allow their positions and velocities to be determined. The proposed control ensures that the desired references are tracked, using information available from the ABS sensors, i.e. the angular velocity of the upper and lower wheels. The main achievement of this article is regarding the parameter adaptation of the friction coefficient between the two wheels; this represents the tire-road friction coefficient in a real automobile. This is one of the most important parameters, the estimation of which can be difficult, for example in the case of sudden variations due to changes in road conditions. The adaptation in the controller guarantees the exponential convergence of the estimation to the real parameter value, as well as the exponential tracking of the reference. Finally, the nonlinear adaptive controller has been implemented and validated through real-time simulations on the ABS laboratory setup.

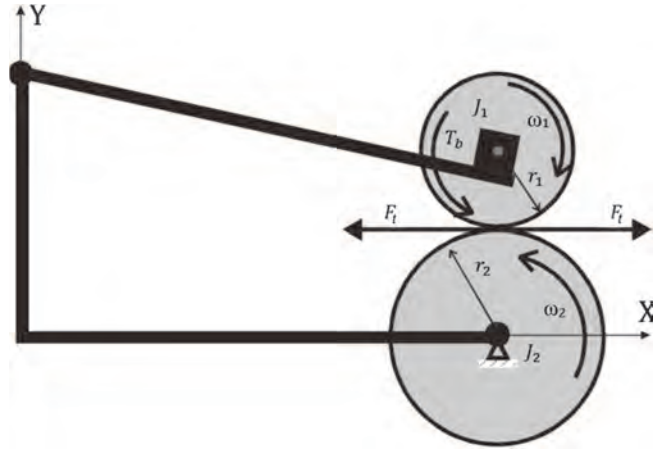


Figure 1. Scheme of the ABS laboratory setup.
Source: Inteco Manual [11].

Earlier works focused on ABS laboratory setups are mainly based on the assumption that all sensors' information is available for measurement. Some works present linear and nonlinear controllers [12,13], whereas [14] proposes a fuzzy control. In [15] a control strategy based on sliding mode is proposed. Finally, some articles use intelligent control techniques [16,17].

The article is organized as follows: section 2 briefly presents the mathematical model of the experimental setup. In Section 3, the control problem is solved to track a constant reference when the state variables are considered measurable. First, all the parameters are considered known. Then, the friction coefficient between the wheels is considered unknown, and an estimation is proposed. Section 4 shows some real-time results obtained using the ABS laboratory setup. The paper ends with some concluding remarks.

2. Mathematical model of the experimental ABS laboratory setup

In this paper, an ABS laboratory setup manufactured by Inteco Ltd. was considered (see Fig. 1). Although simple, this setup preserves the fundamental characteristics of an actual ABS system in the range of 0–70 km/h [11].

2.1. Mathematical model of the ABS laboratory setup

The mathematical model of the ABS laboratory setup is derived under the assumptions of negligible lateral and vertical motions, and a rolling resistance force negligible with respect to braking (see Fig.2). The braking torque T_b and the bearing friction torque M_{10} act on the upper wheel. The bearing friction torque M_{20} acts on the lower wheel. The tractive force F_t acts on both wheels.

The dynamic equations of the ABS laboratory setup are

$$\begin{aligned}\dot{\omega}_1 &= \frac{r_1}{J_1} F_t s(\omega) - \frac{1}{J_1} (d_1 \omega_1 + M_{10} + T_b) s_1(\omega_1) \\ \dot{\omega}_2 &= -\frac{r_2}{J_2} F_t s(\omega) - \frac{1}{J_2} (d_2 \omega_2 + M_{20}) s_2(\omega_2)\end{aligned}\quad (1)$$

where ω_1 , ω_2 are the angular velocities of the upper and lower wheels respectively, the inertia moments of which are J_1 , J_2 and the radii of which are r_1 , r_2 . Furthermore, d_1 , d_2 are the viscous friction coefficients of the upper and lower wheel, M_{10} , M_{20} are the static frictions of the upper and lower wheel, respectively, T_b is the braking torque, and F_t is the traction force between the wheels. The nominal parameters are given in Table 1. Finally, $s(\omega)$, $s_1(\omega)$ and $s_2(\omega)$ are auxiliary variables used to determinate if the vehicle is in traction mode or in braking mode

$$\begin{aligned} s(\omega) &= \text{sign}(r_2\omega_2 - r_1\omega_1) \\ s_1(\omega_1) &= \text{sign}(\omega_1), \quad s_2(\omega_2) = \text{sign}(\omega_2) \end{aligned} \quad (2)$$

with

$$\text{sign}(\omega) = \begin{cases} 1 & \text{if } \omega > 0 \\ 0 & \text{if } \omega = 0 \\ -1 & \text{if } \omega < 0. \end{cases} \quad (3)$$

Here $v_\omega = r_1\omega_1$ represents the vehicle wheel velocity, whereas $v_x = r_2\omega_2$ represents the vehicle velocity. The tractive force F_t is generated on contact between the upper and the lower wheel. Various models are available in the literature to model the tire behavior [18]. Without loss of generality, since the same approach can be used with different tire models, in this work the simplified Pacejka's "magic formula" [16]

$$F_t = \mu D_t \sin(C_t \arctan(B_t \lambda)) \quad (4)$$

has been used to describe the tractive force, where

$$\lambda = \frac{r_2\omega_2 - r_1\omega_1}{r_2\omega_2} \quad (5)$$

is the wheel slip, i.e. the relative difference of the wheel velocities. This formula approximates the response curve of the braking process based on experimental data. It is widely used, and makes it possible to work with a wider range of

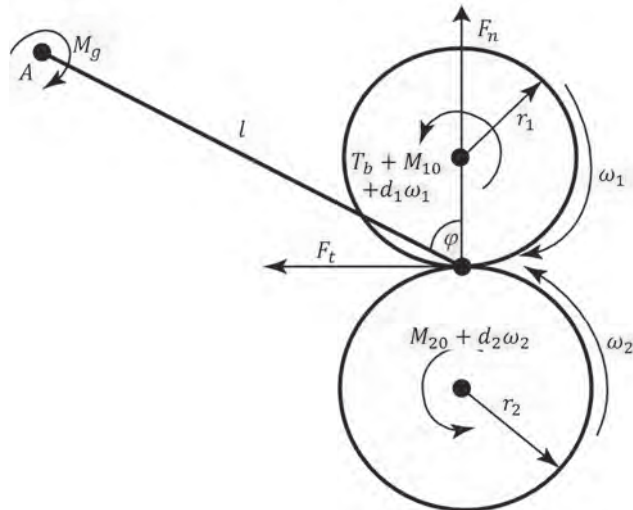


Figure 2. Forces and torques acting on the ABS laboratory setup. Source: Inteco Manual [11].

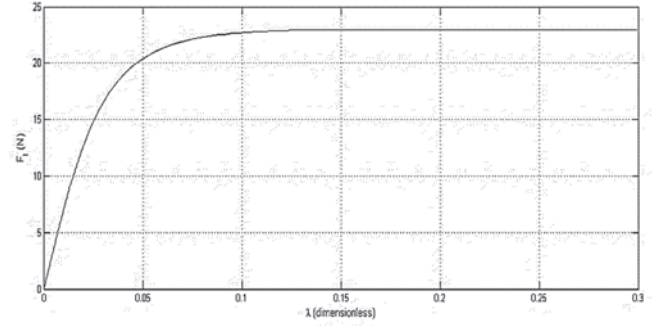


Figure 3. Typical characteristic of the tractive force F_t as function of the wheel slip angle λ . Source: The authors.

values, both in the linear and in the nonlinear region of the tire characteristic.

The expression (4) of the tractive force F_t depends on positive experimental coefficients given by the stiffness factor B_t ; the shape factor C_t ; and the peak value D_t , which are determined to match the experimental data. Moreover, $\mu \in [0,1]$ is the friction coefficient between the upper and lower wheel. Fig. 3 shows the characteristic of the tractive force calculated with (4), as a function of the wheel slip (5).

The braking torque, T_b , is modeled with a first-order equation [11], given by

$$\dot{T}_b = -c_{31}T_b + c_{31}b(u) \quad (6)$$

where c_{31} is a positive constant, and $b(u)$ describes the relation between the control input applied to the DC motor, which drives the action of brake pads, and the control input $\mu \in [0,1]$, which generates the braking torque T_b . This relation can be approximated by

$$b(u) = \begin{cases} b_1u + b_2 & \text{if } u \geq u_0 \\ 0 & \text{if } u < u_0 \end{cases} \quad (7)$$

where u_0 is the operating threshold of the brake driving system. According to the mathematical model, equation (6) is similar to the brake pedal in an automobile [17,20–21].

Under normal operational conditions, the wheel velocity $v_\omega = r_1\omega_1$ matches the forward velocity $v_x = r_2\omega_2$. When the brake is applied, braking forces are generated at the wheel interface and v_ω tends to be lower than v_x (but always positive), this a slippage occurs. During the braking process, the wheel slip λ is positive, as well as ω_1 , ω_2 . Hence,

$$\begin{aligned} s(\omega) &= \text{sign}(r_2\omega_2 - r_1\omega_1) = 1 \\ s_1(\omega_1) &= \text{sign}(\omega_1) = 1, \quad s_2(\omega_2) = \text{sign}(\omega_2) = 1 \end{aligned} \quad (8)$$

and equations (1) become

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_1 &= \frac{r_1}{J_1}F_t - \frac{1}{J_1}(d_1\omega_1 + M_{10} + T_b) \\ \dot{\omega}_2 &= -\frac{r_2}{J_2}F_t - \frac{1}{J_2}(d_2\omega_2 + M_{20}). \end{aligned} \quad (9)$$

2.2. Longitudinal vehicle force

The tractive force F_t given in (4) can be rewritten as

$$F_t = \theta \varphi(\lambda), \quad \varphi(\lambda) = \sin(C_t \arctan(B_t \lambda)) \quad (10)$$

where $\theta = \mu D_t$ is the product of the road–tire friction coefficient with the tire stiffness coefficient D_t , and where $\varphi(\lambda)$ is the normalized tire characteristics. This latter usually increases linearly with the wheel slip λ up to a maximum value and then decreases, reaching an asymptotic value for high wheel slip angles, as shown in Fig. 3. The function $\varphi(\lambda)$ is symmetric with respect to the origin. Hence, $\varphi(\lambda)$ reaches a minimum for negative values of λ and then increases to an asymptotic value for high negative wheel slip angles.

In real automobiles the friction coefficient is a parameter that may vary considerably according to the road and tire conditions. Also, the parameter D_t depends on the tire conditions. Considering (10), equations (1) can be rewritten in the following form:

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_1 &= \frac{r_1}{J_1} \theta \varphi(\lambda) - \frac{1}{J_1} (d_1 \omega_1 + M_{10} + T_b) \\ \dot{\omega}_2 &= -\frac{r_2}{J_2} \theta \varphi(\lambda) - \frac{1}{J_2} (d_2 \omega_2 + M_{20}). \end{aligned} \quad (11)$$

In the following section it is assumed, that $v_x \geq 0$. The output to be controlled is the wheel slip λ and the control aim is to design a controller such that λ globally tracks a constant reference λ_{ref} in the presence of parameter uncertainties. The primary function of the controller is to prevent the lock-up of the wheel during an emergency brake. Ideally, it is desired that the ABS maintains the wheel slip at the peak of the maximum longitudinal (tractive) force $F_t(\lambda)$. Hence, it is considered to be a constant reference λ_{ref} [19].

3. Design of an Adaptive Nonlinear Controller

In the following section it is assumed that only the parameter nominal values $\mu_0, D_{t,0}$ are known. Therefore, θ is unknown, with a nominal value $\theta_0 = \mu_0 D_{t,0}$. In this section a nonlinear dynamic controller is designed to force the error

$$e_\lambda = \lambda - \lambda_{\text{ref}} \quad (12)$$

to zero in the presence of variations of θ . The control law needs to generate a control reference. Hence, instead of considering the wheel slip as the controlled variable, the auxiliary slip velocity $v_s = v_x - v_\omega = \lambda v_x$ will be used. The slip velocity reference is given by $v_{s,\text{ref}} = \lambda_{\text{ref}} v_x$. Hence, the slip velocity error is defined as

$$e_v = v_s - v_{s,\text{ref}} = e_\lambda v_x = (1 - \lambda_{\text{ref}}) v_x - v_\omega. \quad (13)$$

Since $v_x \neq 0$, the control problem is equivalent to force e_v to zero asymptotically. The dynamics of the slip velocity error are

$$\begin{aligned} \dot{e}_v &= (1 - \lambda_{\text{ref}}) \dot{v}_x - \dot{v}_\omega = (1 - \lambda_{\text{ref}}) r_2 \dot{\omega}_2 - r_1 \dot{\omega}_1 \\ &= -k(\lambda_{\text{ref}}) \theta \varphi(\lambda) + \frac{r_1}{J_1} (d_1 \omega_1 + M_{10} + T_b) \\ &\quad - (1 - \lambda_{\text{ref}}) \frac{r_2}{J_2} (d_2 \omega_2 + M_{20}) \end{aligned} \quad (14)$$

where

$$k(\lambda_{\text{ref}}) = \frac{r_1^2}{J_1} + (1 - \lambda_{\text{ref}}) \frac{r_2^2}{J_2}. \quad (15)$$

Considering a constant slip reference λ_{ref} , if the parameter θ_0 is known and $\omega_1, \omega_2, M_{10}, M_{20}$ are measurable, the controller

$$\begin{aligned} \dot{e}_{ev} &= e_v \\ T_b &= \frac{J_1}{r_1} \xi_1 \\ \xi_1 &= -k_{s0} I_{ev} - k_{s1} e_v + k(\lambda_{\text{ref}}) \theta_0 \varphi(\lambda) \\ &\quad - \frac{r_1}{J_1} (d_1 \omega_1 + M_{10}) \\ &\quad + (1 - \lambda_{\text{ref}}) \frac{r_2}{J_2} (d_2 \omega_2 + M_{20}) \end{aligned} \quad (16)$$

with $k_{s0}, k_{s1} > 0$, ensures that the tracking error (13) and its derivative globally and exponentially converge to zero.

In fact, $\dot{e}_v = -k_{s0} I_{ev} - k_{s1} e_v$ is easily reached and, $\ddot{e}_v + k_{s0} e_v + k_{s1} \dot{e}_v = 0$ is easily derived. Hence, $e_v, \dot{e}_v$ tend globally exponentially to zero, as well as the error e_λ in (12). Hence λ tends to λ_{ref} globally and exponentially.

Let us now consider the case in which the friction coefficient θ between the two wheels is unknown.

Theorem 3.1 Consider a constant slip reference λ_{ref} . If the disturbances M_{10}, M_{20} are known and constant, ω_1, ω_2 are measurable, and the parameter θ is unknown, the dynamic controller

$$\begin{aligned} \dot{e}_{ev} &= e_v \\ \dot{\hat{\omega}}_1 &= \frac{r_1}{J_1} \hat{\theta} \varphi(\lambda) - \frac{1}{J_1} (d_1 \omega_1 + M_{10} + T_b) \\ \dot{\zeta} &= -\gamma k(\lambda_{\text{ref}}) \varphi(\lambda) B^T P \begin{pmatrix} I_{ev} \\ e_v \end{pmatrix} \\ T_b &= \frac{J_1}{r_1} \hat{\xi}_1 \end{aligned} \quad (17)$$

with

$$\begin{aligned} \hat{\theta} &= \zeta - \gamma k_{a1} \frac{J_1}{r_1} (\omega_1 - \hat{\omega}_1) \\ \hat{\xi}_1 &= -k_{s0} I_{ev} - k_{s1} e_v + k(\lambda_{\text{ref}}) \hat{\theta} \varphi(\lambda) \\ &\quad - \frac{r_1}{J_1} (d_1 \omega_1 + M_{10}) + (1 - \lambda_{\text{ref}}) \frac{r_2}{J_2} (d_2 \omega_2 + M_{20}) \end{aligned} \quad (18)$$

and with $k(\lambda_{\text{ref}})$ as (15) and $k_{s0}, k_{s1}, k_{a1} > 0$, ensures

that the tracking error (13) and the estimation error $\tilde{\theta} = \theta - \hat{\theta}$ globally exponentially tend to zero along their derivatives.

Proof 1. The dynamics of the error (14) rewrite

$$\begin{aligned}\dot{e}_v = & -k(\lambda_{\text{ref}})\theta\varphi(\lambda) + \frac{r_1}{J_1}(d_1\omega_1 + M_{10}) + \frac{r_1}{J_1}T_b \\ & -(1 - \lambda_{\text{ref}})\frac{r_2}{J_2}(d_2\omega_2 + M_{20}) - k_{s0}I_{ev} + k_{s0}I_{ev} \\ & -k_{s1}e_v + k_{s1}e_v + k(\lambda_{\text{ref}})\tilde{\theta}\varphi(\lambda) - k(\lambda_{\text{ref}})\tilde{\theta}\varphi(\lambda).\end{aligned}$$

Hence, using (17), (18), the error dynamics are

$$\begin{pmatrix} \dot{I}_{ev} \\ \dot{e}_v \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} I_{ev} \\ e_v \end{pmatrix} + B \left(-k(\lambda_{\text{ref}})\varphi(\lambda) \right) \tilde{\theta}$$

with the matrices

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -k_{s0} & -k_{s1} \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Let us consider the following Lyapunov candidate

$$V = V_e + V_{\theta}$$

with

$$V_e = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} I_{ev} \\ e_v \end{pmatrix}^T P \begin{pmatrix} I_{ev} \\ e_v \end{pmatrix}, \quad V_{\theta} = \frac{1}{2\gamma} \tilde{\theta}^2$$

and where $P = P^T > 0$. Deriving along the trajectories of the system

$$\dot{V}_e = -\left\| \begin{pmatrix} I_{ev} \\ e_v \end{pmatrix} \right\|_Q^2 + \tilde{\theta} B^T P \left\| \begin{pmatrix} I_{ev} \\ e_v \end{pmatrix} \right\| \left(-k(\lambda_{\text{ref}})\varphi(\lambda) \right)$$

And

$$\dot{V}_{\theta} = -\frac{1}{\gamma} \tilde{\theta} \dot{\tilde{\theta}}$$

so that one obtains

$$\dot{V} = -\left\| \begin{pmatrix} I_{ev} \\ e_v \end{pmatrix} \right\|_Q^2 + \tilde{\theta} \left(-k(\lambda_{\text{ref}})\varphi(\lambda) \right) B^T P \left\| \begin{pmatrix} I_{ev} \\ e_v \end{pmatrix} \right\| + \frac{1}{\gamma} \tilde{\theta} \dot{\tilde{\theta}}$$

with $Q = Q^T > 0$ fixed, and P solution of the Lyapunov equation $PA + A^T P = -2Q$. Since $\dot{\tilde{\theta}} = \dot{\theta} - \dot{\hat{\theta}} = -\dot{\hat{\theta}}$, and considering the dynamics of $\hat{\omega}_1$, one obtains

$$\dot{\tilde{\theta}} = -\dot{\zeta} + \gamma k_{a1} \frac{J_1}{r_1} (\dot{\omega}_1 - \hat{\omega}_1).$$

Therefore, one obtains

$$\dot{V} = -\left\| \begin{pmatrix} I_{ev} \\ e_v \end{pmatrix} \right\|_Q^2 - k_{a1}\varphi(\lambda)\tilde{\theta}^2 \leq -\lambda_{\min}^Q \left\| \begin{pmatrix} I_{ev} \\ e_v \end{pmatrix} \right\|^2 - k_{a1}\varphi_{\max}\tilde{\theta}^2$$

since $0 < \varphi(\lambda) \leq \varphi_{\max}$, and where $\lambda_{\min}^Q$ is the minimum eigenvalue of Q . Therefore, I_{ev} , e_v , and $\tilde{\theta}$ tend to zero globally and exponentially. Hence, v_s tends to $v_{s,\text{ref}}$ globally and exponentially. Since the adaptive controller (17) ensures that $v_s \rightarrow v_{s,\text{ref}}$ globally and exponentially, one concludes that also λ tends to λ_{ref} globally and exponentially.

Theorem 3.2 Assume that the parameter θ remains bounded, varying with bounded derivative $\|\dot{\theta}\| \leq \Delta$, for a certain $\Delta > 0$. Hence, the controller of Theorem 3.2 ensures global practical exponential stability of the tracking error (13) and of the estimation error dynamic $\tilde{\theta} = \theta - \hat{\theta}$ to a ball of the origin of arbitrary radius $\varepsilon > 0$.

Proof 2. Following the proof of Theorem 1, one obtains

$$\begin{aligned}\dot{V} & \leq -\lambda_{\min}^Q \left(\left\| \begin{pmatrix} I_{ev} \\ e_v \end{pmatrix} \right\|^2 + \|\tilde{\theta}\|^2 \right) + \tilde{\theta}^T \dot{\tilde{\theta}} \\ \dot{V} & \leq -\lambda_{\min}^Q \left(\left\| \begin{pmatrix} I_{ev} \\ e_v \end{pmatrix} \right\|^2 + \|\tilde{\theta}\|^2 \right) \|\tilde{\theta}\| \Delta \\ & \leq -\lambda_{\min}^Q \left(\left\| \begin{pmatrix} I_{ev} \\ e_v \end{pmatrix} \right\|^2 + \|\tilde{\theta}\|^2 \right) + \sqrt{\left\| \begin{pmatrix} I_{ev} \\ e_v \end{pmatrix} \right\|^2 + \|\tilde{\theta}\|^2} \Delta\end{aligned}$$

for $\|\dot{\theta}\| \leq \Delta$. Since

$$\lambda_1 \left(\left\| \begin{pmatrix} I_{ev} \\ e_v \end{pmatrix} \right\|^2 + \|\tilde{\theta}\|^2 \right) \leq V \leq \lambda_2 \left(\left\| \begin{pmatrix} I_{ev} \\ e_v \end{pmatrix} \right\|^2 + \|\tilde{\theta}\|^2 \right)$$

with $\lambda_1 = \min\{\lambda_{\min}^P, \gamma\}$, $\lambda_2 = \max\{\lambda_{\max}^P, \gamma\}$, then

$$\dot{V} \leq -\frac{\lambda_{\min}^Q}{\lambda_2} V + \frac{1}{\sqrt{\lambda_1}} \sqrt{V}$$

or, setting $V = W^2$,

$$W \leq -a_1 \dot{W} + a_0, \quad a_1 = \frac{\lambda_{\min}^Q}{2\lambda_2}, \quad a_0 = \frac{1}{2\sqrt{\lambda_1}}$$

so that

$$\begin{aligned}\sqrt{\lambda_1} \sqrt{\left\| \begin{pmatrix} I_{ev} \\ e_v \end{pmatrix} \right\|^2 + \|\tilde{\theta}\|^2} & \leq \sqrt{V} = W(t) \\ & \leq e^{-a_1 t} \left(W(0) - \frac{a_0}{a_1} \right) + \frac{a_0}{a_1} \rightarrow \frac{a_0}{a_1}.\end{aligned}$$

Setting $\frac{a_0}{\sqrt{\lambda_1} a_1} \leq \varepsilon$, i.e.

$$\lambda_{\min}^Q \geq \frac{\lambda_2}{\varepsilon \sqrt{\lambda_1}}$$

one ensures that

$$\sqrt{\|I_{ev}\|^2 + \|\tilde{\theta}\|^2} \leq \varepsilon$$

i.e. global practical exponential stability to an arbitrary ball of the origin.

4. Experimental Results

In order to compare the performance of the proposed controller with another that is available in literature, we present a comparison with a sliding-mode controller that was proposed in [16], which uses an estimation $\hat{\theta}$ of θ . The sliding-mode technique is a very efficient control technique because of its properties concerning order reduction and low sensibility to disturbances and parameter variation [22]. This is important in the control of nonlinear systems such as the ABS. The high-frequency nature of the SMC signal is its main drawback because the control can excite non-modeled system dynamics and wear out mechanical parts.

Experimental tests on the ABS laboratory setup (see Fig. 4) have been conducted to evaluate the braking performance of the proposed controller (17) using the data in Table 1. These tests represent maneuvers in a straight line. The initial conditions were $\omega_1(0) = \omega_2(0) = 1625$ RPM (170 rad/s) and $\zeta(0) = 0$.

When the maximal velocity of the upper wheel is detected, the system disables the DC motor coupled to the lower wheel, and the braking process begins. It is worthwhile noting that this work considers $\mu_0 = 1$, but in terms of the real system its variability can be taken into account, varying μ_0 in the interval of interest.



Figure 4. The ABS laboratory setup [11].
Source: Inteco Manual [11].

Table 1.

The ABS laboratory setup's coefficients and system variables of the.

Variable	Description	Value
ω_1	Angular velocity of the upper wheel	rad/s
ω_2	Angular velocity of the lower wheel	rad/s
T_b	Braking torque _{SEP}	Nm
r_1	Radius of the upper wheel	0.0995 m
r_2	Radius of the lower wheel	0.0990 m
J_1	Upper wheel inertia moment	7.54×10^{-3} kg m ²
J_2	Lower wheel inertia moment	25.60×10^{-3} kg m ²
d_1	Upper wheel viscous friction coefficient	118.74×10^{-6} kg m ² /s
d_2	Lower wheel viscous friction coefficient	214.68×10^{-6} kg m ² /s
μ_0	Friction coefficient between wheels	1
M_{10}	Static friction of the upper wheel	0.0032 N m
M_{20}	Static friction of the lower wheel	0.0925 N m
b_1	Constant _{SEP}	15.24
b_2	Constant _{SEP}	-6.21
c_{31}	Constant _{SEP}	20.37 s ⁻¹
u_0	Constant _{SEP}	0.415
u	Control input	
D_t	Peak value _{SEP}	23
C_t	Peak value _{SEP}	1.68
B_t	Stiffness factor _{SEP}	28
γ	Adaptive Gain	21
k_{s0}	Controller Gain	19
k_{s1}	Controller gain	32

Source: Inteco Manual [11].

The results are summarized in Figs. 5–10, in which it can be seen that the proposed controller (17) ensures better performances with respect to the sliding-mode controller [15]. It is important to emphasize that after the braking phase, between 6.2 and 7.4 s, which correspond to the maximum braking efficiency, the performance is no longer relevant since the longitudinal velocity is low, and the setup is no longer working in the appropriate range of velocities. In fact, λ will grow when the longitudinal velocity tends to zero. Figs. 5 and 6 show that both controllers maintain deceleration in both velocities. The difference can be found in the time the controllers require to complete the braking process. The proposed controller (17) manages to stop a few tenths of a second before the sliding-mode controller. Furthermore, as shown in Fig. 7, the proposed controller (17) reaches faster the reference $\lambda_{ref} = 0.15$, and keeps the estimated slip closer to the reference.

Another positive effect of the proposed controller is shown in Fig. 8, in which the absence of chattering, typical of the sliding-mode control can be seen. This ensures better wear resistance, less noise, and an increased passenger comfort with lower jerk effects. Fig. 9 shows, for both controllers, the estimate $\hat{\theta}$ of the real parameter. At the end of the braking process, the estimate is not reliable since $\hat{\theta}$ depends on the slip velocity λ , which is not properly controlled at the end of the braking process. This has already been commented upon.

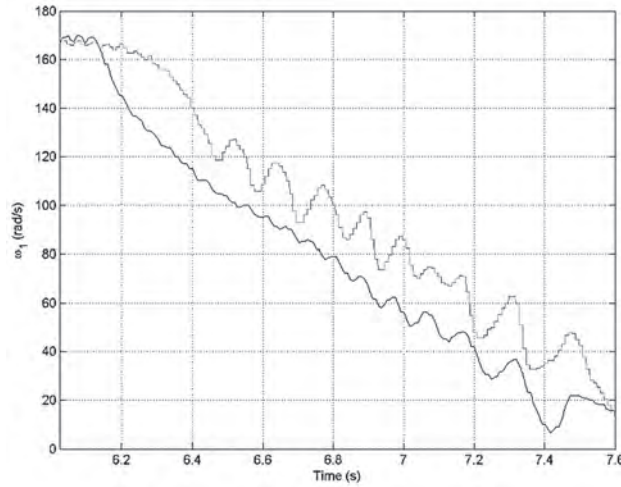


Figure 5. Upper wheel angular velocity ω_1 : Proposed controller (17) (black) and sliding-mode control (gray).
Source: The authors.

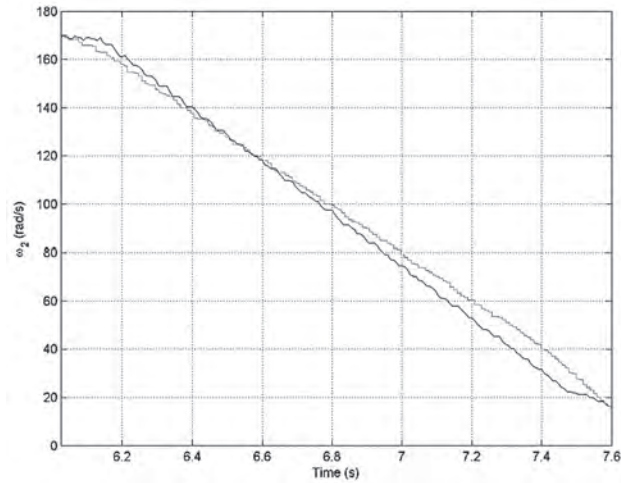


Figure 6. Lower wheel angular velocity ω_2 : Proposed controller (17) (black) and sliding-mode control (gray).
Source: The authors.

As a final indication of the better performance of the proposed controller, Fig. 10 shows that the proposed controller (17) accomplishes the braking process in approximately 6.7% less time and distance in comparison with the sliding-mode controller.

4. Conclusions

This article presents an adaptive controller for an ABS laboratory setup. The proposed controller allows the friction coefficient between the two wheels to be identified. It is assumed that the bearing friction torques are known. The adaptive controller is designed to ensure the exponential stability of the system. In addition, the dynamic controller ensures the desired tracking of the wheel slip, and is implemented in real-time.

A series of experiments have been performed on the ABS Laboratory setup to show the performance of the proposed

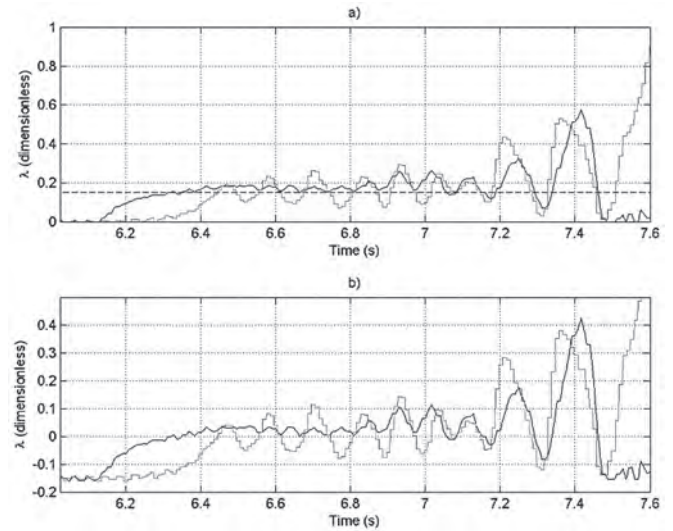


Figure 7. a) Wheel slip λ Proposed controller (17) (black), sliding-mode control (gray) and wheel slip reference λ_{ref} (dashed); b) Tracking error $\lambda - \lambda_{ref}$: Proposed controller (17) (black), sliding-mode control (gray).
Source: The authors.

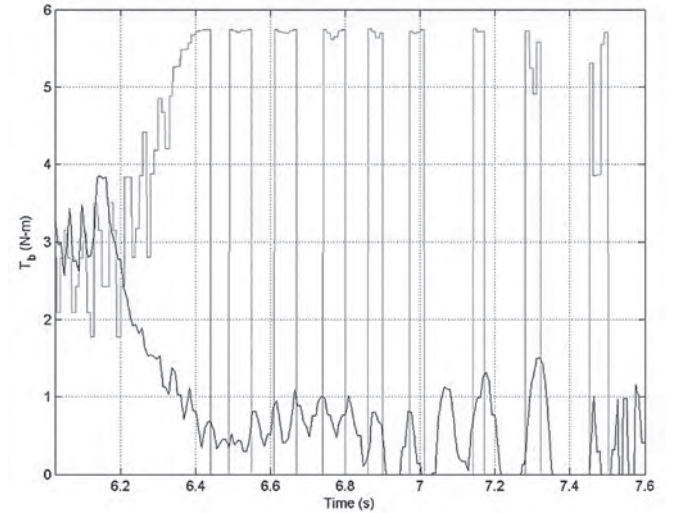


Figure 8. Input control applied to system T_b [N m vs s]: Proposed controller (17) (black); sliding-mode control (gray).
Source: The authors.

adaptive controller. The experimental results also show the performance of this dynamic controller in comparison with a sliding-mode control that was proposed in the literature.

The sliding-mode controller suffers from chattering, which is absent in the proposed controller and thus shows better behavior. Moreover, the proposed controller achieves shorter braking distances in shorter times, hence increasing safety. Finally, thanks to a smoother signal to the actuator with respect to the sliding-mode control, the proposed controller ensures longer durability of the pads, less noise, and an increased passenger comfort with lower jerk effects.

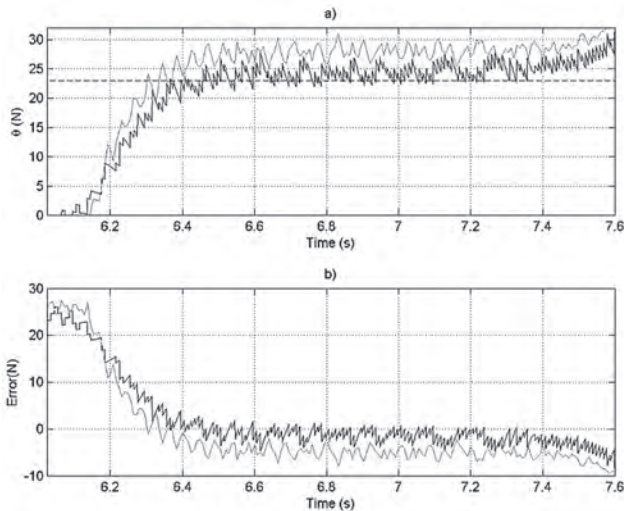


Figure 9. a) ABS laboratory parameter: Real θ (dashed) and estimated $\hat{\theta}$: Proposed controller (17) (black), estimated with sliding-mode control (gray); b) Tracking error $\theta - \hat{\theta}$: Proposed controller (17) (black), sliding-mode control (gray).

Source: The authors.

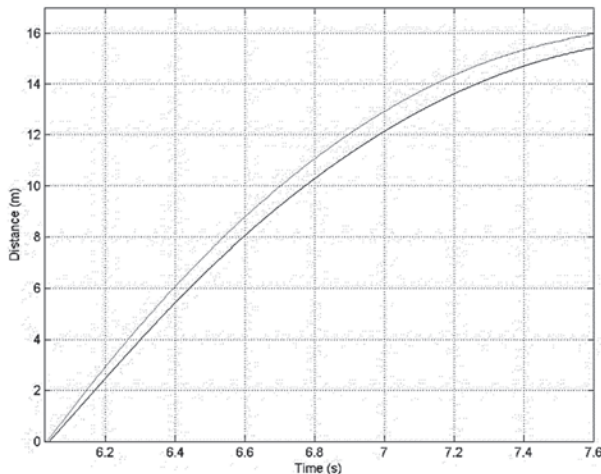


Figure 10. Braking distance: Proposed controller (17) (black), sliding-mode control (gray).

Source: The authors.

References

- [1] Emig, R., Goebels, H. and Schramm, J., Antilock braking systems (ABS) for commercial vehicles-status 1990 and future prospects, Proceeding International Transportation Electronics Congress Vehicle Electronics, 1990. pp. 515-523. DOI: 10.1109/ICTE.1990.713050
- [2] Kiencke, U. and Nielsen, L., Automotive control systems: For engine, driveline and vehicle, Springer, 2nd Ed, 2010.
- [3] Zhen-Jun, S., Tian-Jun, Z. and Hong-Yan, Z., Research on road friction coefficient estimation algorithm based on extended Kalman filter, Proceeding of International Intelligent Computation Technology and Automation, 2008, pp. 418-422. Doi: 10.1109/ICICTA.2008.38
- [4] Lin, C-H. and Chun, H., Self-learning fuzzy sliding mode control for antilock braking systems, IEEE Transaction on Control System Technology, 11(2), pp. 273-278, 2003. DOI: 10.1109/TCST.2003.809246

- [5] Lennon, W.K. and Passino, K.M., Intelligent control for brake system, IEEE Transaction on Control System Technology, 7(2), pp. 188-202, 1999. DOI: 10.1109/87.748145.
- [6] Wei, Z. and Xuenxun, G., An ABS control strategy for commercial vehicle, IEEE/ASME Transaction on, 20(1), pp. 384-391, 2015. DOI: 10.1109/TMECH.2014.2322629
- [7] Yazdanpanah, R.M., Design of robust speed and slip controllers for a hybrid electromagnetic brake system, Electric Power Applications IET, 9(4), pp. 307-318, 2015. DOI: 10.1049/iet-epa.2014.0256.
- [8] Alacalá, I., Claudio, A., Guerrero, G., Aguayo-Alquicira, J. and Olivares, V.H., Electric vehicle emulation based on inertial flywheel and DC machine, DYNA 81(18), pp.86-96, 2014.
- [9] Lin, W.C., Lin, C.L., Hsu, P.M. and Wu, M.T., Realization of antilock braking strategy for electric scooter, Industrial Electronics, IEEE Transaction, 61(6), pp. 2862-2833, 2014. DOI: 10.1109/TIE.2013.2276775
- [10] Ivanov, V.S. and Shyrokau, B., A survey of traction control and antilock braking systems of full electric vehicle with individually controlled electric motors, Vehicular Technology, IEEE Transaction on, 64(9), pp. 3878-3898, 2015. DOI: 10.1109/TVT.2014.2361860.
- [11] Inteco, User's manual, The Laboratory Antilock Braking System Controlled from PC, Inteco Ltd.Crakow, Poland, 2006.
- [12] Al-Mola, M-H., Mailah, M., Samin, P.M., Muhaimin, A-H. and Abdullah, M-Y., Performance comparison between sliding mode control and active force control for a nonlinear anti-lock brake system, WSEAS Transactions on System and Control, [Online]. 9, pp. 101-107, 2014. Available at: <http://www.wseas.org/multimedia/journals/control/2014/a225703-219.pdf>
- [13] Martinez-Gardea, M. Mares-Guzman I.J., Di Gennaro, S. and Acosta-Lua, C., Experimental comparison of linear and non linear controllers applied to an antilock braking system, IEEE International Conference on Control Applications, 2014, pp.71-76. DOI: 10.1109/CCA.2014.6981331.
- [14] Precup, R.-E., Spataru, S.-V., Radac, M.-B., Petriu, E-M, Preitl, S. and David, R.-C., Experimental results of model-based fuzzy control solutions for a laboratory antilock braking system, Human Computer Systems Interaction: Backgrounds and Applications, Springer, 2012.
- [15] Oniz, Y., Kayacan, E. and Kaynak, O., A Dynamic method to forecast the wheel slip for antilock braking system and its experimental evaluation, IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics-Part B: Cybernetics, 39(2), 2009. DOI: 10.1109/TSMCB.2008.2007966.
- [16] Dadashnialehi, A., Bab-Hadiashar, A., Cao, Z. and Kapoor, A., Accurate wheel speed measurement for sensorless ABS in electric vehicle, IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, 2012. pp.37-42. DOI: 10.1109/ICVES.2012.6294313.
- [17] Topalov, A-V., Kayacan, E., Oniz, Y. and Kaynak, O., Neuro-fuzzy control of antilock braking system using variable structure-systems based learning algorithm, International Conference on Adaptive and Intelligent Systems, September, [Online]. 2009. pp. 166-171, Available at: <http://doi.ieeeecomputersociety.org/10.1109/ICAIS.2009.35>
- [18] Pacejka, H-B., Tyre and vehicle dynamics. Elsevier Butterworth-Hein, 2006.
- [19] Kenneth, R-B., Reference input wheel slip tracking using sliding mode control, SAE Technical Paper Series, 2002-01-0301, 2002.
- [20] Acosta-Lua. C., Castillo-Toledo. B., Di Gennaro. S. and Martinez-Gardea. M., Dynamic control applied to a laboratory antilock braking system, Mathematical Problems in Engineering, 2015. DOI: 10.1155/2015/896859.
- [21] Utkin, V., Guldner, J. and Shi, J., Sliding mode control in electromechanical systems, The Taylor & Francis systems and control book series. Taylor & Francis, Philadelphia, PA, 1999.

C. Acosta-Lua, obtained his BSc. in Electronic Engineering from the Technological Institute of Morelia (2001), Mexico. He obtained his MSc. (2003) and PhD. (2007) in Electrical Engineering Science from CINVESTAV, Guadalajara, Mexico. He has participated in academic visits to INSA Lyon, France and DEWS Research Center in L'Aquila Italy. He undertook his Postdoctoral studies at DEWS Research Center in L'Aquila, Italy and the Ford Motor Company Centre for Research and Implementation.

Since 2009 he has been an Associate Professor of Automatic Control at the University of Guadalajara. Currently he is engaged in the development of nonlinear techniques for vehicle control and observer nonlinear subsystems. ORCID: 0000-0002-7398-2629.

S. Di Gennaro, obtained his BSc. in Nuclear Engineering in 1987 (summa cum laude), and his PhD. in Systems Engineering in 1992, both from the University of Rome "La Sapienza", Rome, Italy. In October 1990 he joined the Department of Electrical Engineering, University of L'Aquila, as assistant professor of Automatic Control. Since 2001 he has been associate professor of Automatic Control at the University of L'Aquila. In 2012 he joined the Department of Information Engineering Computer Science and Mathematics and he is also a member of the Center of Excellence DEWS. He teaches courses in Automatic Control and Nonlinear Control. He has visited various Research Centers including the Department of Electrical Engineering of Princeton University, the Department of Electrical Engineering and Computer Science at Berkeley, and the Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN in Guadalajara, Mexico. He works in the area of hybrid systems, regulation theory, and applications of nonlinear control.

ORCID: 0000-0002-2014-623X

M.E. Sanchez-Morales, obtained her BSc. in Physics in the Autonomous University of Puebla (2001), Mexico. She obtained her MSc. (2003) and PhD. (2007) in Science of Optics from CIO. She has made academic visits to CICESE Ensenada, México; UNAM México, DF; UAM Madrid, Spain and Laboratory of Physical Chemistry of Luminescent Materials in University Lyon II, Lyon France. Currently she works at the University of Guadalajara on the dynamics of movements applied to industry and optical phenomena in waveguides.

ORCID: 0000-0003-4018-672X



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería
Eléctrica e Ingeniería de Control

Oferta de Posgrados

Maestría en Ingeniería - Ingeniería Eléctrica

Mayor información:

E-mail: ingelcontro_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 52 64

Modeling attenuation and dispersion of acoustic waves in porous media containing immiscible non viscous fluids

Alejandro Duitama-Leal ^a, Ovidio Almanza ^b & Luis Montes-Vides ^c

^a Departamento de Matemáticas, Universidad de Cundinamarca, Bogotá, Colombia, adulfisica@gmail.com.

^b Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. oaalmanzam@unal.edu.co

^c Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. lamontesv@unal.edu.co

Received. March 16th, 2016. Received in revised form. August 12th, 2016. Accepted. September 2nd, 2016.

Abstract

This paper reports the results of the propagation of P-waves in porous media, simulated by solving the generalized Biot's equations in finite differences. In saturated models, it was observed that when a wave advances, the maximum amplitude of the spectrum is shifted to lower frequencies, and that this maximum amplitude and its frequency are directly related. Besides this, the quality factor decreases with porosity and saturation. Hence, attenuation becomes higher when porosity, saturation, and frequency increase but tends asymptotically towards a constant value. Although phase analysis is generally discarded, it does provide interesting results. It was noted that the wave phase changes linearly with frequency at a rate of change that increases linearly with travel time. This rate increases with saturation but decreases slightly with porosity. This work ignores spherical divergence or scattering and concentrates on intrinsic attenuation caused by friction, particularly between fluids and solid particles.

Keywords. Biot theory, attenuation, viscosity, saturation, porosity.

Modelado de atenuación y dispersión de ondas acústicas en medios porosos que contienen fluidos inmiscibles no viscosos

Resumen

Este artículo reporta resultados de la propagación de ondas P en medios porosos, simulada solucionando en diferencias finitas las ecuaciones generalizadas de Biot. En modelos saturados se observó que cuando avanza la onda, la amplitud máxima del espectro se desplaza hacia frecuencias menores, y que esta amplitud máxima y su frecuencia están directamente relacionadas. Además, que el factor de calidad disminuye con la porosidad y la saturación. Por ende, la atenuación aumenta con la porosidad, la saturación y la frecuencia pero tiende asintóticamente a un valor constante. Se observó que la fase de la onda cambia linealmente con la frecuencia a una tasa de cambio que aumenta linealmente con el tiempo de viaje. Esta tasa aumenta con la saturación pero disminuye ligeramente con la porosidad. Este trabajo ignora la divergencia esférica y la retro dispersión, concentrándose en la atenuación intrínseca causada por la fricción, en particular entre líquido y partículas sólidas.

Palabras clave. Teoría de Biot; atenuación; viscosidad; saturación; porosidad.

1. Introduction

Attenuation is the exponential decay of traveling wave amplitude and dispersion is the change of velocity with frequency. These can be used to enhance seismic resolution and as direct hydrocarbon indicators. The intrinsic

attenuation is quantified by the inverse of the quality factor Q^{-1} as the fraction of wave energy transformed to heat in each period, whereas the attenuation scattering Q_{scat}^{-1} is due to energy scattered in all directions. The sum of both is known as total attenuation. In mild stratified sediments, the scattering losses are considered negligible depending on

How to cite: Duitama-Leal, A., Almanza, O. & Montes-Vides, L. Modeling attenuation and dispersion of acoustic waves in porous media containing immiscible non viscous fluids
DYNA 83 (199) pp. 78-85, 2016

frequency range, varying the relation $Q^{-1}/Q_{\text{scat}}^{-1}$ from 19 in sonic logs to 4 in VSP (Vertical Seismic Profile) [1]. In sedimentary environments, Q^{-1} values ranging from 10^{-2} to 10^{-1} across the seismic band (1-150 Hz) have been reported [1].

Despite scientific improvements, the physical phenomena related to the intrinsic and scattering attenuations in sedimentary rocks are not completely understood. Notwithstanding different flow regimes and frequency bands, it is possible to explain some aspects of wave attenuation with a single mechanism: wave induced fluid flow - WIFF. When a wave stresses an average element, pore fluids respond with different changes in their fluid pressures. As a consequence, fluids within the porous element start flowing, significantly attenuating the wave energy. It has been demonstrated that these fluid-flow waves are responsible for dispersion and attenuation at low frequencies (31-123 Hz) [2]. Additionally, the relative motion between the rock matrix and the fluids is intensified by the presence of fluid-fluid interfaces and their pressure gradients [3]. It has been demonstrated that WIFF causes significant attenuation in partially saturated Berea sandstone at low and high pressure [4]. The induced flows take place at distinct scales, the macroscopic scale phenomenon at low or high frequencies is known as "Biot loss" [5,6]. Microscopic mechanisms caused by micro-cracks or broken grain contact under stress and known as squirt flow have been proposed to explain measured attenuation at ultrasonic frequencies [7-9]. Also, mesoscopic mechanisms have been reported [10] to treat wave induced flow due to patchy saturation. Pride and Berryman [11,12] published research on mesoscopic losses occurring in the double-porosity model. At low rates of varying strain and at a larger length scale compared to typical pore size, the fluid pressure has enough time to equilibrate between the porous phases and consequently, the double porosity model is reduced to the Biot one porosity mechanism [13]. It is even believed that at seismic frequencies the main cause is the WIF; in homogeneous media, WIF becomes weaker and Biot loss could be sizeable. On the other hand, understanding the effects of saturation and viscosity on seismic response requires numerical simulations given that laboratory tests must be carried out with strains and frequencies set in the seismic domain. Hence, the propagation of acoustic waves in wet porous media was numerically simulated. Biot's equations were extended to porous media saturated with two immiscible fluids [14], solved in finite differences and coded in a C++ program. These equations include a complex quantity that represents the deviation from Poiseuille friction as the frequency increases, transforming the static viscosity coefficient into a dynamic complex term. Models with variable porosity and saturation were used to discriminate their separated effects of porosity and saturation. Spectral analysis using Fourier transform provided information about the behavior of amplitude and phase spectra of wavelets (although phase analysis is mostly disregarded) that characterize seismic response within these two parameters.

2. Theory

2.1. Wave propagation in porous media

The stresses and strains of the material inside a continuous elastic volume are connected by the Hooke's law, which only holds for some materials under certain loading conditions. Under these circumstances, the second-order tensors that represent stress and strain are related through a fourth-rank stiffness tensor.

Now, consider a homogeneous and isotropic volume of rock δv with porosity β and density ρ_{11} , which contains two immiscible fluids with saturation S and $(S-1)$ and respective densities ρ_{22} and ρ_{33} . The displacements of the solid, and fluids 1 and 2 are designated by the independent vectors $\vec{u} = (u_x, u_y, u_z)$, $\vec{U} = (U_x, U_y, U_z)$ and $\vec{V} = (V_x, V_y, V_z)$.

When a wave propagates across a media, the faces of the solid volume are under the stress tensor

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

and the surfaces of fluids 1 and 2 are under forces which are proportional to the fluids pressure $-p$ according to.

$$F_1 = -p\beta S \quad (2)$$

$$F_2 = -p\beta(1 - S) \quad (3)$$

The minus sign indicates that the force is exerted in the opposite direction to the pressure.

The following strain tensor represents the deformed porous solid

$$e_{ij} = \begin{bmatrix} e_{xx} & e_{xy} & e_{xz} \\ e_{yx} & e_{yy} & e_{yz} \\ e_{zx} & e_{zy} & e_{zz} \end{bmatrix} \quad (4)$$

with $e_{xx} = \partial u_x / \partial x$, $e_{xy} = \partial u_x / \partial y$, $e_{xz} = \partial u_x / \partial z$, $e_{yx} = \partial u_y / \partial x$, $e_{yy} = \partial u_y / \partial y$, $e_{yz} = \partial u_y / \partial z$, $e_{zx} = \partial u_z / \partial x$, $e_{zy} = \partial u_z / \partial y$ and $e_{zz} = \partial u_z / \partial z$.

The changes of volume in fluids 1 and 2 are

$$e_1 = \frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{\partial U_z}{\partial z} \quad (5)$$

$$e_2 = \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \quad (6)$$

The kinetic energy of the system E_k per unit of volume is estimated by.

$$2E_{Kinetic} = \left[\begin{aligned} &\rho_{11} \left(\left(\frac{\partial u_x}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} \right)^2 \right) + \\ &\rho_{22} \left(\left(\frac{\partial U_x}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial U_y}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial U_z}{\partial t} \right)^2 \right) + \\ &\rho_{33} \left(\left(\frac{\partial V_x}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_y}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_z}{\partial t} \right)^2 \right) + \\ &2\rho_{12} \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} \frac{\partial U_x}{\partial t} + \frac{\partial u_y}{\partial t} \frac{\partial U_y}{\partial t} + \frac{\partial u_z}{\partial t} \frac{\partial U_z}{\partial t} \right) + \\ &2\rho_{13} \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} \frac{\partial V_x}{\partial t} + \frac{\partial u_y}{\partial t} \frac{\partial V_y}{\partial t} + \frac{\partial u_z}{\partial t} \frac{\partial V_z}{\partial t} \right) \end{aligned} \right] + \rho_{11} \left(\left(\frac{\partial u_x}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} \right)^2 \right) + \rho_{22} \left(\left(\frac{\partial U_x}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial U_y}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial U_z}{\partial t} \right)^2 \right) + \rho_{33} \left(\left(\frac{\partial V_x}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_y}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_z}{\partial t} \right)^2 \right) \quad (7)$$

corresponds to the kinetic energy of the matrix, and the kinetic energy of fluids 1 and 2, respectively. The mass coefficients ρ_{12} and ρ_{13} are apparent densities which represent coupling parameters between the fluids and the solid, so the last two terms correspond to their coupling energies. The weak gas-liquid interaction was not taken into account. As a result, the friction is only due to the relative motion between the solid and every fluid, and the dissipation function D becomes.

$$D = \frac{b}{2} \left[\left(\frac{\partial u_x}{\partial t} - \frac{\partial U_x}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial t} - \frac{\partial U_y}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} - \frac{\partial U_z}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} - \frac{\partial V_x}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial t} - \frac{\partial V_y}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} - \frac{\partial V_z}{\partial t} \right)^2 \right] \quad (8)$$

where b is the Darcy's coefficient of the fluid component that relates the total friction force on the fluid with the average fluid velocity and depends on the fluid's dynamic viscosity γ , the permeability κ , and the porosity β of the matrix, according to.

$$b = \frac{\gamma\beta^2}{\kappa}, \quad (9)$$

b depends on the fluids hence $b = b_1 + b_2$, where $b_1 = \gamma_1(\beta S)^2/\kappa$ and $b_2 = \gamma_2(\beta(1-S))^2/\kappa$ are the individual Darcy coefficients of each fluid. After a certain frequency f_L given later by equation (19), fluids behave as a non-laminar or Poiseuille flow, hence D in equation (8) must be multiplied by the factor

$$F(\Gamma) = \frac{F(\delta \sqrt{(f(\rho_{12} + \rho_{22} + \rho_{13} + \rho_{33})/(4\sqrt{2}b))})}{F(\delta \sqrt{(f(\rho_{12} + \rho_{22} + \rho_{13} + \rho_{33})/(4\sqrt{2}b))})} \quad (10)$$

$\Gamma = \sqrt{f/f_L}$ represents the ratio between angular

frequency and critical frequency f_L , δ is a structure factor which depends on pore geometry, and ρ_{12} , ρ_{22} , ρ_{13} and ρ_{33} are defined by.

$$\rho_{22} = c\rho_1\beta S, \quad \rho_{12} = \rho_1\beta S(1-c), \quad \rho_{13} = \rho_2\beta(1-S)(1-c), \quad \rho_{33} = c\rho_2\beta(1-S)$$

The propagation of waves across the porous matrix saturated by the immiscible fluids is governed by the system of coupled equations.

$$\left[\begin{aligned} &\mu \vec{\nabla}^2 \vec{u} + \\ &(\lambda + 2\mu) \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) + \\ &+ Q_1 \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{U}) + \\ &+ \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{V}) \end{aligned} \right] = \left[\begin{aligned} &\frac{\partial^2}{\partial t^2} (\rho_{11} \vec{u} + \rho_{12} \vec{U} + \rho_{13} \vec{V}) + \\ &bF(\Gamma) \frac{\partial}{\partial t} (\vec{u} - \vec{U}) + \\ &bF(\Gamma) \frac{\partial}{\partial t} (\vec{u} - \vec{V}) \end{aligned} \right] \quad (11)$$

$$\left[\begin{aligned} &Q_1 \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) + \\ &R_1 \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{U}) \end{aligned} \right] = \left[\begin{aligned} &\frac{\partial^2}{\partial t^2} (\rho_{22} \vec{U} + \rho_{12} \vec{u}) - \\ &bF(\Gamma) \frac{\partial}{\partial t} (\vec{u} - \vec{U}) \end{aligned} \right] \quad (12)$$

$$\left[\begin{aligned} &Q_1 \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) + \\ &R_1 \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{V}) \end{aligned} \right] = \left[\begin{aligned} &\frac{\partial^2}{\partial t^2} (\rho_{33} \vec{V} + \rho_{13} \vec{u}) - \\ &bF(\Gamma) \frac{\partial}{\partial t} (\vec{u} - \vec{V}) \end{aligned} \right] \quad (13)$$

The displacements vectors $\vec{u} = (u_x, u_y, u_z)$, $\vec{U} = (U_x, U_y, U_z)$ and $\vec{V} = (V_x, V_y, V_z)$ are completely described by the nine independent equations 11, 12 and 13. In isotropic material, the transverse and longitudinal waves are uncoupled and they obey independent equations of propagation. The terms D_1 , R_1 , R_2 , Q_1 and Q_2 in equations 11, 12 and 13 are defined below.

$$D_1 = K_s \left[1 + \beta S \left(\frac{K_s}{K_1} - 1 \right) + \beta(1-S) \left(\frac{K_s}{K_2} - 1 \right) \right] \quad (14)$$

$$R_1 = s \left(\frac{\beta K_s}{D_1 - K_b} \right)^2 \quad (15)$$

$$R_2 = (1-s) \left(\frac{\beta K_s}{D_1 - K_b} \right)^2 \quad (16)$$

$$Q_1 = \beta S \left(\frac{K_s(K_s - K_b)}{D_1 - K_b} - \frac{K_s^2}{D_1 - K_b} \beta \right) \quad (17)$$

$$Q_2 = \beta(1 - S(\frac{K_S(K_S - K_b)}{D_1 - K_b} - \frac{K_S^2}{D_1 - K_b}\beta)) \quad (18)$$

μ is the shear modulus, K_b is the Bulk Modulus of the Structure and λ is the second Lamé's parameter, R_1 and R_2 represent the pressure on fluids 1 or 2 required to displace the fluids into the porous, and Q_1 and Q_2 are physical constants that provide information about the solid-fluids couplings. K_1 and K_2 are the bulk modulus of the fluid 1 and 2, and K_s is the bulk modulus of the sand (grains).

In a porous material with an average pore diameter of d , the Poiseuille flow occurs below a certain frequency f_L that defines the low frequency bandwidth [5]. Such a frequency is given by.

$$f_L = (\pi\gamma)/(4d^2) \quad (19)$$

The longitudinal waves are decoupled from transverse waves, by applying the divergence operator on both sides of equations (11), (12) and (13) to finally obtain.

$$\begin{bmatrix} (\lambda + 2\mu)\bar{\nabla}^2 e + \\ Q_1\bar{\nabla}^2 e_1 + \\ Q_2\bar{\nabla}^2 e_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2}{\partial t^2}(\rho_{11}e + \rho_{12}e_1 + \rho_{13}e_2) + \\ bF(\Gamma)\frac{\partial}{\partial t}(e - e_1) + \\ bF(\Gamma)\frac{\partial}{\partial t}(e - e_2) \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} Q_1\bar{\nabla}^2 e + \\ R_1\bar{\nabla}^2 e_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2}{\partial t^2}(\rho_{22}e_1 + \rho_{12}e) - \\ bF(\Gamma)\frac{\partial}{\partial t}(e - e_1) \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} Q_2\bar{\nabla}^2 e + \\ R_2\bar{\nabla}^2 e_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2}{\partial t^2}(\rho_{33}e_2 + \rho_{13}e) - \\ bF(\Gamma)\frac{\partial}{\partial t}(e - e_2) \end{bmatrix} \quad (22)$$

The set of equations 20, 21 and 22 rule the propagation of longitudinal waves in porous media containing fluids. The extension of this theory to the high-frequency range was developed by Biot [6], and since then it has been widely used in petroleum engineering.

A more detailed explanation of Biot's theory can be found in reference [14,15].

2.2. Attenuation and Dispersion

Intrinsic seismic attenuation is characterized by the quality factor Q , defined in terms of the mean stored energy W divided by the energy lost δW during a cycle of sinusoidal deformation. The lost energy is absorbed by the medium as

heat energy. Q quantifies the attenuation caused by fluid movement and friction in pores, and is related to the phase angle ϑ between stress and strain, according to

$$Q^{-1} = \tan(\vartheta) \quad (23)$$

As is known, the Earth's crust preferentially attenuates higher frequencies, diminishing the seismic resolution.

Wavelets are formed by superposing monochromatic waves called frequency components of the wave, where each component travels with a velocity called phase velocity that depends on its frequency. Dispersion is the phenomenon by which each component has a different phase velocity that distorts the shape of the wave. When this occurs, the medium is referred to as dispersive.

3. Methodology

The system of simultaneous differential equations (20), (21) and (22), solved in the second order central finite difference scheme, was implemented in a C++ code. Porous sandstones were modeled as homogeneous isotropic porous media containing non-viscous fluids (gas and water). Each model with a different porosity and a distinct saturation according to its mechanical properties is listed in Table 1. To eliminate ghost reflections in the lateral and inferior regions bordering the model, non-reflecting borders were included by implementing Perfectly Matched Layers (PML) [16]. The efficiency of PML borders surrounding the model is observed in Fig. 1A containing three snapshots. the first at $t=5$ ms, the second at $t=15$ ms with spurious reflections on the borders, and the third at $t=15$ ms without reflections on PML borders. In order to circumvent geometric dispersion, the source generates a plane wave on the model simulating a 60Hz Ricker wavelet. In each simulation, the wave propagated in a 2D model with a depth of 2km and a width of 0.05 km formed grids that were 0.5 m high and 0.5 m thick. The downward wave was recorded at 20 points with a separation of 100 meters between one recording position and the next. The simulation time was 350 milliseconds and the sampling rate, 50 microseconds. According to equation (14), and taking into account the values listed in Table 1, the estimated critical frequency values are in kHz, hence the bandwidth of simulations is located in the seismic frequency range. To observe the isolated effect of porosity on attenuation and dispersion, some numerical simulations ran in fully saturated models each one with a different porosity. With that intention, homogeneous models saturated with water at 99.9% were created, with porosities varying of between 2.5% and 22.5% and with increases of 2.5%. Similarly, to observe the isolated effect of saturation on attenuation, other numerical simulations were run in constant porosity models with different saturations, ranging from 10% to 99.9%, with increases of 10%. For each simulation, the wavelets recorded in depth in each model, were spectrally decomposed by Fourier transform providing their respective amplitude and phase spectra. Besides the above, arrival times were estimated to find out the combined effect of porosity and saturation in P-wave velocity.

Table 1

Mechanical properties of model with pore containing gas and water.

Properties	Sandstone	Water	Gas
Density [kg/m ³]	2650	1000	1.21
Grain Bulk modulus [GPa]	20	2	1.42 x 10 ⁻⁴
Dynamic viscosity [Pa-s]		1 x 10 ³	1.81 x 10 ⁻⁵
Porosity [%]	0< β <40		
Saturation [%]		10 <S< 99.9	
Shear modulus [MPa]	26.1		
Dynamic permeability [m ²]	10 ⁻⁸ < χ <10 ⁻¹²		
Grain size [m]	5 x 10 ⁻⁴		
Pore tortuosity	1.25		
Shear modulus structure [N/ m ²]	2.61X10 ⁷		
Bulk modulus structure [N/ m ²]	4.36X10 ⁷		

Source. The authors.

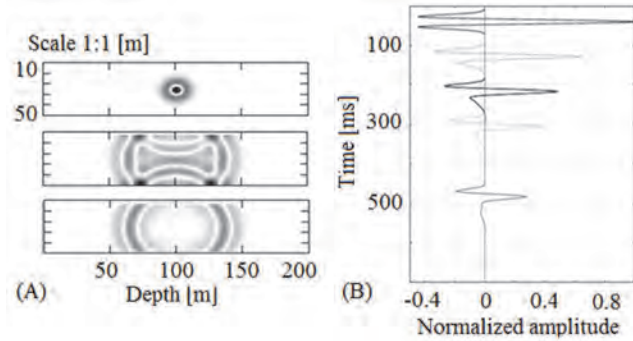


Figure 1. A) At top, In the first snapshot, 5 ms after source activation, in the second snapshot, 10 ms later with strong reflections on upper and lower borders and in the third snapshot, absence of ghost reflections due to the non-reflecting PML borders. B) Wavelets recorded at different depths with decreasing amplitudes and changing waveform.

Source. The authors.

3.1. Analysis of results

Fig. 1B depicts a synthetic seismogram formed by six superimposing wavelets recorded in depth in a 15% porosity model of a porous sandstone which is saturated with water at 99.9%, where the attenuation is manifested by a reduction of the amplitudes, while the dispersion is manifested by changing the waveforms. In a perfectly elastic homogeneous-isotropic medium, all frequency components travel with the same phase velocity without energy loss and, as a result, the wavelet holds its form while moving. The six wavelets of Fig. 1A were Fourier transformed and their amplitude spectra plotted in Fig. 2A, indicating the depth at which each wavelet was recorded. The image shows the amplitude spectrum diminishing in depth whereas the higher amplitude A_m of each spectrum is shifted toward low frequencies; from now on, the frequency of the maximum component energy of each spectrum will be referred to as f_m . On the surface, f_m is 60 Hz but at 100 m depth, it is 47 Hz. It reaches 45 Hz at 200 m; simultaneously the shape of the spectrum is continuously modified until it becomes bi-modal at 600m. Given that the

plane wave does not suffer geometric dispersion, the above observed behavior is associated entirely to the friction by the relative motion between the fluids and the pore wall. Fig. 2B contains the phase spectra of wavelets recorded at depths of 100, 200 and 400 m. The phase spectra indicate that phase and frequency are related by the expression $\phi(\omega) = \phi_0 + m(z)\omega$, where the ratio of change of phase with frequency $m(z) = \frac{\partial \phi}{\partial \omega}$ increases in depth z . The above procedure, including wave propagation, wavelet recording in depth, and spectral analysis, was repeated for all numerical simulations.

Now, to quantify the impact of porosity on attenuation and dispersion, the wavelets recorded in depth and supplied by the simulation in each model were spectrally decomposed using the Fourier transform. As stated, each saturated model has a different porosity. From now on, the spectra of wavelets recorded in depth will be referred to as spectra in depth. Accordingly, the spectra in depth of each model were overlapped as shown in Fig. 2. Next, the logarithms of measured amplitudes at 40, 50, 60, 70, and 80 Hz were normalized by dividing each value by the maximum value, as shown in Fig. 3A. Each curve indicates that attenuation becomes stronger with porosity, which is explained by the fact that the pore surface, where friction occurs, is extended when porosity increases. Also, by comparing the curves according to frequency, it can be deduced that attenuation caused by porosity is strengthened when frequency increases.

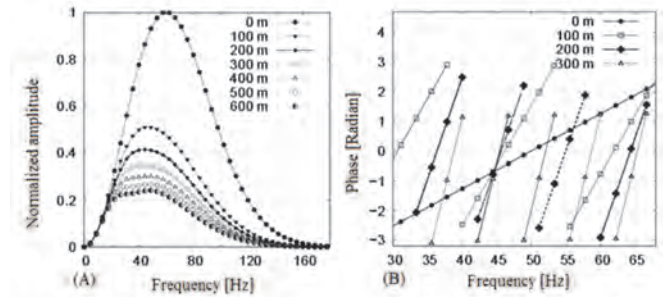


Figure 2 A) Amplitude spectra of source and wavelets recorded at depths of 100, 200, 300, 400, 500 and 600 m where the attenuation of high frequency components is evident. B) Phase spectra of wavelets at depths of 0, 100, 200 and 300 m, with each one showing a linear relationship between the phase and frequency.

Source. The authors.

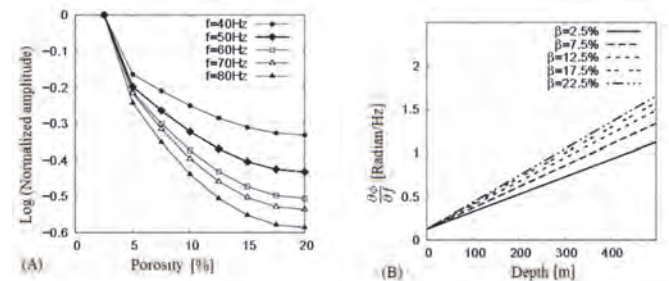


Figure 3 A) Variation of amplitudes for different frequency components as a function of porosity. B) Variation of phase with frequency ($\frac{\partial \phi}{\partial \omega}$) increases linearly with time with the rate exacerbated by porosity.

Source. The authors.

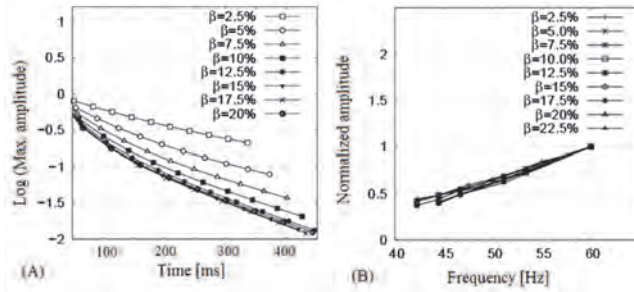


Figure 4. A) Decay of the amplitude with porosity measured at different depths. B) A linear relationship between normalized A_m and f_m which depends weakly on porosity.

Source. The authors

This can be explained by the following fact. At low frequencies, there is a partial coupling between fluids and the solid but at higher frequencies, the coupling breaks and friction increases together with the energy transfer rate. In order to find the effects of porosity on dispersion, $m(z) = \partial\phi/\partial f$ were measured in phase spectra in depth of each model with a different porosity. The summarized results are shown in Fig. 3B. Fig. 2B shows that in a homogeneous-isotropic saturated media, $m(z)$ increases with depth, whereas Fig. 3B shows that $m(z)$ becomes higher when porosity increases, exacerbating the dispersion phenomena. The term $m(z) = \partial\phi/\partial f$ might be considered a seismic attribute and therefore a porosity indicator inside a fully saturated lithic unit, relating their values directly with their porosities.

On the other hand, the highest amplitudes of all spectra in depth were estimated. Fig. 4A shows curves relating the logarithm of the highest amplitudes A_m versus travel time and porosity. Each curve shows an exponential decay of amplitude with the travel time and a decay factor which increases with porosity. Although attenuation increases with porosity, the lines tend asymptotically to a limiting line established in this modeling by a porosity of about 22.5%. This means that above this value, attenuation will remain constant no matter what the value of porosity is.

Fig. 1B illustrates that the maximum amplitude A_m shifts to lower frequencies when the depth increases. Therefore, the highest amplitudes (A_m) of all spectra in depth and their frequencies (f_m) were estimated and plotted in Fig. 4B. A numerical regression indicates a linear relation between A_m and f_m which is almost insensitive to porosity. In a real case, the dispersion around the relationship would be below estimation errors. The next step was to consider the quality factor Q , so the amplitudes at 40, 50, 60, 70 and 80 Hz of all spectra in depth versus porosity were plotted. Fig. 5A shows how amplitude decreases exponentially with porosity and increases with frequency. It means that the higher frequency components of waves are rapidly attenuated while the low frequency components remain. The amplitudes of the 60Hz component were plotted in Fig. 5B, which shows the decreasing effect of porosity on quality factor. Q tends asymptotically to a constant value, as porosity increases. Values from Fig. 5A were used to build the curves associated to components of 40, 50, 70 and 80 Hz. These curves showed

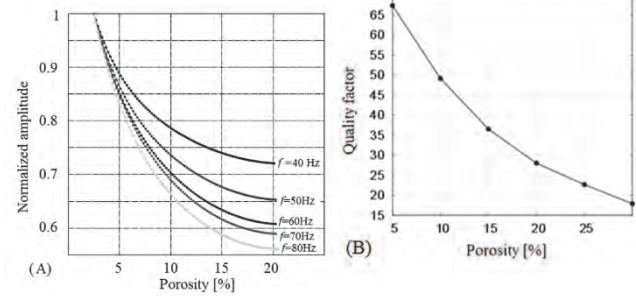


Figure 5 A) Normalized amplitude decays exponentially with porosity, and increases with frequency. B) Quality factor Q of 60Hz frequency component estimated in different constant porosity models, with a nonlinear relation that decreases according to increases in porosity β .

Source. The authors.

similar behavior to the observed in Fig. 5B. The range of Q (from 35 to 80) observed in Fig. 5B points out that there is a sizeable attenuation in the seismic bandwidth.

To establish the effect of porosity on P wave velocity, new simulations were run in saturated models with different porosity ranging from 2.5% up to 22.5% with a 2.5% variation each. The travel times estimated in depth displayed in Fig. 6A indicate that velocity decreases with porosity (from 3442 m/s in the 1% porosity model to 2093 m/s in the 25% porosity model). The observed variation in velocity coincides with reported velocity-porosity relationships obtained by numerical simulations to derive the elastic properties of model monomineralic consolidated sandstone [17] and empirical dataset of sandstone samples of varying porosity and clay content (from clean to 51% clay) whose velocities were measured at different pressures [18].

The observed velocity-porosity behavior in Fig. 6A was compared to the theoretical velocity models proposed by Wyllie & Gardner [19], Gassmann (1951) [20] and Biot [6], with all their curves plotted in Fig. 6B. The resulting curve shows a linear diminishing trend observed in laboratory research [2]. On one hand, the Wyllie & Gardner curve, which represents a time average equation and not a rigorous theoretical model, defines the upper limit of velocity-porosity relationship. On the other hand, Gassmann's velocity establishes the lower limit of velocity and coincides with Biot's velocity in case of a model without tortuosity, that is, entirely connected pores. In the presence of tortuosity, the velocity curve deviates from Gassmann's curve when porosity increases due to the fact that tortuosity affects solid-fluid coupling. The velocity of the rock matrix corresponds to the value where porosity becomes zero, settling around 3700 m/s. This result indicates that when the wave passes through a fully saturated medium, there is a delay in the journey that depends on porosity. Such behavior has also been observed in experimental data and field data [21].

Finally, the isolated effect of saturation in the spectra of amplitude and phase was studied. Fig. 7A shows the amplitude spectra of wavelets recorded in a 10% saturated model with a porosity of 10%. On the surface A_m occurs when f_m is 60 Hz, but as the wave propagates, A_m diminishes while its f_m moves towards lower frequencies. This behavior is accentuated

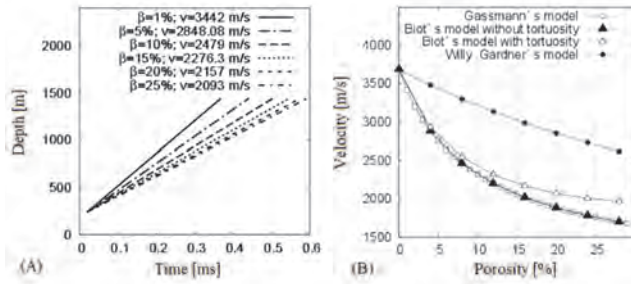


Figure 6 A) Travel times measured across different porosity fully saturated models used to estimate depth-velocity profile. B) Four different velocity-porosity curves provided by different theoretical velocity models together with velocities established in 7A. Source. The authors.

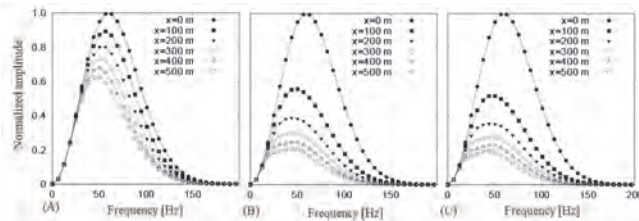


Figure 7. Amplitude spectra in three models with A) 10% saturation, B) 50% saturation, and C) 90% saturation for a model with 15% porosity. The images show that saturation strengthens both the phenomena of attenuation and dispersion. Source. The authors.

when saturation reaches 50% in same model seen in Fig. 7B, where a bi-modal shape appears in a more attenuated spectrum. Fig. 7C shows a stronger effect due to a higher saturation. It can thus be concluded that saturation strengthens both the phenomena of attenuation and dispersion.

Simulations were run on models with porosities of 10%, 15%, 20%, 25% and 30%, with saturations of 10%, 20%, 30% and so on until reaching 99.9%. In each spectra in depth, the quality factors at 60 Hz were estimated and the results, summarized in Fig. 8A, show that the quality factor decreases with saturation and porosity. However, it can be noted that the saturation effect on the quality factor is more intense for saturations below 40%. Above this value, a trend is depicted that is less steep. Furthermore, Fig. 8A shows that the effect of porosity on the quality factor is steeper for lower values with a limiting Q curve of around 22%. In Fig. 8B, the combined effect of porosity and saturation on velocity is observed. When saturation is less than 90%, the propagation velocity remains almost insensitive to saturation, but exceeding that value, velocity increases rapidly until reaching full saturation. A similar behaviour of velocity with water saturation in experimental tests has been reported [22] (Winkler and Murphy, 1995). The extremely low bulk modulus of gas makes it feasible to compress the rock-fluid aggregate, keeping an almost constant velocity. Thus, velocity is mainly affected by porosity and to a lesser extent by saturation except when saturation is almost full. Finally, the influence of saturation on $m(z) = \partial\phi/\partial f$ was studied by

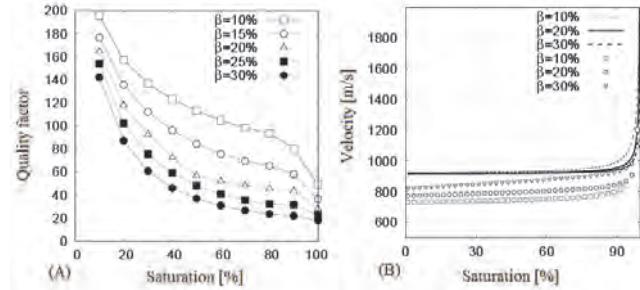


Figure 8 A) Combined effect of porosity and saturation on quality factor, B) Combined effects of porosity and saturation on velocity. Source. The authors.

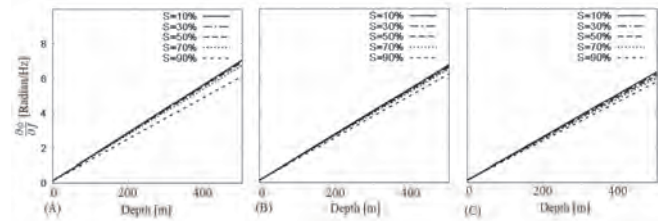


Figure 9. A) 5% porosity models with different saturations, B) 15% porosity models with different saturations, and C) 25% porosity models with different saturations. The images show $\partial\phi/\partial f$ diminishing slightly with saturation. Source. The authors.

analyzing the phases observed in the previous simulations. The results are shown in Figs. 9A, 9B and 9C and outline a linear relationship between the increase of $\partial\phi/\partial f$ and travel time. Slopes in the set of Figs. 9A, 9B and 9C show that $\partial\phi/\partial f$ decreases slightly with saturation. Conversely, Fig. 3B shows that $\partial\phi/\partial f$ increases with porosity. Porosity increases the change of phase with frequency and simultaneously saturation slows this effect down but only

4. Conclusions

The propagation of P-wave in porous media that model porous sandstone containing gas and water was numerically simulated allowing for the characterization of the effects of porosity and saturation on velocity, attenuation, and dispersion. When a wave propagates in saturated media, the maximum amplitude of the spectrum shifts to lower frequencies. As a result, sizeable Biot's losses in seismic bandwidth were observed with low Q values that contradict the belief regarding its absence. Attenuation increases as porosity, saturation and frequency increase but it tends asymptotically towards a limit value. Moreover, when porosity and saturation increase, Q diminishes. Although usually discarded, the phase analysis did provide interesting results. On one hand, the phase varies with frequency with a rate that increases when wavelets propagate. On the other hand, this rate is almost insensitive to saturation but increases with porosity. This term $\partial\phi/\partial f$ might be considered a seismic attribute and therefore a porosity indicator.

Finally, a relationship between acoustic wave velocity and fully saturated porosity was established. When saturation is less than 90%, the propagation velocity remains almost constant, but when that value is exceeded, velocity increases rapidly until reaching full saturation.

Acknowledgements

The authors would like to thank Universidad Nacional de Colombia for the support given to this research, especially to the Graduate Program in Geophysics. This paper is a partial result obtained by the physicist Alejandro Duitama, while preparing his Master's thesis in Geophysics.

Bibliography

- [1] Sams, M., Neep, J., Worthington, M. and King, M., The measurements of velocity dispersion and frequency-dependent intrinsic attenuation in sedimentary rocks. *Geophysics*, 62, pp. 1456-1464, 1997. DOI: 10.1190/1.1444249.
- [2] White, J., Computed seismic speeds and attenuation in rocks with partial gas saturation. *Geophysics*, 40, pp. 224-232, 1975. DOI: 10.1190/1.1440520.
- [3] Carcione, J., Helle, H. and Pham, N., White's model for wave propagation in partially saturated rocks. Comparison with poroelastic numerical experiments. *Geophysics*, 68, 1389-1398., 2003. DOI: 10.1190/1.1598132.
- [4] Tisato, N., Quintal, B., Chapman, S., Madonna, C., Subramaniyan, S., Frehner, M., Saenger, E. and Grasselli, G., Seismic attenuation in partially saturated rocks. Recent advances and future directions. *The Leading Edge*, 33(6), pp. 648-655, 2014.
- [5] Biot, M., Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low frequency range. *J. Acous. Soc. Am.*, 28, pp. 168-178, 1956. DOI: 10.1121/1.1908239.
- [6] Biot, M., Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher-frequency range. *J. Acous. Soc. Am.*, 28, pp. 179-191, 1956. DOI: 10.1121/1.1908239.
- [7] Dvorkin, J., Mavko, G. and Nur, A., Squirt flow in fully saturated rocks. *Geophysics*, 60, pp. 97-107, 1995. DOI: 10.1190/1.1443767.
- [8] Mavko, G. and Nur, A., Wave attenuation in partially saturated rocks. *Geophysics*, 44, pp. 161-178, 1979. DOI: 10.1190/1.1440958.
- [9] Williams, K., Jackson, D., Thorsos, E., Tang, D. and Shock, S., Comparison of sound speed and attenuation measured in sandy sediments to predictions based on the Biot theory of porous media. *IEEE, J. Ocean. Eng.*, 27, pp. 413-428, 2002.
- [10] Johnson, D., Theory of frequency dependent acoustics in patchy-saturated porous media. *J. Acous. Soc. Am.*, 110, pp. 682-694, 2001. DOI: 10.1121/1.1381021.
- [11] Pride, S. and Berryman, J., Linear dynamics of double porosity and dual-permeability materials. I. Governing equations and acoustic attenuation. *Phys. Rev. E.*, 68, pp. 036603, 2003. DOI: 10.1103/PhysRevE.68.036603.
- [12] Pride, S. and Berryman, J., Linear dynamics of double porosity and dual-permeability materials. II. Fluid transport equations. *Phys. Rev. E.*, 60, pp. 4285-4299, 2003.
- [13] Caspari, E., Qi, Q., Lopes, S., Gurevich, B., Rubino, J., Velis, D., Clenell, M. and Muller, T., Wave attenuation in partially saturated porous rocks – New observations and interpretation across scales. *The Leading Edge*, 33(6) pp. 606-614, 2014.
- [14] Camarasa, M., Contribución a la teoría de Biot sobre propagación de ondas acústicas en sedimentos saturados en una mezcla de fluidos. Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España, 1992.
- [15] Duitama, A., Simulación de la atenuación de frecuencias en ondas sísmicas primarias, MSc. Tesis, Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 2013.
- [16] Zeng, Y., He, J. and Liu, W., The application of the perfectly matched layer in numerical modeling of wave propagation in poroelastic media. *Geophysics*, 66(4), pp. 1258-1266, 2001. DOI: 10.1190/1.1487073.
- [17] Knackstedt, M., Arns, C. and Pinczewskiz, W., Velocity-porosity relationships. I. Accurate velocity model for clean consolidated sandstones. *Geophysics*, 68, pp. 1822-1834, 2003.
- [18] Han, D., Nur, A. and Morgan, D., Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones. *Geophysics*, 51, pp. 2093-2107, 1986. DOI: 10.1190/1.1442062.
- [19] Wyllie, M. and Gardner, L.W., Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media, *Geophysics*, 21, pp 41-70, 1956. DOI: 10.1190/1.1438217.
- [20] Gassmann, F., Über die elastizität poröser medien, *Vier. der Natur. Gesellschaft*, 96, pp 1-26, 1951.
- [21] Korneev, V., Goloshubin, M., Daley, T. and Silin, G., Seismic low-frequency effects in monitoring fluid-saturated reservoirs. *Geophysics*, 69, pp. 522-532, 2004. DOI: 10.1190/1.1707072.
- [22] Winkler, K. and Murphy, W., Acoustic velocity and attenuation in porous rocks, in T. Ahrens, ed. *Rock physics and phase relations*, Reference Shelf 3, AGU, pp 20-34, 1955.

A. Duitama-Leal, is Physicist, and MSc. of Geophysics from Universidad Nacional de Colombia. Experience like instructor of physics and mathematics. Knowledge in geophysics and interest in research, particularly in numeric methods and simulation of physics and geophysics systems using the C++ language and parallel programming. In Geophysics, the topics are modeling of wave field, fluids mechanic and seismic theory inversion. ORCID. 0000-0002-5477-2191

O. Almanza-Montero, received the Dr. in Physic in the Universidad de Valladolid (Spain - 2000), his MSc. In Physic in the Universidad Nacional de Colombia. Currently he is professor in this University, from 1996. His works are focused in materials science such as semiconductor and antioxidant activity of some Colombian fruits as well. He is author of more than 50 paper published in different journals. Characterization techniques (XRD, EPR, IR, UV-vis) are methods he usually use. ORCID. 0000-0002-5141-6079

L. Montes-Vides, is Physicist from the Universidad Nacional de Colombia, MSc. in Engineering from the Universidad Nacional de Colombia in 1987 and Dr. in Science – Geophysics from the Universidade Federal do Pará (Brazil - 1998). At the Universidad Nacional de Colombia – sede Bogotá since 1990 as a lecturer in the following programs. undergraduate program in Geology, graduate programs in Master Science in Geophysics and Doctorate in Geosciences, all of them at the Faculty of Sciences. Research areas focused in Seismic prospecting, seismic inversion, seismic modeling and applied computing mathematics. Reviewer of following scientific journals. *ESRJ*, *Revista da SBGF*, *J.Appl. Geophysics* and *CT&F*. ORCID. 0000-0002-7470-9202

Influence of the mixing ratio on the anaerobic co-digestion of municipal biowaste with domestic wastewater sludge on methane production

Brayan Alexis Parra-Orobio, Patricia Torres-Lozada & Luis Fernando Marmolejo-Rebellón

Grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental – ECCA, Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, Colombia. brayan.parra@correounivalle.edu.co, patricia.torres@correounivalle.edu.co, luis.marmolejo@correounivalle.edu.co

Received: May 11th, de 2016. Received in revised form: August 22th, 2016. Accepted: September 12th, 2016

Abstract

Anaerobic co-digestion (A-Co) is a viable option to overcome the disadvantages of mono-digestion. This research presents the results of biochemical methane potential assays (BMPs) assessing the A-Co of municipal biowastes (MBW) from one city which perform source separation and selective collection with domestic wastewater sludge (DWS) from a municipal wastewater treatment plant (WWTP) in different DWS: MBW mixing ratios. Besides methane production, it was evaluated the hydrolysis (through a first-order kinetics model and the modified Gompertz model), since this is the limiting step of the A-Co of solid wastes. The results showed that A-Co of DWS with MBW is feasible and that DWS: MBW mixing ratio generated a synergistic effect in the process. The mixing ratio DWS:MBW that produced the largest quantities of methane ($105.6 \text{ mLCH}_4 \cdot \text{gVS}^{-1}$), optimal hydrolysis constants (K_h) and shortest lag phase (under 3.3 days) was 20:80.

Keywords: Anaerobic co-digestion; Hydrolysis; Municipal biowaste; Primary sludge; Renewable energy.

Influencia de la proporción de mezcla en la codigestión anaerobia de biorresiduos municipales con lodos de aguas residuales domésticas sobre la producción de metano

Resumen

La codigestión anaerobia (CA) es una de las opciones viables para superar las desventajas de la mono-digestión. Esta investigación presenta los resultados del Potencial Bioquímico de Metano (PBM) donde se evaluó la CA de biorresiduos municipales (BM) de una localidad que realiza separación en la fuente y recolección selectiva con lodos de aguas residuales domésticas (LARD) provenientes de una planta de tratamiento de aguas residuales en diferentes proporciones de mezcla. Se evaluó la producción de metano mediante el modelo modificado de Gompertz y la hidrólisis a través del modelo cinético de primer orden, ya que esta es la etapa limitante en la CA de residuos sólidos. La proporción de mezcla LARD:BM donde se lograron las mayores producciones de metano ($105.6 \text{ mLCH}_4 \cdot \text{gSV}^{-1}$), mejores constantes de hidrólisis (K_h) y fases de latencia cortas (menores a 3.3 días) fue 20:80.

Palabras clave: Biorresiduos municipales; Codigestión anaerobia; Energía renovable; Hidrólisis; Lodo primario

1. Introduction

Growing urbanization generates a continuous and progressive amount of many types of wastes (wastewater and

solid waste). Therefore, it is important to find alternatives for the treatment and final disposal of such wastes [1]. In Latin America, municipal biowaste (MBW) accounts for 50-70% of the municipal solid waste (MSW), whereas in Colombia, it accounts for 65% [2,3]. Treatment approaches have

How to cite: Parra-Orobio, B. A., Torres-Lozada, P. & Marmolejo-Rebellón, L. F. Influence of the mixing ratio on the anaerobic co-digestion of municipal biowaste with domestic wastewater sludge on methane production DYNA 83 (199) pp. 86-93, 2016

changed in recent years, and rather than disposing these type of wastes, they can be used as an alternative source of energy, being the biological processes the most appropriate process since it contribute to mitigate the effects of associated greenhouse gases and environmental impacts, such as the proliferation of vectors, production of leachates and loss of land value for landfills [2].

The anaerobic digestion (AD) of single substrates (mono-digestion) presents some drawbacks linked to substrate properties as: i. Sewage Sludge (SS), characterized by low organic loads; ii. the organic fraction of municipal solid waste (MBW) could have contained improper materials as well as a high concentration of heavy metals, among others. The anaerobic co-digestion (A-Co) is the simultaneous AD of two or more substrates, is a feasible option to overcome the drawbacks of mono-digestion and to improve the economic viability of AD facilities due to higher methane production which is an important source of renewable energy [4,5].

In addition, A-Co focused on mixing substrates favors positive interactions, i.e. macro- and micronutrient equilibrium, moisture balance and/or dilute inhibitory or toxic compounds, increased digestion rate, improved substrate stabilization, improved buffer capacity of the process, optimized rheological properties of the waste and improves economic conditions due to the potential of combining different flows and large amounts of waste in the same treatment system [6,7].

According to Hartmann et al. [7], A-Co can be used for different types of waste. Currently, transport cost of the co-substrate from the generation point to the AD plant is the first selection criteria. Despite this fact, it is still important to choose the best co-substrate and to select the best mixing ratio with the aim of promoting synergies, diluting harmful compounds, optimize the methane production and not disrupt digestate quality [4].

Mata-Alvarez, et al. [5] reported that the MBW has typically been used as co-substrate for domestic wastewater sludge (DWS) because, in many towns, WWTP were already equipped with anaerobic digesters. Indeed, A-Co of MBW and DWS is reflected as a way to reduce significantly the treatment costs of both wastes. For this reason, the A-Co of MBW and DWS has the potential to provide significant production of renewable energy, enhances the economic viability of the wastewater treatment plants (WWTP) and generates some economic and environmental benefits on municipal biowaste (MBW) disposal in sanitary landfills.

The proportion of substrates required by A-Co in order to produce renewable energy has been widely studied. Although it has been reported that these ratios have a different influence on A-Co depending on the nature of the substrates, the optimal values depend on their characteristics and should be assessed for each case and inoculum used. Lesteur et al. [8] stated that the optimal substrate ratio depends on aspects such as the potential production of volatile fatty acids (VFAs), buffer capacity and contribution of nutrients. Ponsá et al. [9] evaluated the 83:17 ratio of MBW using vegetable oil, animal fat, cellulose and protein as co-substrates and confirmed that the production of biogas by A-Co decreased notably when the waste contained high amounts of fat and protein.

On the other hand, Callaghan et al. [10] assessed A-Co from pig manure and MBW at four mixing ratios (80:20, 70:30, 60:40 and 50:50) and found that the mix with the

highest MBW content produced the best results regarding biogas production. Tandukar et al. [11] evaluated the effect of the organic load on the A-Co of primary sludge with restaurant grease traps, waste activated sludge and gum waste. They achieved greater methane production and better quality of digestate, especially in the content of nitrogen.

The hydrolysis is the limiting step in the AD, has been identified, as a major difficulty that occurs during this stage is the solubility of the substrate. This restricts the rate and extent of degradation of the particulate organic matter present in solid waste, which causes interference in the overall efficiency of the process in terms of methane production [12].

Studies of the biochemical and physicochemical processes that occur during A-Co of MBW with DWS showed that hydrolysis is the main limiting stage of the process and indicated that the biological process is affected by several factors that should be investigated experimentally and required the use of kinetics models [13-15].

Most kinetics models correspond to first-order kinetics. Krishna et al. [16] recommend the use of these models to enhance the study of hydrolysis and the modified Gompertz model is the most frequently used for such studies. These models can infer A-Co performance during important stages, such as acidogenesis and acetogenesis, and provide an understanding of biomass dynamics within the bioreactors.

In the literature there are few studies on DWS from WWTP with chemically assisted primary treatment (CAPT) technology, despite the fact that this technology predominates in developing countries as a solution to improve treatment efficiency of wastewater to solve their problems regarding sanitation, only around 6% of these achieved an acceptable treatment [12]. The use of CAPT significantly improves BOD removal (>55%) although the sludge amount increases [13,14] due to the use of coagulants, which may affect the physicochemical properties of the sludge and therefore can affect the A-Co thereof.

This research shows the A-Co as an alternative to improve treatment of DWS, using the MBW as a co-substrate. In addition, were evaluated different mixing ratios in order to identify both the synergistic or antagonistic effect such as the methane production.

2. Methodology

2.1. Experimental location

The assays were performed at an altitude of 970 m above the sea level. The room temperature was 23.6°C on average, and the controlled temperature of the experiment was $30 \pm 0.5^\circ\text{C}$.

2.2. Experimental stage

2.2.1. Characterization of substrates (MBW and DWS) and inoculum

The MBW were collected from a solid waste treatment plant (SWTP) in a Colombian city where integrated MSW management was held, including source separation and selective collection of waste. On average, $10200 \text{ kg}\cdot\text{week}^{-1}$ of MSW are generated, and MBW accounted for 66% of the

total waste, which is equivalent to 6732 kg·week⁻¹[3]. The sampling and characterization of MBW were performed following the recommendations of Sakurai [17]. The DWS was obtained from a municipal WWTP that employs ferric chloride in the chemically enhanced primary treatment.

Prior to physicochemical characterization and BMP testing, all inert material (stones, metal, charcoal, bone) and slowly degrading material (plastic, rubber, and leather) were removed from the MBW samples [18]. Afterwards, the materials were subjected to grinding as recommended by Sharma et al. [19] using a Waring Commercial CB15 blender at a speed of 15800 rpm for 1 minute (standard equipment speed).

The physicochemical characterization of the substrates was performed according to ICONTEC [20] and APHA [21]. The variables used for the characterization were pH (Units), humidity (%), total alkalinity TA, total bicarbonate alkalinity TBA (mgCaCO₃·L⁻¹), VFAs (mg·L⁻¹), acetic acid (mg·L⁻¹), propionic acid (mg·L⁻¹), butyric acid (mg·L⁻¹), palmitic acid (mg·L⁻¹), oleic acid (mg·L⁻¹), total and oxidizable carbon (%), UV₂₅₄ (cm⁻¹), total and filtered chemical oxygen demand (COD, mg·L⁻¹), biological oxygen demand (BOD, mg·L⁻¹), total nitrogen (%), total ammonia nitrogen (mg·L⁻¹), cellulose (%), starch (%), lignin (%), ether extract (mg kg⁻¹), proteins (%), carbohydrates, (%), raw fiber (%), total solids TS and volatiles VS (mg·L⁻¹).

The biodegradable fraction (BF) of the MBW and TPS was determined according to the methodology suggested by Espinosa et al. [22] (Eq. 1):

$$BF = 0.83 - 0.028 LC \quad (1)$$

Where BF is the biodegradable fraction in relation to the volatile matter (VM); 0.83 and 0.028 are empirical constants; and LC is the lignin content in the VM, expressed as a dry weight percentage.

Additionally, the non-ionized ammoniacal nitrogen and ammonium ion present in the substrates were quantified using Eqs. (2) and (3) as suggested by Sterling et al. [23]:

$$NH_3 = 1.13 \times 10^{-9} \cdot \frac{NH_3T}{H^+} \quad (2)$$

$$NH_3T = NH_3 + NH_4^+ \quad (3)$$

Where NH₃ is the non-ionized ammoniacal nitrogen (mg·L⁻¹); NH₃T is the total ammoniacal nitrogen (mg·L⁻¹); H⁺ is the concentration of hydrogen ions (mol·L⁻¹); and NH₄⁺ is the ammonium ion (mg·L⁻¹).

In order to ensure favorable conditions for A-Co, an inoculum concentration of 1.5 gVS·L⁻¹ was used in the BMP assays [24]. The inoculum was obtained from an anaerobic digester of the municipal WWTP of DWS, and was characterized in terms of physicochemical variables determined from the substrates. Additionally, Specific Methanogenic Activity-SMA (gCOD·gVS⁻¹·d⁻¹) test were carried out [25]. The MBW, DWS and inoculum were preserved at temperatures below 4°C for periods shorter than seven days until the assays were performed.

The results for physicochemical characteristics of the substrates and inoculums were processed by descriptive statistical methods.

2.2.2. Influence of DWS:MBW mixing ratios on methane production

The biogas was quantified according to the manometric method using an OxiTop® instrument to monitor the pressure. This equipment consists of a 250 mL reactor with a measuring head that is inserted in the reactor mouthpiece as well as a control that uses an infrared interface to transfer the data. The assays were performed in a WTW TS 606-G/2-i incubator with manual intermittent mixing during 20 days. The sample volume was 200 mL, and 50 mL were retained in the reactor for storage of the produced biogas as recommended by Aquino et al. [25].

The techniques to determine methane production are standardized methods used to provide improved conditions for the AD of the substrates. A solution of macronutrients and micronutrients was used to maintain stable conditions during the BMP assays [26], with a pH adjusted to 7.0 using NaHCO₃ solution at 4%. To capture CO₂ of biogas, NaOH pearls were used and composition of biogas was determined by gas chromatography (Chromatograph GC2014).

The volume of methane for standard conditions (SC) was determined according to the methodology proposed by Giménez et al. [27]. Thus, the fraction of dissolved methane in the experimental units was considered. The substrate-inoculum (S/I) ratio was 0.25 gVS_{substrate}·gVS_{inoculum}⁻¹ for all the experimental units. Moreover, the concentration of inoculums was maintained at a constant value, following the recommendations of Raposo et al. [28] for BMP assays without continuous stirring.

Only the mixing ratios were modified while maintaining the same organic load. The DWS:MBW mixing ratios assessed were 100:00, 80:20, 60:40, 40:60, 20:80 and 00:100, respectively. Each mixing ratios were replicated (n=2), and an additional unit that only contained inoculum with distilled water was used as the control for the determination of endogenous methane production.

The synergistic effect of co-digestion could be estimated as an additional methane yield for co-substrates over the weighted average of the individual substrate's BMP. If the differential (BMP-Weighted BMP) was positive and greater than the standard deviation (SD) of BMP, the synergistic effect could be confirmed. The weighted BMP of co-substrates were calculated with Eq. (4) [29]:

$$Weighted\ BMP = BMP_{DWS} * P_{DWS} + BMP_{MBW} * P_{MBW} \quad (4)$$

Where weighted BMP is the weighted average of BMP for co-substrates (mLCH₄·gVS⁻¹); BMP_{DWS} and BMP_{MBW} are the experimental methane yields for DWS and MBW, respectively (mLCH₄·gVS⁻¹); P_{DWS} and P_{MBW} are the percentage of DWS and MBW, respectively on a VS basis.

The C/N ratio was determined in each reactor according to the recommendations of Chiumenti [30] using Eq. (5):

$$\frac{C}{N_M} * M_{total} = \frac{C}{N_{MBW}} * M_{MBW} + \frac{C}{N_{DWS}} * M_{DWS} \quad (5)$$

Where C/N_M is the C/N ratio in the substrate mixture for each reactor; M_{total} is the mass of the substrate mixture in each reactor (gVS); C/N_{MBW} is the C/N ratio in the MBW; M_{MBW} is the MBW mass in each reactor (gVS); C/N_{DWS} is the C/N ratio

in the DWS; and M_{DWS} is the DWS mass in each reactor (gVS).

2.2.3. Kinetic Models

In order to determine the effect of the different mixing ratios on the BMP assay, an analysis of variance (ANOVA) and Tukey's test at $p < 0.05$ were applied by using the software R (i386 3.0.2). The response variable was the BMP. A statistical mixed model (Eq. 6) was used to determine the effect of the different ratios using the software Polymath 5.0:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \beta_3 x^3 + \beta_4 x^4 + \varepsilon \quad (6)$$

Where y is the response variable (BMP), ε is the random error, β_0 is the coefficient associated with ratio 1 of the quantitative predictor variable, β_1 is the coefficient associated with ratio 2, β_2 is the coefficient associated with ratio 3 and so on. Then, to validate this model, a variance analysis was performed.

In order to analyze hydrolysis as a limiting stage, a first-order kinetics model [31] and the modified Gompertz model were applied. In the first-order kinetics model, Eqs. (7) and (8) were applied in order to obtain the concentration ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) from the pressure and the hydrolysis constant, respectively.

$$M(t) = \frac{P(t)}{R \cdot T} \quad (7)$$

Where $M(t)$ is the methane concentration at time t ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$); $P(t)$ is the pressure registered by the OxiTop® instrument (atm) at time t ; R is the ideal gas constant ($\text{atm} \cdot \text{L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); and T is the experiment temperature (K).

$$\ln\left(\frac{M_u}{M}\right) = K_h t \quad (8)$$

Where $\ln$ is the natural logarithm; t is the time (d); M_u is the methane production at the end of the experiment ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$); M is the remaining gas production over time ($M = M_u - M(t)$); and K_h is the hydrolysis constant (d^{-1}).

The modified Gompertz model can identify significant parameters related to the hydrolysis stage of anaerobic digestion, such as the maximum production rate, maximum production and lag phase, which emphasizes the time when the substrate is transformed and its relation to the stage of the methane production. So as to apply this model, the volume data obtained for each mixing ratio assessed during the experiment were used. The model corresponds to a sigmoid function expressing methane production in the reactor as a function of time (Eq. 9)[32]:

$$V_{CH_4}(t) = P_{max} \cdot \exp\left[-\exp\left(\frac{R_{max} \cdot \exp(1)}{P_{max}} \cdot (\lambda - t) + 1\right)\right] \quad (9)$$

Where $V_{CH_4}(t)$ is the cumulative methane production ($\text{mL} \cdot \text{h}^{-1}$); P_{max} is the maximum cumulative production at the end of the experiment (mL); R_{max} is the maximum rate of methane production ($\text{mL} \cdot \text{h}^{-1}$), λ is the lag phase (hours); and t is the methane generation time (hours).The

determination coefficient (R^2) was used as criterion to assess the fitted models through the software Polymath 5.0 and Microsoft Excel 2007.

3. Results and discussion

Table 1 shows the results of the physicochemical analysis for the substrates (MBW and DWS) and inoculum.

Table 1.
Physicochemical characterization of MBW, DWS and inoculums.

Parameter	Units	MBW*** ⁿ	DWS*** ⁿ	Inoculum** ⁿ
pH	-	5.5±0.1	5.0±0.1	7.2±0.1
Humidity	%	77±3.1	95±5.8	94±6.4
TA	mg CaCO ₃ · L ⁻¹	4447±1249	2015±856	6270±357
TBA	mg CaCO ₃ · L ⁻¹	-	-	3390±442
VFAs	mg · L ⁻¹	10595±1086	2969±120	1657±105
Acetic acid	mg · L ⁻¹	<1.0	<1.0	<1.0
Propionic acid	mg · L ⁻¹	<1.0	<1.0	<1.0
Butyric acid	mg · L ⁻¹	<1.0	<1.0	<1.0
Palmitic acid	mg · L ⁻¹	1391±50	3202±180	N.D
Oleic cid	mg · L ⁻¹	1118±100	2181±200	N.D
TOC*	%	38±2.3	30±5.2	10±1.1
Oxidizable carbon	%	5.7±1.7	3±0.5	1.56±0.4
UV ₂₅₄	cm ⁻¹	>3.30	>3.30	>3.30
COD _{total}	mg · L ⁻¹	137839±7226 7	87321±562 2	54853±4562
COD _{filtered}	mg · L ⁻¹	35604±3600	70060±120 1	4049±123
BOD	mg · L ⁻¹	45333±1800	2717.±223	1274±103
Total nitrogen*	%	1.70±1.0	0.9±0.5	0.5±0.3
Ammoniacal nitrogen	mg · L ⁻¹	324±55	122±13	393±5
Ammoniacal nitrogen ion ammonium - NH ₄ ⁺	mg · L ⁻¹	324±48	122±46	N.D
Non-ionized ammoniacal nitrogen - NH ₃	mg · L ⁻¹	0.13±0.05	0.02±0.01	N.D
Cellulose	%	1.5±3.6	0.05±0.01	0.01±0.00
Starch	%	<0.10	<0.10	<0.10
Lignin	%	1.2±2.2	0.05±0.001	0.01±0.00
Ether extract	mg · kg ⁻¹	9600±4600	12000±200	5000±2100
Proteins	%	2.7±5	0.6±0.1	0.7±0.1
Carbohydrates	%	9.6±0.6	1.4±0.1	0.03±0.0
Raw fiber	%	2.7±0.4	1.6±0.02	0.02±0.00
Total solids	mg · L ⁻¹	113037±1524 1	59700.±856 3	74090±5120
Volatile solids	mg · L ⁻¹	930167±2852 8	33950±789 9	28259±6542
BF	-	0.80	0.83	N.D
SMA	gCOD · gV S ⁻¹ · d ⁻¹	N.D	N.D	0.008

*Dry material; **Average values; n; number of samples: 5; N.D .not determined.

Source: Presentation of authors

Generally, the values for pH, humidity, TA, TBA and VFAs of the MBW listed in Table 1 correspond to the normal values for acidified waste and are similar to those obtained by other authors, such as Pesta [33] and Zupančič et al. [34]. The low pH values are related to the high contents of humidity (because of the high amounts of raw food waste), which favors the production of VFAs and low alkalinity, indicating that an alkaline solution with enough buffer capacity should be used to neutralize the acidity during A-Co of MBW[35]. Additionally, a chromatography analysis of the VFAs shows that long-chain and branched-chain fatty acids are more abundant (palmitic acid and oleic acid), and this result could extend the time required for hydrolysis and microbial acclimatization[36].

All the organic matter indicators determined for the MBW show high values due to the physical composition of the MBW according to Oviedo et al. [3]. Additionally, the ratio of $COD_{filtered}$ to COD_{total} (0.26) showed high quantities of particulate material that can affect the stage of hydrolysis of the organic matter.

pH determines the dominant form of nitrogen and it is an important factor in biological processes because of the probable inhibition of microbial activity[33]. In MBW, the dominant compounds of nitrogen corresponded to ammoniacal nitrogen in two forms: NH_4^+ ($324.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) and NH_3 ($0.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), which is the most toxic form. Based on the buffer capacity, Parawira et al. [37] and other authors recommend nitrogen concentrations of $1100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ so as to maintain an adequate A-Co of this type of waste.

The MBW presented a C/N ratio ranged from 20 to 30, which has positive effects on the A-Co and may be related to the high contents of protein [38]. The values of the VS/TS ratio (0.82) and BF ratio (0.80) also indicated high contents of organic matter and low contents of material of vegetable origin that is difficult to degrade, such as lignin [39]. These results are similar to those obtained by Chen et al. [40].

Generally, cellulose and lignin contents of MBW goes from 40 to 60% and from 10 to 15%, respectively[41]. However, the values obtained in this study were lower because of the source separation of waste, thus reducing the paper, diaper and pruning waste. The starch content was also low, which was possibly caused by the storage time in housings (between 3 and 4 days), which favors fermentation and sucrose formation. Other compounds, such as ether extract (lipids), proteins, raw fiber and carbohydrates, were present in quantities similar to those reported by Chen, et al. [40] for this type of waste.

The DWS presented normal values of pH, humidity, TA, TBA and VFAs[42]. Compared to the MBW, the DWS presented different characteristics in terms of VFA composition (dominance of long-chain VFAs[43]) and high contents of organic matter. However, other variables, such as humidity, $COD_{filtered}$, COD_{total} , and VS/TS and C/N ratios, were different due to the substrate composition (e.g., low protein content, higher amount of water, etc.). The higher contents of ether extract can affect the hydrolysis process and methane production, which was reported by Cirne, et al. [43] for waste with high lipid contents.

The DWS:MBW mixing ratios may facilitate the A-Co due to the synergy among nutrients, which favors the

enzymatic processes that occur during the hydrolytic stage and transformations in the subsequent stages [7].

The inoculum presented values typical of anaerobic sludge from municipal WWTP, which uses chemically assisted primary treatment with values of pH, AT, and BA that are indicative of a good buffer capacity that favors A-Co[33]. The value of the VS/TS ratio is low from the point of view of the activity of the biomass present in the sludge, although it is typical of anaerobic reactors at municipal WWTP, which uses chemically assisted primary treatment. Nevertheless, it is important to understand that the VS/TS ratio alone is not a good indicator of the inoculum quality, due to the microbial diversity present in the sludge[44].

3.1. Influence of the DWS: MBW ratios on methane production

Fig.1 illustrates the BMP during A-Co of the DWS and MBW, which lasted 20 days (480 hours). The CH_4 produced for the different mixing ratios ranged from 61.28 to $105.6 \text{ mL} \cdot \text{CH}_4 \cdot \text{gVS}^{-1}$. The CH_4 produced at 5 days (120 hours) for the 00:100 and 20:80 mixing ratios accounted for more than 70% of the total; in contrast, the mixing ratios 40:60, 60:40, 80:20 and 100:00 only represented 48, 15, 15 and 12% respectively of the methane production. This behavior can be attributed to the high content of long chain fatty acids and lipids in DWS (palmitic and oleic acid), which according to Hidalgo et al. [24] and Esposito et al. [45], destabilizes the metabolic process performed by methanogenic microbial consortium and reduces methane production.

The results of the ANOVA ($p < 0.05$) showed significant differences between the BMP for the mixing ratios assessed. This variable has an important influence on the activity of the microorganisms involved along the different stages, especially during methane production. The effect of mixing ratios can also be observed in the lag phase, which were 2.6 and 3 days, respectively for 00:100 and 20:80 ratios, whereas for the remaining mixing ratios, the duration ranged from 4 to 7 days.

Moreover, Tukey's test ($p > 0.05$) evidenced no significant differences between the 00:100 and 80:20 or between the 40:60, 60:40, 80:20 and 100:00 mixing ratios. However, significant

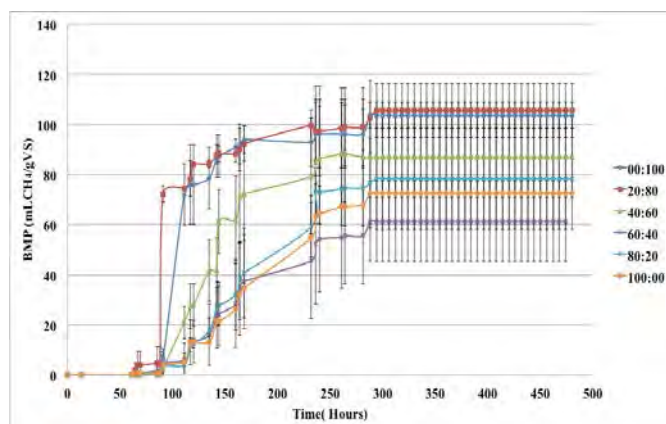


Figure 1. BMP for the different mixing ratios assessed.

Source: Presentation of the authors

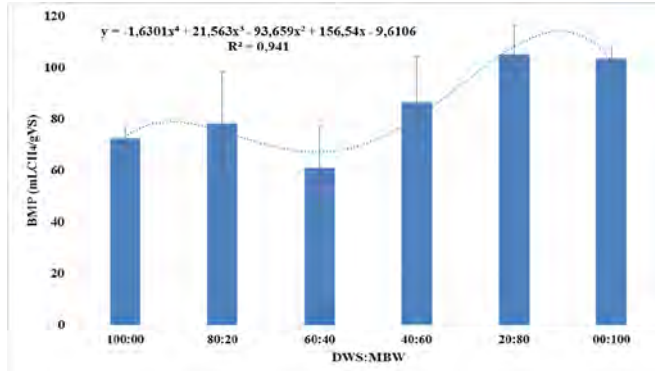


Figure 2. Prediction model for effect synergistic or antagonistic for different DWS:MBW mixing ratios.

Source: Presentation of authors

Table 2.

Synergistic or Antagonistic effect evaluation of A-Co DWS: MBW mixing ratios.

DWS: MBW mixing ratios	C/N	BMP (mL·gVS ⁻¹)	Weighted BMP	Differential (BMP-Weighted BMP)	Increasing or Decreasing rate of methane yield (%)	S/A
100:00	33.5	72.6	-	-	-	-
80:20	25.8	78.3	78.8	-0.5	0.7(decreasing)	A
60:40	23.9	61.3	85.0	-23.7	38.7(decreasing)	A
40:60	23.1	86.9	91.2	-4.2	4.9 (decreasing)	A
20:80	22.6	105.6	97.4	8.2	7.8(increasing)	S
00:100	22.3	103.6	-	-	-	-

A: Antagonistic effect; S: Synergistic effect.

Source: Presentation of the authors

differences were observed for the remaining cases, which indicates that MBW concentrations over 80% produce similar positive impacts on methane production during A-Co of DWS, thereby favoring digestion of the DWS, which has a high content of long-chain VFA's and are characterized by reduced methane production[46].

Regarding synergistic or antagonistic effect showed in Fig. 2 ($R^2=0.94$) it was observed strong synergistic effects in the process for different DWS:MBW mixing ratios. The BMP is affected when higher quantities of DWS are used, and the lowest methane production is obtained for mixing ratio 60:40 (Table 2). These results are similar to those obtained by Esposito et al. [45], who stated that higher MBW contents in the A-Co process produce a greater amount of methane, which is attributed to the high biodegradability of the substrate.

Table 2 shows the BMP and C/N ratios when different DWS and MBW mixing ratios are used. The range of optimal values for A-Co is indicated and corresponds to ratios between 20 and 30.

According to Table 2, the C/N ratios in each experimental unit ranged from 22.6 to 25.8, indicating that the contribution of C and N by the different substrates was within the required range for co-digestion processes. Therefore, these substrate ratios presented improved pH, alkalinity, VFA and the necessary nutrients conditions to allow growth of the microbes that perform the biological processes[38].

However, the DWS:MBW proportion 100:00 presented C/N ratios that were outside the range of AD, which indicates lower or higher contents of carbon than required. Therefore, it is evidenced the synergistic effect which is generated by incorporating MBW in A-Co of DWS, thus improving methane production and also ensuring a balance of nutrients necessary for the process.

3.2. Influence of the different proportions on hydrolysis during the A-Co of DWS and MBW

Table 3 presents the results for the hydrolysis constants and lag phase for the different DWS:MBW mixing ratios.

With regard to the first-order kinetics model, the hydrolysis constants were within the range of values corresponding to the digestion of substrates containing high amounts of carbohydrates, which are found in sludges from municipal WWTP [15]. However, the hydrolysis constant values were dependent of DWS:MBW mixing ratio. Therefore, the highest values of the hydrolysis constant were obtained for the 00:100 and 20:80 mixing ratio.

The K_h value was 0.37, which represents a higher conversion rate of substrate into methane, whereas the other proportions presented K_h values ranging between 0.25 and 0.28 d^{-1} . The decreasing trend in K_h values can be explained by the increase in the fat concentration related to the higher amounts of DWS in each reactor. This result was suggested by Iacovidou et al. [47], who stated that the presence of lipids contributes to the formation of long-chain VFAs characterized by their toxicity to AD processes. Furthermore, Kim et al. [48] indicated that the addition of MBW to the A-Co process with DWS causes an increase in the values of K_h , which was found in the present study.

Concerning the adjustment to the nonlinear regression Gompertz model, an inversely proportional relationship was observed between the length of the lag phase and methane production (similar to what was observed in the case of K_h). The shortest lag phase was observed when substrate ratios of 00:100 and 20:80 were used, which produced corresponding values of 80 h (3.3 d) and 67 h (2.8 d). This result can be explained due to MBW contain organic matter with high quantities of carbohydrates that are easily assimilated by the microorganisms during this stage and promote rapid acclimatization to the substrate, which can be observed in the methane production.

Table 3.

Hydrolysis constants and lag phase.

DWS: MBW mixing Ratio	First-order Kinetics Model		Modified Gompertz Model			
	K_h (d^{-1})	R_1^2	λ^a	R_{max}^b	P_{max}^c	R_2^2
100:00	0.25±0.04	0.80	106±6	0.04±0.01	5.5±0.2	0.99
80:20	0.28±0.05	0.85	98±9	0.04±0.02	4.9±0.1	0.99
60:40	0.26±0.03	0.74	94±7	0.04±0.02	4.6±0.1	0.99
40:60	0.27±0.05	0.77	90±5	0.05±0.01	5.9±0.2	0.99
20:80	0.37±0.06	0.93	67±8	0.06±0.03	7.8±0.2	0.98
00:100	0.37±0.05	0.84	80±6	0.09±0.02	7.4±0.2	0.99

a (hours); b ($mL \cdot h^{-1}$); c (mL) R_1^2 : determination coefficient for first-order kinetics model; R_2^2 : determination coefficient Gompertz model.

Source: Presentation of authors

The values for the lag phase process obtained for 40:60, 60:40, 80:20 and 100:00 mixing ratios were over 90 h. These results show that if the proportion of DWS is high, a longer residence time in the reactor is required in order to ensure that hydrolysis occurs; in addition, larger reactor volumes and higher costs during implementation and operation are also required.

The results of $R_{\max}$ and $P_{\max}$ obtained for the ratios with 80% MBW were $0.064 \text{ mL} \cdot \text{h}^{-1}$ and 7.8 mL , respectively. These values are expected for the different stages of methane production, which can be observed in the BMP results. In the reactors where the amount of MBW accounted for less than 80%, the results obtained for $R_{\max}$ and $P_{\max}$ ranged from 0.04 to $0.050 \text{ mL} \cdot \text{h}^{-1}$ and 4.6 to 5.9 mL , respectively, which is related to the low methane production.

4. Conclusions

The A-Co of DWS and MBW is based on a synergic effect related to the supplied nutrients, especially C and N. For the mixing ratios with 20% of MBW the ratios C/N were between 22.6 and 25.8, which makes this process suitable for its use with this type of waste produced by the communities of the country.

The DWS:MBW mixing ratio affects the A-Co. When the amount of MBW accounted for more than 80% of the mixture, the co-digestion performance was optimal. In contrast, the use of lower quantities of MBW destabilizes the process, most likely due to limitations in the hydrolysis of the organic matter and inhibition processes related to VFA accumulation (especially long-chain), which may be toxic for the microbial consortia involved in methane production. When the amount of DWS used accounts for more than 20% of the mixture, the co-digestion of DWS and MBW entails higher implementation costs (larger reactor volumes) and operational complexity.

Although the values of the hydrolysis constant of DWS and MBW (K_h) were within the usual range of values obtained in the literature, the K_h was affected by the substrate ratio. In the present study, the optimal conditions corresponded to 20:80 mixing ratio; under these circumstances, the length of the lag phase was shorter (less than 3.3 days), and faster substrate degradation as well as higher methane production were also obtained.

Acknowledgment

The authors thank to Universidad del Valle for the technical and financial support required for the development of this study, which was provided by the project entitled: "Utilization of Organic Fraction of Municipal Solid Waste for Methane Production as a Source of Renewable Energy-CI2856".

References

[1] Jingura, R. and Matengaifa, R., Optimization of biogas production by anaerobic digestion for sustainable energy development in Zimbabwe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(5), pp. 1116-1120, 2009. DOI:10.1016/j.rser.2007.06.015

[2] Wang, H. and Wang, C., Municipal solid waste management in Beijing: characteristics and challenges. *Waste Management & Research*, 31(1), pp. 67-72, 2013. DOI: 10.1177/0734242X12468199

[3] Oviedo-Ocaña, R., Marmolejo-Rebellón, L. and Torres-Lozada, P. Evaluation of the addition of wood ashes to control the pH of substrates in municipal biowaste composting. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 15(3), pp. 469-478, 2014. DOI:10.1016/S1405-7743(14)70355-5

[4] Martín-González, L., Colturato, L., Font, X. and Vicent, T. Anaerobic co-digestion of the organic fraction of municipal solid waste with FOG waste from a sewage treatment plant: Recovering a wasted methane potential and enhancing the biogas yield. *Waste Management*, 30(10), pp. 1854-1859, 2010. DOI:10.1016/j.wasman.2010.03.029

[5] Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Romero-Güiza, M., Fonoll, X., Peces, M. and Astals, S., A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, pp. 412-427, 2014. DOI:10.1016/j.rser.2014.04.039

[6] Balussou, D., Kleyböcker, A., McKenna, R., Möst, D. and Fichtner, W., An economic analysis of three operational co-digestion biogas plants in Germany. *Waste and Biomass Valorization*, 3(1), pp. 23-41, 2012. DOI 10.1007/s12649-011-9094-2

[7] Hartmann, H. and Ahring, B., Anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: Influence of co-digestion with manure. *Water Research*, 39(8), pp. 1543-1552, 2005. DOI:10.1016/j.watres.2005.02.001

[8] Lesteur, M., Bellon-Maurel, V., Gonzalez, C., Latrille, E., Roger, J., Junqua, G. and Steyer, J., Alternative methods for determining anaerobic biodegradability: a review. *Process Biochemistry*, 45(4), pp. 431-440, 2010. DOI:10.1016/j.procbio.2009.11.018

[9] Ponsá, S., Gea, T. and Sánchez, A., Anaerobic co-digestion of the organic fraction of municipal solid waste with several pure organic co-substrates. *Biosystems Engineering*, 108(4), pp. 352-360, 2011. DOI:10.1016/j.biosystemseng.2011.01.007

[10] Callaghan, F., Wase, D., Thayany, K. and Forster, C., Continuous co-digestion of cattle slurry with fruit and vegetable wastes and chicken manure. *Biomass Bioenergy*, 22(1), pp. 71-77, 2002. DOI:10.1016/S0961-9534(01)00057-5

[11] Tandukar, M. and Pavlostathis, S., Co-digestion of municipal sludge and external organic wastes for enhanced biogas production under realistic plant constraints. *Water Research*, 87, pp. 432-445, 2015. DOI:10.1016/j.watres.2015.04.031

[12] Zhang, P., Estudio y propuesta de mejora del proceso de depuración de la EDAR de Zhongyuan (China). Tesis de Grado en Ciencias Ambientales, Escuela Politécnica Superior de Gandia, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, 2013.

[13] Xu, G., Yan, Z., Wang, Y. and Wang, N., Recycle of Alum recovered from water treatment sludge in chemically enhanced primary treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 161(2-3), pp. 663-669, 2009. DOI:10.1016/j.jhazmat.2008.04.008

[14] Poon, C. and Chu, C., The use of ferric chloride and anionic polymer in the chemically assisted primary sedimentation process. *Chemosphere*, 39(10), pp. 1573-1582, 1999. DOI:10.1016/S0045-6535(99)00055-7

[15] Trzcinski, A. and Stuckey, D., Determination of the hydrolysis constant in the biochemical methane potential test of municipal solid waste. *Environmental Engineering Science*, 29(9), pp. 848-854, 2012. DOI:10.1089/ees.2011.0105

[16] Kafle, G., Kim, S. and Sung, K., Ensiling of fish industry waste for biogas production: A lab scale evaluation of biochemical methane potential (BMP) and kinetics. *Bioresour. Technology*, 127, pp. 326-336, 2013. DOI:10.1016/j.biortech.2012.09.032

[17] Sakurai, K., Método sencillo del análisis de residuos sólidos, Lima-Peru, CEPIS/OPS, Peru, 2000.

[18] Mukherjee, S., Kumar, S. and Devotta, S., Influence of Nitrogen of Anaerobic Digestion of Municipal Solid Waste in a Laboratory Scale. *Journal of the IPHE [Online]*, 9(4), 2008. [date of reference March 25th of 2016]. Available at: <http://indiaenvironmentportal.org.in/files/Influence%20of%20nitrogen.pdf>

- [19] Sharma, K., Mishra, I., Sharma, M. and Saini, J., Effect of Particle Size on Biogas Generation from Biomass Residues. *Biomass*, 17(4), pp. 251-263, 1988. DOI:10.1016/0144-4565(88)90107-2
- [20] ICONTEC., Norma Técnica Colombiana 5167. Productos para la Industria Agrícola, Productos Orgánicos Usados como Abonos o Fertilizantes y Enmiendas de Suelo, Colombia, 2004, 32 P.
- [21] APHA. Standard methods for examination of water and wastewater, Washington D.C., A.W.W.A.a.W.E. Federation, Estados Unidos, 2005.
- [22] Espinosa, M., López, M., Pellón, A., Mayarí, R. y Fernández, A., La fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos como fuente potencial de producción de biogás. *Revista CENIC Ciencias Biológicas* [Online]. 38(1), 2007. [date of reference March 25th of 2016]. Available at: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181221557003>
- [23] Sterling, M., Lacey, R., Engler, C. and Ricke, S., Effects of Ammonia Nitrogen on H₂ and CH₄ production during anaerobic digestion of dairy cattle manure. *Bioresource Technology*, 77(1), pp. 9-18, 2001. DOI:10.1016/S0960-8524(00)00138-3
- [24] Hidalgo, D. and Martín-Marroquín, J., Effects of inoculum source and co-digestion strategies on anaerobic digestion of residues generated in the treatment of waste vegetable oils. *Journal of Environmental Management*, 142, pp. 17-22, 2014. DOI:10.1016/j.jenvman.2014.04.004
- [25] Aquino, S., Chernicharo, C., Foresti, E. Florencio, M. e Monteggia, L., Metodologias para determinação da atividade metanogênica específica (Ame) em lodos anaeróbios. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 12(2), pp. 192-201, 2007. DOI: 10.1590/S1413-41522007000200010
- [26] Owen, W., Stuckey, D., Healy, J., Young, L. and McCarty, P., Bioassay for Monitoring Biochemical Methane Potential and Anaerobic Toxicity. *Water Research*, 13(6), pp. 485-492, 1979. DOI:10.1016/0043-1354(79)90043-5
- [27] Giménez, J., Martí, N., Ferrer, J. and Seco, A., Methane recovery efficiency in a submerged anaerobic membrane bioreactor (SANMBR) treating sulphate-rich urban wastewater: Evaluation of methane losses with the effluent. *Bioresource Technology*, 118, pp. 67-72, 2012. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.05.019
- [28] Raposo, F., Banks, C., Siebert, I., Heaven, S. and Borja, R., Influence of inoculum to substrate ratio on the biochemical methane potential of maize in batch tests. *Process Biochemistry*, 41(6), pp. 1444-1450, 2006. DOI:10.1016/j.procbio.2006.01.012
- [29] Chen, X., Yan, W., Sheng, K. and Sanati, M., Comparison of high-solids to liquid anaerobic co-digestion of food waste and green waste. *Bioresource Technology*, 154, pp. 215-221, 2014. DOI:10.1016/j.biortech.2013.12.054
- [30] Chiumenti, A., Modern composting technologies. USA: Emmaus, PA: JG Press., 2005.
- [31] Liew, L., Shi, J. and Li, Y., Methane production from solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass, *Biomass and Bioenergy*, 46, pp. 125-132, 2012. DOI:10.1016/j.biombioe.2012.09.014
- [32] Lay, J., Li, Y., Noike, T., Endo, J. and Ishimoto, S., Analysis of environmental factors affecting methane production from high-solids organic. *Water Science and Technology*, 36(6-7), pp. 493-500, 1997. DOI:10.1016/S0273-1223(97)00560-X
- [33] Pesta, G., Anaerobic digestion of organic residues and waste, USA: Springer New York, 2007.
- [34] Zupančič, G. and Roš, M., Determination of chemical oxygen demand in substrates from anaerobic treatment of solid organic waste. *Waste and Biomass Valorization*, 3(1), pp. 89-98, 2012. DOI: 10.1007/s12649-011-9087-1
- [35] Abdulkarim, B.I. and Abdullahi, M.E., Effect of buffer (NaHCO₃) and waste type in high solid thermophilic anaerobic digestion, *International Journal of ChemTech Research*, 2, pp. 980-984, 2010
- [36] Sundberg, C., Franke-Whittle, I., Kauppi, S., Yu, D., Romantschuk, M., Insam, H. and Jönsson, H., Characterisation of source-separated household waste intended for composting. *Bioresource Technology*, 102(3), pp. 2859-2867, 2011. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.10.075
- [37] Parawira, W., Murto, M., Zvauya, R. and Mattiasson, B., Anaerobic batch digestion of solid potato waste alone and in combination with sugar beet leaves. *Renewable Energy*, 29(11), pp. 1811-1823, 2004. DOI:10.1016/j.renene.2004.02.005
- [38] Mata-Alvarez, J., Macé, S. and Llabares, P., Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. *Bioresource Technology*, 74(1), pp. 3-16, 2000. DOI:10.1016/S0960-8524(00)00023-7
- [39] Takáčová, A., Macklufak, T., Smolinská, M., Hutňan, M. and Olejníková, P., Influence of selected biowaste materials pre-treatment on their anaerobic digestion. *Chemical Paper*, 66(2), pp. 129-137, 2012. DOI: 10.2478/s11696-011-0107-1
- [40] Chen, X., Romano, R. and Zhang, R., Anaerobic digestion of food wastes for biogas production. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 3(4), pp. 61-71, 2010. DOI: 10.3965/j.issn.1934-6344.2010.04.0-0
- [41] Juanga, J., Optimizing dry anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste, MSc. Thesis, School of Environment, Resources and Development, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, 2005.
- [42] Torres-Lozada, P., Díaz-Granados, J. and Parra-Orobio, B.A., Effects of the incorporation of drinking water sludge on the anaerobic digestion of domestic wastewater sludge for methane production. *Water Science and Technology*, 72(6), pp. 1016-1021, 2015. DOI: 10.2166/wst.2015.291
- [43] Cirne, D., Paloumet, X., Björnsson, L., Alves, M. and Mattiasson, B., Anaerobic Digestion of Lipid-Rich Waste—Effects of Lipid Concentration. *Renewable Energy*, 32(6), pp. 965-975, 2007. DOI: 10.1016/j.renene.2006.04.003
- [44] Demirel, B. and Scherer, P., The Roles of acetotrophic and hydrogenotrophic methanogens during anaerobic conversion of biomass to methane: A review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 7(2), pp. 173-190, 2008. DOI: 10.1007/s11157-008-9131-1
- [45] Esposito, G., Frunzo, L., Giordano, A., Liotta, F., Panico, A. and Pirozzi, F., Anaerobic co-digestion of organic wastes. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 11(4), pp. 325-341, 2012. DOI: 10.1007/s11157-012-9277-8
- [46] Davidsson, Å., Lövestedt, C., la Cour Jansen, J., Gruvberger, C. and Aspegren, H., Co-digestion of grease trap sludge and sewage sludge. *Waste Management*, 28(6), pp. 986-992, 2008. DOI: 10.1016/j.wasman.2007.03.024
- [47] Iacovidou, E., Ohandja, D. and Voulvoulis, N., Food waste co-digestion with sewage sludge - Realising its potential in the UK. *Journal of Environmental Management*, 112, pp. 267-274, 2012. DOI: 10.1016/j.jenvman.2012.07.029
- [48] Kim, H., Han, S. and Shin, H., Anaerobic co-digestion of sewage sludge and food waste using temperature-phased anaerobic digestion process. *Water Science and Technology* [Online]. 50(9), 2004. [date of reference March 25th of 2016]. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15581001>

B.A. Parra-Orobio, gained his BSc. in Sanitary Engineering in 2012 and his MSc. degree in Sanitary and Environmental Engineering in 2014, both from the Universidad del Valle (Colombia). Currently a doctoral student in Sanitary and Environmental Engineering in the same university. ORCID: 0000-0001-9256-6797

P. Torres-Lozada, gained her BSc. in Sanitary Engineering in 1988 in the Universidad del Valle (Colombia), his MSc. degree in Hydraulic and Sanitation Engineering in 1993 and his PhD. degree in Hydraulic and Sanitation Engineering in 2001, both from the Universidad de São Paulo (Brazil). ORCID: 0000-0001-9323-6677

L.F. Marmolejo-Rebellón, gained his BSc. in Sanitary Engineering in 1989, his MBA in Health Administration in 1995 and his PhD. Degree in Sanitary and Environmental Engineering in 2011, all in the Universidad del Valle (Colombia). ORCID: 0000-0001-9993-2841.

Characterization of construction and demolition waste in order to obtain Ca and Si using a citric acid treatment

Erica Mejía ^{a,b,d}, Patricio Navarro ^c, Cristian Vargas ^c, Jorge I. Tobón ^d & Walter Osorio ^a

^a Soil Microbiology Group, Escuela de Ciencias, Instituto de Biotecnología, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, nwosorio@unal.edu.co

^b Industrial Design Department, Universidad de San Buenaventura, Medellín, Colombia. erika.mejia@usbmed.edu.co

^c Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Santiago de Chile (USACH), Santiago, Chile. patricio.navarro@usach.cl

^d Cement and Building Materials Group, Departamento de Materiales y Minerales, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. jitobon@unal.edu.co

Received: March 22th, 2016. Received in revised form: August 22th, 2016. Accepted: September 12th, 2016.

Abstract

The paper analyses residual concrete (CW) degradation by organic acids and their potential use as nutrient source for degraded soils. The aims of the research were to carry out a chemical and mineralogical characterization of CW and to evaluate the dissolution of calcium and silicon from CW using citric acid in order to determine its potential use as a source of these elements for degraded soils. The chemical and mineralogical characterization made it possible to identify calcium and silicon as major elements associated with the concrete phases in the form of calcite, portlandite, hydrated calcium silicate, and hydrated calcium aluminosilicates. Calcium and silicon extraction was studied through a chemical and mineralogical analysis of CW (smaller than 4 mm), which was submerged in a citric acid solution for two days at 28 °C and 110 rpm under controlled and uncontrolled pH conditions. Based on the concentration of calcium and silicon in solution, it was possible to conclude that after acidulation, this waste can be used as a source of nutrients for soils degraded by human use.

Keywords: construction and demolition waste (CDW), dissolution and organic acid.

Caracterización de un residuo de construcción y demolición para la obtención de Ca y Si mediante tratamiento con ácido cítrico

Resumen

Los ácidos orgánicos y principalmente el ácido cítrico generan daños en estructuras de concreto, comprometiendo su correcto desempeño. Por otra parte, el concreto residual (CR) es un problema ambiental debido a los grandes volúmenes generados requiriendo para su correcta disposición amplias extensiones de terrenos. El objetivo de este estudio fue caracterizar química y mineralógicamente el CR y evaluar la disolución de calcio y silicio con ácido cítrico, con el fin de determinar su uso potencial como fuente de estos elementos para suelos degradados. La caracterización permitió identificar como elementos mayoritarios el calcio y el silicio asociados a las fases del concreto como la calcita, portlandita y aluminosilicatos de calcio hidratados. La extracción de calcio y silicio fue investigada mediante análisis químico y mineralógico sobre concreto residual sumergido en solución de ácido cítrico por dos días a 28 °C y 110 rpm controlando y no controlando el pH. Debido a la concentración de calcio y silicio en solución se pudo verificar que estos residuos luego de la acidulación podrían ser empleados como fuente de nutrientes para suelos degradados antrópicamente.

Palabras clave: residuos urbanos, disolución, ácidos orgánicos.

1. Introduction

The acceleration of urban growth and satisfying the demand that has resulted from the population explosion has led to the demolition of one-story buildings to make way for

vertical buildings, in order to optimize land use. This has generated greater demand for the primary materials used to manufacture concrete, particularly for aggregates, which are its primary component in terms of volume. The mining of these stony aggregates has environmental impacts and causes

How to cite: Mejía, E., Navarro, P., Vargas, C., Tobón, J. I., Osorio W. Characterization of construction and demolition waste in order to obtain Ca and Si using a citric acid treatment DYNA 83 (199) pp. 94-101, 2016

changes in ecosystems that can alter biological equilibrium [1]. Meanwhile, the solid waste generated in construction and demolition processes represents approximately 50% of the total waste produced in urban areas [1,2]. It is, thus, necessary to search for new ways to obtain aggregates, such as using construction and demolition waste (CDW). This could be one way to address the problem of mineral deposit depletion while also decreasing the space used for the final deposition of CDW [3–5].

Concretes manufactured with aggregates recycled from CDW have similar mechanical and durability properties to non-structural concretes manufactured with natural aggregate [3,6,7]. However, the use of fine aggregates (particles smaller than 4mm), which represent approximately 40% of the waste produced [4,8], has not shown good results [1,9]. Thus, it is necessary to establish a recycling process that produces value for CDW, which represents 16% of the total solid waste produced worldwide [1,10–12]. Proper management and recycling of this waste could prevent it from being deposited in uncontrolled landfills, parks, median strips, private lots, legal and illegal dumps, and other places [13].

Meanwhile, global research has been undertaken on the deterioration of buildings, structures, and monuments, since this affects their aesthetics and proper functioning [14–19]. When the materials used in these structures are exposed to substances like water, atmospheric gases, and microorganisms, they become unstable and undergo changes in their physical, chemical and mineralogical properties [14,19–21]. The main groups of microorganisms responsible for this deterioration are bacteria, fungi, and lichen [15,17,22–24]. These microorganisms exude organic acids that are capable of eroding rocks, leading to the eventual deterioration of buildings [25–27]. Additionally, during this biodeterioration process, the action of the organic acids produced by these microorganisms allows different types of plants to take root in urban structures in the absence of soil [19].

One organic acid that is commonly found in soils and deteriorated structures is citric acid. This acid plays an important role in the weathering and dissolution processes of primary and secondary minerals such as aluminosilicates in both soil and urban structures [17]. This increases the possibility that destabilized concrete waste could leave behind elements such as calcium and silicon. These elements are commonly found in soils and, thus, could be used as sources of nutrients in soils degraded by human use.

The objective of this study was to evaluate the dissolution of Ca and Si contained in concrete waste by attacking it with citric acid at different concentrations and pH levels. In doing so, the idea was to establish the dissolution process of these elements and determine their potential to be used as nutrient sources for degraded soils.

2. Experimental work

2.1. Waste samples

The samples used for this study were CW provided by the Cement Chemistry Laboratory at the Universidad Nacional de Colombia in Medellín. The samples were air-dried for one week and then a size reduction process was performed in

order to guarantee a fine particle size distribution between 0.038 and 0.30 mm and a coarse particle size between 0.3 and 2.36 mm. These sizes cannot be used as recycled aggregates.

2.2. Waste characterization

The waste used in the study was characterized by Scanning Electron Microscopy (SEM), X-ray Diffraction (XRD), and X-ray Fluorescence (XRF).

The SEM images and microchemical analysis were obtained with a JEOL JSM 5910 LV microscope equipped with an EDS OXFORD solid-state detector. The work was performed in back-scattered electron (BSE) observation mode, with a 20 kV acceleration voltage, and a 210 second data collection time. The samples were previously metallized with gold.

In order to determine the element content in the waste, the energy-dispersive XRF technique was used with 2D direct excitation. The spectrometer used was a PANalytical MiniPal 2, 9 w (30 KW, 1 mA) chrome irradiation tube, Si-PIN detector, 12-position sample changer, 100-240 V, 45-65 Hz.

The mineralogical composition of the waste was determined by XRD using a Panalytical Reference X'Pert PRO MPD with Cu radiation of wavelength $\lambda_1 = 1.5406 \text{ \AA}$. Power: 45 kV and 40 mA. Scanning: a step-size of 0.013° at a speed of 59 s per step with continuous scanning.

2.3. Experimental methods

In order to evaluate the dissolution of the Ca and Si contained in the concrete waste, exploratory tests were performed at three different pH levels to determine the best pH. Subsequently, tests were performed at a constant pH, with and without regulating this parameter, in order to identify its effects. All of the experiments were performed using the same procedure.

The elements of interest were obtained by treating the waste with an aqueous solution containing citric acid. The following concentrations of citric acid were used: 8.5 gL^{-1} (0.04 M), 9.5 gL^{-1} (0.05 M), and 10.5 gL^{-1} (0.055 M). A constant pH of 2.2 was maintained; this was previously determined by exploratory testing. The elements were sterilized in an autoclave at 120°C and 0.1 MPa for 20 minutes before use.

The working system was prepared by putting 5 g of waste into contact with each liter of solution until a 300 mL working volume was obtained. This was poured into a 500 mL reactor. The mixture was placed in an orbital agitation system, where it was agitated for 48 hours at 110 rpm with an average working temperature of 28°C . Samples of 10 mL were taken at certain time intervals. These were sent for chemical analysis to determine their Ca and Si content. During these intervals, the pH was also regulated for the tests in which it was necessary to do so. The recovery of these last elements was obtained by creating a balance in the aqueous solutions.

3. Results and discussion

3.1.1 Initial chemical and mineralogical characterization

XRF analysis was performed to identify the elements present in the waste. The primary elements found were silicon

Table 1.

Chemical composition of concrete waste according to XRF.

Element	%Fine	%Coarse
Si	19.16	20.69
Ca	22.15	17.93
Al	5.07	5.16
Fe	2.57	2.51
P	1.03	0.96
Ti	0.40	0.36
Mg	1.43	0.51
Na	< 0.010	< 0.010
K	0.99	0.98
Mn	0.14	0.14
Cr	0.06	0.06
S	0.93	0.93
Losses on ignition	6.92	9.95

Source The Authors

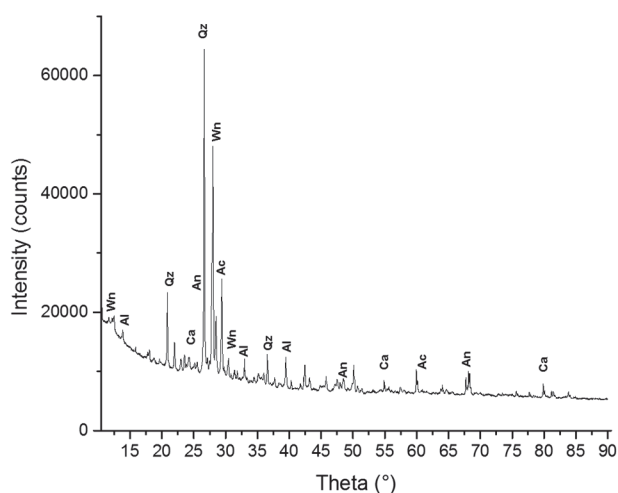


Figure 1. X-ray diffraction of fine concrete waste, where Qz is quartz, An is anatase, Wn is wollastonite, Ac is actinolite, Al is albite and Ca is calcite. Source: Mejia et al., 2015

and calcium, with aluminum and iron present to a lesser extent (Table 1). Additionally, traces of the following elements were found: titanium, magnesium, sodium, potassium, manganese, chromium, phosphorous, and sulfur.

XRD was used to confirm the mineral phases associated with the waste of both particle sizes. The mineral phases detected for the fine material were: quartz (SiO_2), calcite (CaCO_3), albite and actinolite ($\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$) (Fig. 2). The phases for the coarse material were: quartz, actinolite, albite, and calcite (Fig. 2). It is important to note that the mineralogical phases present in cement paste can be masked by the minerals previously mentioned, which may be the components of concrete aggregates.

SEM analysis and microchemical analysis confirmed the presence of minerals including feldspars and silicates. Fig. 3 shows sub-euhedral, rounded, and elongated particles. The percentage in weight of the elements measured by EDS was very similar to that of albite, calcite, quartz, and aluminosilicates.

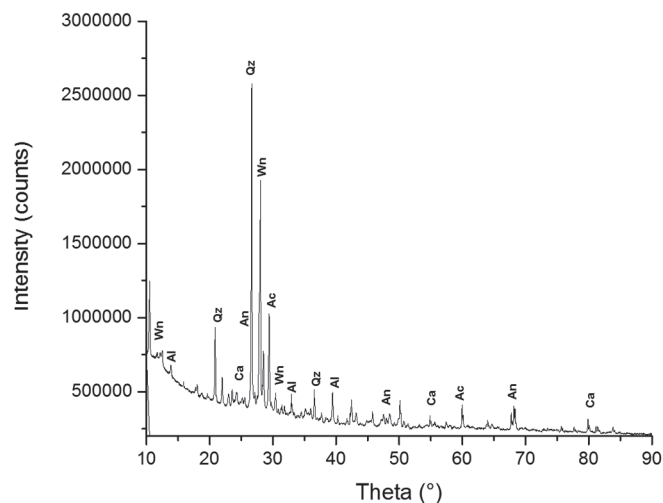


Figure 2. X-ray diffraction of coarse concrete waste, where Qz is quartz, An is anatase, Wn is wollastonite, Ac is actinolite, Al is albite and Ca is calcite. Source: Mejia et al., 2015.

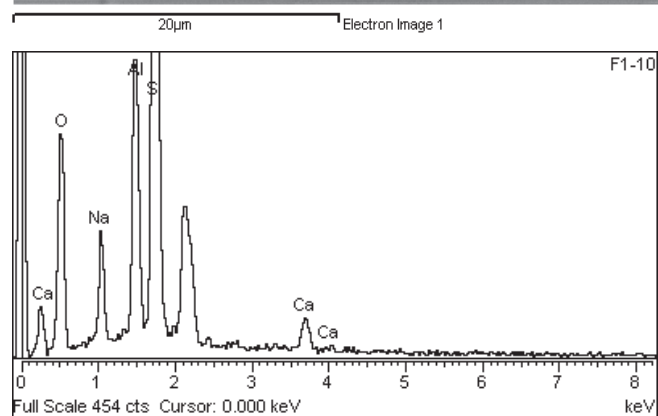
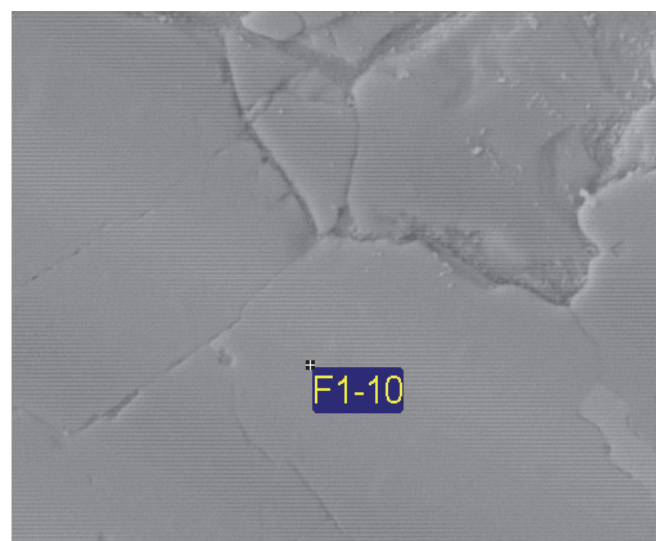


Figure 3. Upper image: SEM micrograph of a calcium-sodium plagioclase grain. Lower image: microchemical analysis spectrum showing Ca: calcium, O: oxygen, Al: aluminum, Si: silicon, Na: sodium. Source The Authors

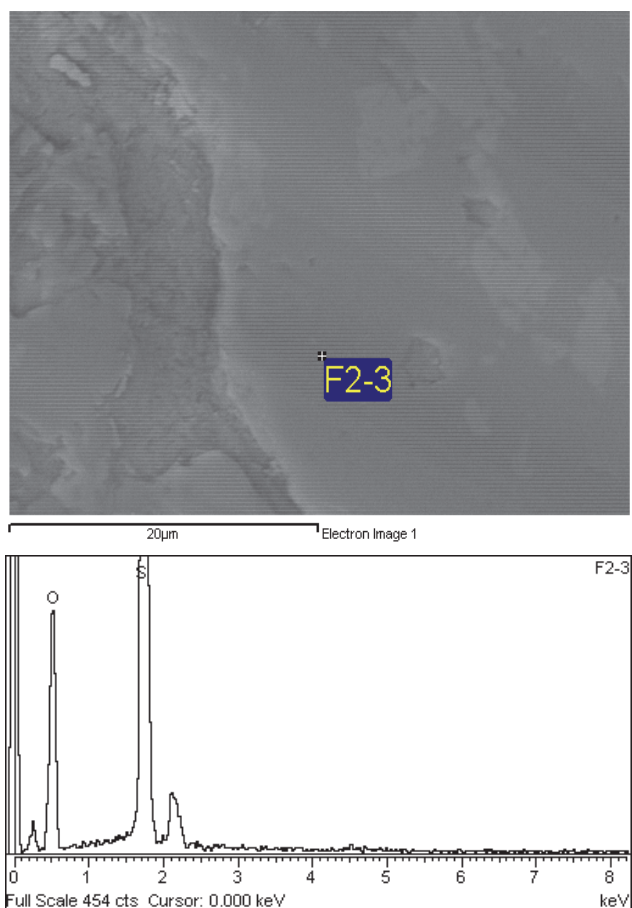


Figure 4. Upper image: SEM micrograph of sample 2, which corresponds to a grain of quartz. Lower image: microchemical analysis spectrum of the grain. O: oxygen, Si: silicon

Source The Authors

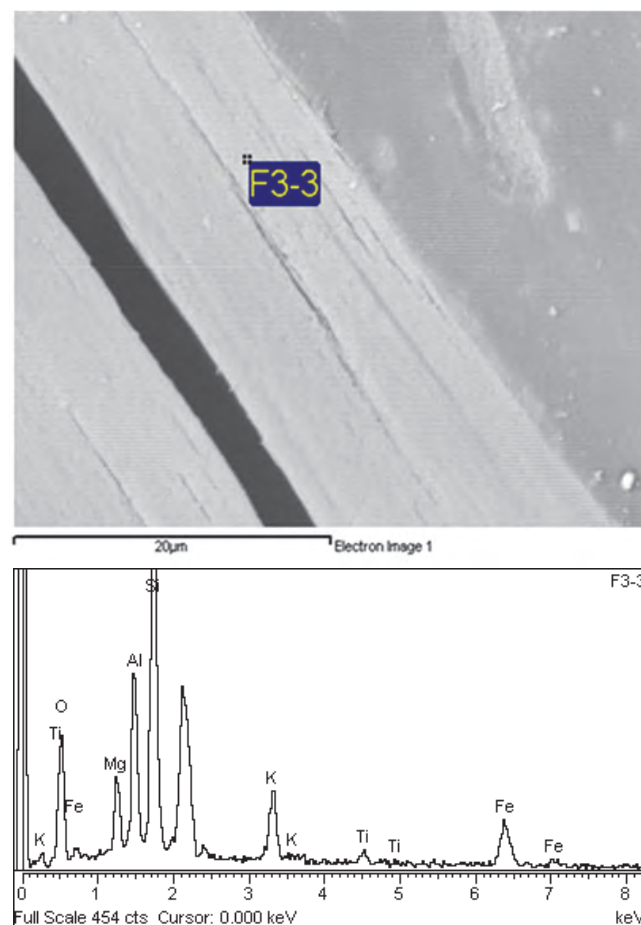


Figure 5. Upper image: SEM micrograph of silicate grains, sample 3. Lower image: microchemical analysis spectrum of the grain. K: potassium, O: oxygen, Al: aluminum, Si: silicon, Mg: magnesium, Ti: titanium, Fe: iron. Source The Authors

The quartz that was present was interspersed with different minerals including calcium, sodium and magnesium aluminosilicates (Fig. 4).

Fig. 5 shows a grain of magnesium, potassium, and iron silicate, which presents a fibrous tabular structure typical of this type of mineral. The grains are intergrown with aluminosilicate grains.

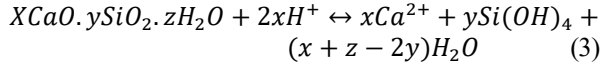
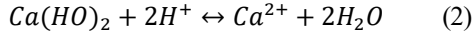
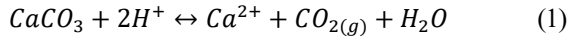
Through chemical and mineralogical characterization of the waste, we were able to determine the presence of elements that could potentially be used as nutrients in degraded soils after being subjected to a structural destabilization process. This is because they are found in minerals that have a very low or no solubility in water. Reusing these elements would generate a recycling of nutrients such as silicon and calcium, and, thus, they would contribute to plant growth [11,28]. According to XRD, XRF and SEM results, the CW samples presented a large percentage of quartz, which is a chemically inert mineral that is useful for improving the physical properties of soil, including texture, aeration, infiltration, and drainage [11]. Additionally, the presence of calcite, wollastonite, and anatase was also observed. These minerals can improve the chemical properties of soils such as their pH regulation. In this case, the finest material presented the highest calcium content [12].

3.2. Effect of pH on dissolution with citric acid

3.2.1. Exploratory tests

In order to evaluate the effect of acidity on Ca and Si dissolution at different citric acid concentrations, the dissolution of these elements was evaluated after 48 hours of processing. We found that the greatest Ca and Si dissolution occurred with 10.5 gL⁻¹ of citric acid and a pH of 2.2 (Table 2). This coincides with other authors' findings [24], who discovered that citric acid hydrolysis permits the dissociation and complexation of Ca²⁺. The dissolved Ca²⁺ probably came from carbonates and portlandite, which are the most soluble minerals. From a lesser extent it also came from hydrated calcium silicates, which are low solubility minerals. Ca²⁺ dissolution produces concrete decalcification and the formation of calcium salt (Equations 1 and 2) [18,24,29]. Meanwhile, [30–34] found that when concrete was subjected to attacks by different organic acids, the effect was accelerated at a lower pH. Moreover, the release of silicon indicated that calcium silicate dissolution took place in addition to portlandite and calcite dissolution; this occurred as shown in Equation 1-3 [29]. However, some authors have

found that after a partial dissolution process, a silica gel forms, which limits the release of silicon and calcium [29,32,33]. Using this test, we were able to determine that the working pH to improve Ca and Si release was 2.2; this condition was used thereafter.



3.2.2. With pH regulation

In order to evaluate the effect of the citric acid concentration, an experiment was conducted in which the acidity of the solution was regulated. The dissolution kinetic of Ca over time at different citric acid concentrations was similar for a short period of time (seven hours), during which the dissolution velocity was high. After 10 hours, the velocity tended towards zero; this effect was more marked for the lowest citric acid concentrations (Fig. 7). Additionally, the curve forms were typical of passivation processes. This could indicate the formation of a precipitate on the waste particles, thus generating a barrier between the citric acid and the waste particles. Ca^{2+} dissolution was greater at a higher acid concentration (10.5 gL^{-1}) (Fig. 6). In the case of silicon, dissolution was lower than 10% and release occurred rapidly during the initial hours of the process (Fig. 7). Calcium release could have been inhibited by the formation of calcium citrate ($\text{Ca}_3(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$); however, this compound is moderately soluble in water (0.096 g for each 100 mL at 23°C), and the concentration of $\text{Ca}_3(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ that formed was lower than 0.05 g per 100 mL. Thus, it appears that the process was not inhibited by the formation of calcium citrate. Meanwhile, as previously noted, some authors have found that the formation of a silica gel can limit concrete dissolution, impeding calcium and silicon release. The formation of this gel is, thus, thought to have limited the process [30].

3.2.2. Without pH regulation

In order to determine the effect of pH on calcium and silicon dissolution at different citric acid concentrations, this parameter was left to evolve over the course of the process. The dissolution behavior of calcium and silicon was very similar to that generated when pH was controlled, except that the dissolution percentages were lower (Figs. 8 and 9). Meanwhile, proton consumption was observed that was caused by the increase in pH during the process, which rose from 2.2 to 3.7 in all cases (Table 3). This could be due to the dissolution reactions of the calcium carbonate and the calcium aluminosilicates.

3.3. Final chemical and mineralogical characterization

By conducting SEM analysis and microchemical analysis after completing the process with citric acid, we were able to

identify alterations in the concrete waste particles (Fig. 10). We observed calcium silicate hydrate grains with evidence of flaking caused by dissolution. Moreover, microchemical analysis of the sample of concrete waste with citric acid (10.5 gL^{-1} , pH controlled at 2.2) showed that the calcium concentration was lower after dissolution process (Table 1). This indicates the decalcification of calcium silicate hydrate. These results coincide with other authors findings who have explained the calcium silicate hydrate leaching was a result of the decalcification process, and silica gel precipitates over the grain [17, 19, 24, 29, 32]

Table 2.

Calcium and silicon dissolution percentages at different pH levels and citric acid concentrations.

pH	Ca (%)			Si (%)		
	8.5 gL ⁻¹	9.5 gL ⁻¹	10.5 gL ⁻¹	8.5 gL ⁻¹	9.5 gL ⁻¹	10.5 gL ⁻¹
2.2	45.52	34.52	42.87	0.31	0.83	1.3
3.2	32.42	30.74	40.29	0.23	0.82	0.87
4.2	31.9	29.9	33.54	0.21	0.61	0.83

Source The Authors

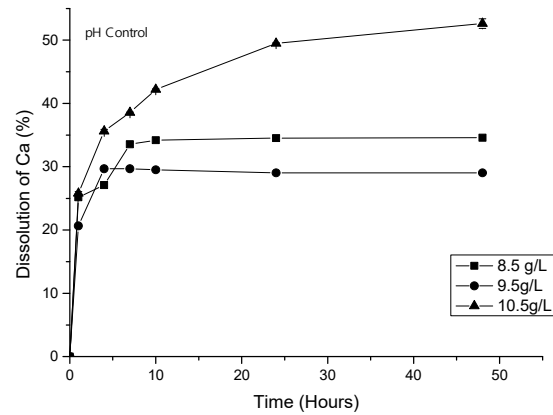


Figure 6. Dissolution of calcium from CW with controlled pH.
Source The Authors

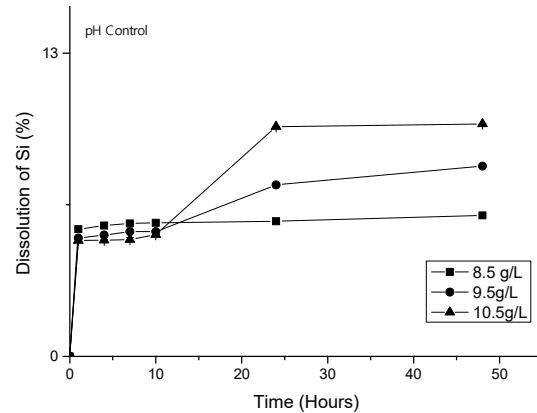


Figure 7. Dissolution of silicon from CW with controlled pH.
Source The Authors

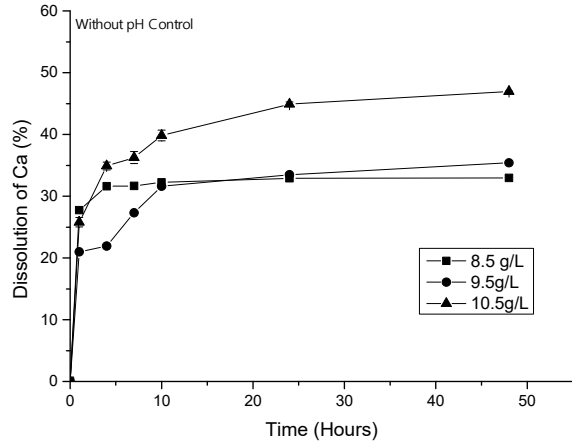


Figure 8. Dissolution of calcium from CW with uncontrolled pH.
Source The Authors

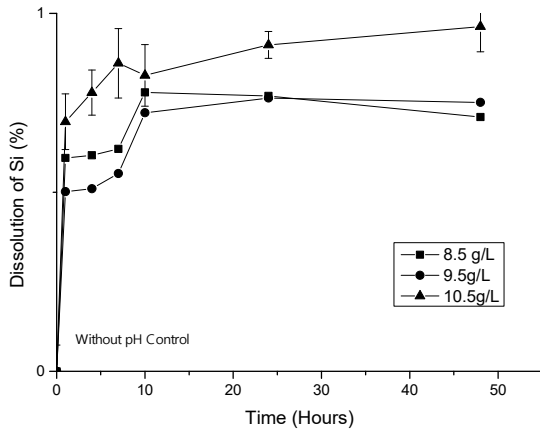


Figure 9. Dissolution of silicon from CW with uncontrolled pH.
Source The Authors

Table 3.
Initial and final pH in the concrete waste dissolution process using citric acid.

Initial citric acid concentration (g/L)	Initial pH	Final pH
8.5	2.2	3.77
9.5	2.2	3.72
10.5	2.2	3.65

Source The Authors

4. Conclusions

CW has the potential to be used as a source of Ca and Si, after undergoing an acidulation process with citric acid. It could be used to provide nutrients for plants in nutrient-deficient soils since; in addition to containing minerals such as calcite, portlandite, and CSH, it can also release Ca and Si in solution after undergoing a dissolution process with citric acid.

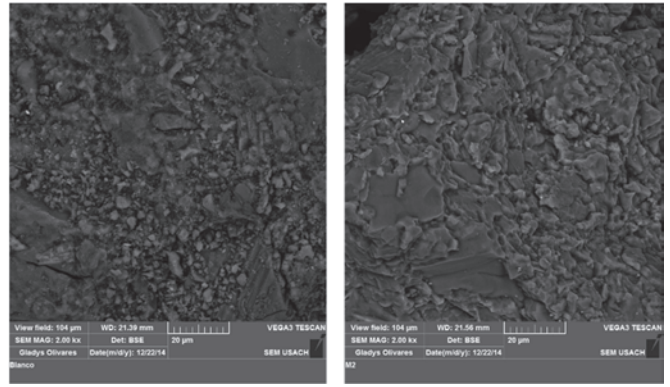


Figure 10. Scanning electron microscopy analysis of the concrete waste after (left) and following (right) the dissolution process with citric acid (10.5g/L-1, pH controlled at 2.2). The image to the right shows the flaking process of the concrete particles after the leaching process.

Source The Authors

Table 1. Scanning electron microscopy microchemical analysis of the sample of concrete waste after and before the dissolution process with citric acid (10.5g/L-1, pH controlled at 2.2).

Element	Weight (%)		atomic (%)	
	Control	Leaching sample	Control	Leaching sample
O	51,78	48,67	68,63	63,65
Ca	18,35	3,95	9,71	2,07
Si	16,58	30,08	12,52	22,42
Al	5,29	7,03	4,15	5,45
Fe	3,75	4,01	1,42	1,52
Mg	2,15	2,87	1,87	2,48
Na	1,39	2,22	1,29	2,03
K	0,62	0,57	0,34	0,31
S	0,09	0,6	0,07	0,07
Total	100	100	100	100

Source The Authors

The minerals identified are present as primary or secondary minerals in the clayey fraction of the soil; therefore, they would not drastically affect the chemical composition of the soil.

By performing dissolution tests with citric acid, we were able to observe calcium silicate hydrate dissolution; this was evidenced by the concentration of silicon in solution.

The best dissolution conditions for calcium and silicon occurred at 10.5 g/L of citric acid and had a pH of 2.2, with a controlled pH.

The SEM characterization allowed us to find an agglomeration of grains and corrosion evidence on the CSH grains.

Acknowledgments

The authors are grateful for the financial support provided by the Universidad de San Buenaventura, the Universidad de Santiago de Chile, and the Universidad Nacional de Colombia in Medellín, and also for the technical support that was essential to complete this study. Finally, the authors would like to thank the Colciencias National Doctorate Program, project 567.

References

- [1] F. Rodrigues, M. T. Carvalho, L. Evangelista, and J. De Brito, "Physical-chemical and mineralogical characterization of fine aggregates from construction and demolition waste recycling plants," *J. Clean. Prod.*, vol. 52, pp. 438–445, 2013. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.02.023
- [2] M. V. Madurwar, R. V. Ralegaonkar, and S. a. Mandavgane, "Application of agro-waste for sustainable construction materials: A review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 38, pp. 872–878, 2013. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.09.011
- [3] K. Rahal, "Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate," *Build. Environ.*, vol. 42, no. 1, pp. 407–415, 2007. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.07.033
- [4] S. C. Angulo, C. Ulsen, V. M. John, H. Kahn, and M. a. Cincotto, "Chemical-mineralogical characterization of C&D waste recycled aggregates from Sao Paulo, Brazil," *Waste Manag.*, vol. 29, no. 2, pp. 721–730, 2009. Doi:10.1016/j.wasman.2006.01.005.
- [5] M. C. Limbachiya, E. Marrochino, and a. Koulouris, "Chemical-mineralogical characterisation of coarse recycled concrete aggregate," *Waste Manag.*, vol. 27, no. 2, pp. 201–208, 2007. Doi: doi.org/10.1016/j.wasman.2006.01.005.
- [6] C. Ulsen, H. Kahn, S. C. Angulo, and V. M. John, "Applied Mineralogy Characterization of Construction and Demolition Waste from Brazilian Recycling Plants," *Chem. Anal.*, 2003.
- [7] K. McNeil and T. H.-K. Kang, "Recycled Concrete Aggregates: A Review," *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, vol. 7, no. 1, pp. 61–69, 2013. DOI: 10.1007/s40069-013-0032-5
- [8] C. Ulsen, H. Kahn, G. Hawlitschek, E. a. Masini, S. C. Angulo, and V. M. John, "Production of recycled sand from construction and demolition waste," *Constr. Build. Mater.*, vol. 40, pp. 1168–1173, 2012. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.004
- [9] M. Wahlström, J. Laine-Ylijoki, a. Määtänen, T. Luotojärvi, and L. Kivekäs, "Environmental quality assurance system for use of crushed mineral demolition wastes in earth constructions," *Stud. Environ. Sci.*, vol. 71, no. C, pp. 725–734, 1997. DOI: doi.org/10.1016/S0956-053X(99)00319-0
- [10] M. Weil, U. Jeske, and L. Schebek, "Closed-loop recycling of construction and demolition waste in Germany in view of stricter environmental threshold values," *Waste Manag. Res.*, vol. 24, no. 3, pp. 197–206, 2006. DOI: 10.1177/0734242X06063686
- [11] E. C. G. Dos Santos, "Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado. Dissertação," 2007. DOI: 10.11606/D.18.2007.tde-10042007-110106
- [12] P. Renato, O. Lasso, C. Manoel, P. Vaz, A. Carlos, and D. C. Bernardi, "CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO RECICLADOS (RCD-R) PARA UTILIZAÇÃO COMO CORRETIVO DA ACIDEZ CHARACTERIZATION OF RECYCLED CONSTRUCTION AND DEMOLITION RESIDUES (RCD-R) FOR USE AS SOIL ACIDITY CORRECTIVE," 2013.
- [13] F. Pacheco-Torgal and J. a. Labrincha, "The future of construction materials research and the seventh un Millennium Development Goal: A few insights," *Constr. Build. Mater.*, vol. 40, pp. 729–737, 2013. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.007
- [14] D. Mottershead, A. Gorbushina, G. Lucas, and J. Wright, "The influence of marine salts, aspect and microbes in the weathering of sandstone in two historic structures," *Build. Environ.*, vol. 38, no. 9–10, pp. 1193–1204, 2003. DOI: dx.doi.org/10.1016/S0360-1323(03)00071-4
- [15] S. a. Shinkafi, I. Haruna, S.A.Shinkafi, and I.Haruna, "Microorganisms associated with deteriorated desurface painted concrete buildings within Sokoto, Nigeria," *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.*, vol. 2, no. 10, pp. 314–324, 2013.
- [16] J. D. Gu, T. E. Ford, N. S. Berke, and R. Mitchell, "Biodeterioration of concrete by the fungus *Fusarium*," *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, vol. 41, no. 2, pp. 101–109, 1998. doi:10.1016/S0964-8305(98)00034-1
- [17] T. Verdier, M. Coutand, A. Bertron, and C. Roques, "A review of indoor microbial growth across building materials and sampling and analysis methods," *Build. Environ.*, vol. 80, pp. 136–149, 2014. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.05.030
- [18] L. G. Sequeda-Castañeda, A. E. Ortiz-Ardila, J. P. Correa-Cuadros, and C. López-Pérez, "Chemical and microbiological comparison of biodeterioration in colombian heritage constructions," *Univ. Sci.*, vol. 18, no. 1, pp. 51–63, 2013. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.02.023
- [19] B. Cwalina, "Biodeterioration of Concrete," *J. Archit. Civ. Eng. Environ.*, no. 4, pp. 133–140, 2008.
- [20] M. L. Coutinho, A. Z. Miller, and M. F. Macedo, "Biological colonization and biodeterioration of architectural ceramic materials: An overview," *J. Cult. Herit.*, 2015. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2015.01.006
- [21] A. Bertron, "Understanding interactions between cementitious materials and microorganisms: a key to sustainable and safe concrete structures in various contexts," *Mater. Struct.*, pp. 1787–1806, 2014. DOI: 10.1617/s11527-014-0433-1
- [22] Wei, S., M. Sanchez, D. Trejo, and C. Gillis, "Microbial mediated deterioration of reinforced concrete structures," *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, vol. 64, no. 8, pp. 748–754, 2010. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2010.09.001
- [23] D. Nica, J. L. Davis, L. Kirby, G. Zuo, and D. J. Roberts, "Isolation and characterization of microorganisms involved in the biodeterioration of concrete in sewers," *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, vol. 46, no. 1, pp. 61–68, 2000. DOI: dx.doi.org/10.1016/S0964-8305(00)00064-0
- [24] S. Larreur-Cayol, a. Bertron, and G. Escadeillas, "Degradation of cement-based materials by various organic acids in agro-industrial waste-waters," *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, no. 8, pp. 882–892, 2011. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.04.007
- [25] E. Hoffland, T. W. Kuyper, H. Wallander, C. Plassard, A. a. Gorbushina, K. Haselwandter, S. Holmström, R. Landeweert, U. S. Lundström, A. Rosling, R. Sen, M. M. Smits, P. A. van Hees, and N. van Breemen, "The role of fungi in weathering," *Front. Ecol. Environ.*, vol. 2, no. 5, pp. 258–264, 2004. DOI: 10.1890/1540-9295(2004)002[0258:TROFIW]2.0.CO;2
- [26] A. Rosling, T. Roose, A. M. Herrmann, F. a. Davidson, R. D. Finlay, and G. M. Gadd, "Approaches to modelling mineral weathering by fungi," *Fungal Biol. Rev.*, vol. 23, no. 4, pp. 138–144, 2009. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.fbr.2009.09.003
- [27] S. Wei, Z. Jiang, H. Liu, D. Zhou, and M. Sanchez-Silva, "Microbiologically induced deterioration of concrete - A review," *Brazilian J. Microbiol.*, vol. 44, no. 4, pp. 1001–1007, 2013. DOI: 10.1590/S1517-83822014005000006
- [28] D. de Santos Marián, B. Monercillo Delgado, A. García Martínez, and F. L. D. La Construcción, "Gestión de residuos en las obras de construcción y demolición," vol. 2^a, p. 193, 2011. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.02.023
- [29] M. P. Lavigne, A. Bertron, C. Botanch, L. Auer, G. Hernandez-Raquet, A. Cockx, J. N. Foussard, G. Escadeillas, and E. Paul, "Innovative approach to simulating the biodeterioration of industrial cementitious products in sewer environment. Part II: Validation on CAC and BFSC linings," *Cem. Concr. Res.*, vol. 79, no. March, pp. 409–418, 2016. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.10.002
- [30] A. Bertron, G. Escadeillas, and J. Duchesne, "Cement pastes alteration by liquid manure organic acids: Chemical and mineralogical characterization," *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 10, pp. 1823–1835, 2004. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.01.002
- [31] a. Bertron, J. Duchesne, and G. Escadeillas, "Degradation of cement pastes by organic acids," *Mater. Struct.*, vol. 40, no. 3, pp. 341–354, 2007. DOI: 10.1617/s11527-006-9110-3
- [32] a. Bertron, J. Duchesne, and G. Escadeillas, "Attack of cement pastes exposed to organic acids in manure," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 27, no. 9–10, pp. 898–909, 2005. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.06.003
- [33] L. De Windt and P. Devillers, "Modeling the degradation of Portland cement pastes by biogenic organic acids," *Cem. Concr. Res.*, vol. 40, no. 8, pp. 1165–1174, 2010. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.03.005
- [34] De Windt, L., & Devillers, P. (2010). Modeling the degradation of Portland cement pastes by biogenic organic acids. *Cement and*

Concrete Research, 40(8), 1165-1174. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.03.005

- [35] Mejía, E., Tobón, J. I., Osorio, L., & Osorio, W. (2015). Mineralogical characterization of urban construction and demolition waste: potential use as a nutrient source for degraded soils. WIT Transactions on Ecology and the Environment, 194, 399-413.

E. Mejía, is a BSc. in Materials Engineer from the Universidad de Antioquia, Colombia, (2007), with a MSc. in Materials and Processes from the Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia (2010). She is Biotechnology PhD student at the Universidad Nacional de Colombia, Medellín as well as a teacher on the architecture program and research coordinator in the faculty of integrated arts at the Universidad de San Buenaventura, Medellín, Colombia. Her research interests include: biomining, waste assessment, closed-cycle processes and processes that help mitigate environmental impacts.
ORCID: 0000-0002-2913-1181

P. Navarro, is a BSc. in Civil and Metallurgist Engineer from the Universidad de Santiago de Chile, Chile, and has a PhD in Engineering Sciences, with an honorary mention in Metallurgy at the Universidad de Concepcion, Chile. His research interests include: Hydrometallurgy, leaching, solvent extraction, Effluent Treatment.
ORCID: 0000-0003-2127-0029

C. Vargas, is a BSc. in Civil Engineer in Metallurgy, a MSc. and Dr. of Engineering Sciences with an honorary mention in Metallurgical Engineering from the Universidad de Santiago de Chile, Chile. His areas of research are electrometallurgy, corrosion, and treatment of metallurgical effluents. He is an academic and researcher in the Department of Metallurgical Engineering where he teaches undergraduate and graduate courses, and has been the adviser of more than forty Engineering, Master's and PhD theses. He has participated as lead researcher and co-researcher in various FONDEF, FONDECYT, CYTED and DICYT projects. He has published in ISI, SCIELO, and in records of international and national conferences. He is the co-inventor of two patents in Chile and the USA. He is co-author of the book "Fundamentos de Corrosión y Protección de Materiales," published by USACH. He is currently the Vice Dean of Research and Development.
ORCID: 0000-0002-7360-6201

J.I. Tobón, received a BSc. in Geological Engineering in 1992, an MSc. in Engineering in 2003, and a PhD in Materials Science and Technology in 2011, all from the Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. From 1992 to 1995 he worked for different companies in the mining and oil sectors; from 1995 to 1999 he worked for Cementos Argos S.A. while at the same time working at the Universidad Nacional de Colombia as a part-time professor. Since 1999, he has worked full time for the Universidad Nacional de Colombia. Currently, he is a Full Professor in the Materials and Minerals Department, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia. His research interests include: the industrial application of minerals and rocks, chemistry and mineralogy of cements, nanotechnology in construction materials, alternative cementitious materials, and high performance cements and concretes.
ORCID: 0000-0002-1451-1309

W. Osorio, has the following academic degrees: BSc. in Agronomy (1990), Universidad Nacional de Colombia, MSc. in Soil Science (2000), Hawaii University, USA and PhD. in Soil Science (2008), Hawaii University, USA. Since 1993 he has worked as a teacher and researcher at the Universidad Nacional de Colombia where he leads the soil microbiology research group. He is a member of the Soil Sci. Soc. America, the American Society of Agronomy, and the Soil Sci. Soci. of Colombia. He teaches soil sciences courses, plant-soil nutrient management (undergraduate), Environmental Soil Biotechnology (Graduate).
ORCID: 0000-0002-0654-1399



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería
Geológica e Ingeniería de Minas y Metalurgia

Oferta de Posgrados

Especialización en Materiales y Procesos
Maestría en Ingeniería - Materiales y Procesos
Maestría en Ingeniería - Recursos Minerales
Doctorado en Ingeniería - Ciencia y Tecnología de
Materiales

Mayor información:

E-mail: acgeomina_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 53 68

Technical and economic study of striking and clearing operations in buildings under construction. Case study in Bogotá, Colombia

Yezid A. Alvarado ^a, María Isabel Pérez-Gómez ^a, John Alexis Castellanos-Reyes ^a & Isabel Gasch ^b

^a Facultad de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, alvarado.y@javeriana.edu.co, m.perezg@javeriana.edu.co, john.castellanos@javeriana.edu.co

^b ICITECH, Universitat Politècnica de València, Valencia, España, igasch@mes.upv.es

Received: March 07th, de 2016. Received in revised form: August 22th, 2016. Accepted: September 116th, 2016

Abstract

This paper evaluates the economic benefits of shorter construction times that can be attained by applying the New Simplified Procedure (NSP) in multi-storey buildings. The reference building was a multi-storey residential reinforced concrete framework structure with one-way slabs located in Bogotá, Colombia. The study was divided into different phases including the characterization of the components, a study of the different methods to determine load transmissions between slabs and shores, and a review of the cost of renting shoring and formwork materials and labor costs for the building under study. After applying the procedure, an economic assessment was carried out on the execution times obtained in each of the operations studied. The analysis of the construction process of the building structure using the NSP showed that considerable savings can be achieved in construction times without any risk for the integrity of the structure.

Keywords: New Simplified Procedure; shores; time estimations; load estimations; estimation of personnel and equipment costs.

Estudio técnico económico de los procesos de cimbrado y descimbrado en edificaciones. Estudio de caso en Bogotá, Colombia

Resumen

El presente artículo evalúa el beneficio económico de la aplicación del Nuevo Procedimiento Simplificado (NPS), reflejado en los plazos de construcción en edificaciones de entresijos sucesivos. El edificio de referencia corresponde a un edificio residencial resuelto con pórticos y entresijos en una dirección, de concreto reforzado ubicado en la ciudad de Bogotá. Las fases desarrolladas en cumplimiento del objetivo planteado, constaron de una caracterización de los componentes, el estudio de distintas alternativas para determinar la transmisión de cargas entre entresijos y puntales, y una revisión de los precios de alquiler de equipo auxiliar y personal del edificio de referencia. Aplicando dicho procedimiento se realizó una evaluación económica de los plazos obtenidos en cada una de las operaciones estudiadas. Se destaca que el análisis del proceso constructivo de la estructura de la edificación empleando el NPS permite lograr ahorros considerables en la ejecución de la edificación sin poner en riesgo la integridad de la estructura.

Palabras clave: Nuevo Procedimiento Simplificado; puntales; estimación de tiempos; estimación de cargas; estimación costos personal y equipo.

1. Introduction

At the present time, building operations in Colombia related to the shoring and striking processes used in concrete frame structures are mainly based on the developer's individual experience and little attention is given to technical

analyses. This situation is mainly due to the general lack of accurate information on this type of building operation and it often gives rise to building times that are longer and, consequently, more expensive than necessary. According to a study carried out by the *Cámara Colombia de la Construcción* (CAMACOL), between 2008 and 2012, the

How to cite: Alvarado, Y. A., Pérez-Gómez, M. I., Castellanos-Reyes, J. A., & Gasch, I. Technical and economic study of striking and clearing operations in buildings under construction. Case study in Bogotá, Colombia. DYNA 83 (199) pp. 102-107, 2016

traditional framework system with one-way slabs is the most widely used system in the industry being the one preferred by most Colombian developers [1]. Among the most important reasons for this preference is the optimization of internal spaces, the ease of architectural design, or the possibility of carrying out renovations without endangering structural stability, among others.

In other CAMACOL studies, the structure is considered to be among the costliest work stages of the project [2]; therefore, the process used in its construction will have a big influence on the project budget. For this reason, it is necessary to find a method that allows keeping the costs associated with the construction of the structure at a minimum.

When reviewing the current building standards for shoring and striking processes in concrete structures, they are found to be general in nature and do not state any specific method for complying with the requirements of each standard, nor do they give clear recommendations for calculating striking times or about how to calculate the loads between shores and slabs during the construction process.

In accordance with the above, and bearing in mind that the safety of the structure under construction is one of the most important factors in determining building times, it is essential to know how the loads are transmitted between shores and slabs during these processes, since this will guarantee the safety both of the structure itself and of those working on it.

Various theoretical and experimental studies have been carried out in order to solve this problem with the purpose of determining how loads are transmitted between shores and slabs. In 1963, Grundy & Kabaila [3] proposed a simplified method for determining these loads which is still in use. This method is easy to apply and in most cases errs on the side of safety [4].

In later studies [5-9], various authors agreed in finding that Grundy & Kabaila's simplified method [3] overestimates the loads on shores and slabs. The most recent of these studies, by Calderón et. al [10], proposed a new procedure based on a simplified method that allows estimating shore/slab loads during different construction processes. This new simplified method was validated experimentally and through numerical models [11-13]; it is currently regarded as the best method for estimating shore/slab loads.

This paper describes a study of different alternatives for construction processes for a concrete frame system with one-way slabs; its purpose is to define a viable construction process as regards building times and costs. Calderón et al New Simplified Process [10] was used to calculate the loads on slabs.

2. Description of the building used as a case study

The building used for the study is part of a large project composed of eight traditionally built residential apartment blocks with a concrete frame structure and one-way slabs situated between 64th and 66th Streets in the *Modelo Popular* district of Bogotá, Colombia. The tower block is N° 5 with 16 floors (13 above ground and 3 in the underground floors).

All the slabs were composed of a 0.50 cm thick lightened

slab with a 0.05 cm upper layer. The height between floors is 2.45 m and the underground floor-to-ceiling height is 2.35 m.

The central and corner spans, measuring 6.17 x 5.5 m and 3.8 x 5.63 m, respectively, were selected for studying the slab/shore loads since these were subject to the highest forces.

2.1. Shore characteristics

In order to determine the steel shores elastic behavior, compression tests were carried out on two shores fitted with strain gauges supplied by the building equipment rental company contracted for the construction of the building under study. The results of the tests on both shores are given in Table 1.

2.2. Concrete properties

28 MPa concrete was used for slabs and foundations and 35 MPa for columns. The information on the evolution of the concrete supplied by the manufacturers was checked through tests on the concrete used in the project. Table 2 shows the results of the lab tests performed at 3, 7, 14 and 28 days.

3. Study of load transmission in various construction processes

A study on alternative construction processes for the project under study was made in order to define a viable construction process as regards building times and costs. The New Simplified Process [10] was used to calculate the loads on slabs under construction. This method is eminently suitable, as loads can be estimated on any of the shores under a slab, meaning that it is possible to determine deformations and mean loads on shores and slabs.

Table 1.
Modulus of elasticity of the steel shores.

Shore	Maximum load applied (N)	Strain (%)	Modulus of elasticity (MPa)
1	20064.54	0.019	196855
2	20046.00	0.016	208947

Source: The authors.

Table 2.
Results of evolution and concrete properties.

Test	Day	Strength (MPa)
Simple Compression (ASTMC39)	3	20.39
	7	25.23
	14	26.95
	28	31.64
Modulus of Elasticity (ASTMC469)	3	17609
	7	19589
	14	20247
	28	21937
Splitting Tensile Strength (ASTMC496)	3	2.17
	7	2.28
	14	2.44
	28	3.06
Flexural Strength (ASTMC78)	3	3.02
	7	3.30
	14	3.32
	28	4.19

Source: The authors.

The following were the hypotheses considered when carrying out the New Simplified Procedure [10]:

- Variations in the elasticity modulus with time of concrete elements.
- Infinitely stiff foundation.
- Incremental model – considering the accumulation of loads and displacements.
- Shores are elements with elastic behavior and finite stiffness.
- Uniformly distributed loads between shores and slabs.
- The deformation of the slab at any point coincides with that of the shore at that point; thus, mean slab deformation coincides with mean deformation of shores placed under the slab.
- Different slab boundary conditions; deformability measured by Scanlon & Murray's method [14].
- Negligible shrinkage and creep effects.

3.1. Striking criteria

The current Colombian and international building codes share the same general criteria for the striking process. However, no methods are proposed for calculating shore/slab loads during the construction of buildings.

3.1.1. Colombian Earthquake-Resistant Building Code NSR-10 [15]

The Colombian regulations specify the minimum worker and public safety requisites for shoring and formwork. Shores and formwork for concrete, including their design, construction and removal require the strictest criteria and correct planning to achieve safe shoring and formwork.

Construction loads and possible deflections must be taken into consideration in order to determine striking time.

The NSR-10 emphasizes the ACI-347 specifications.

3.1.2. Building Code ACI-347.2-R05 [16]

ACI-347.2-R05 proposes a rational analysis that considers different factors to determine the number of shored slabs under construction and to determine the loads transmitted between slabs and shores. This analysis includes:

- Analysis of the different loads and live loads applied to the structure.
- Consideration of dead load of concrete plus weight of formwork.
- Construction live loads including any work done on the slab and the accumulation of materials.
- Concrete design strength.
- Time cycle of the pouring of successive slabs.
- Concrete strength required to support shoring loads from above when pouring successive slabs.
- Distribution of loads between floors, shores and reshores, or backshores, at the time of placing concrete, stripping formwork and removing backshoring.
- Slab spans or structural members supported by shores.
- Types of formwork and component dimensions.
- Distribution of loads on individual shores.
- Minimum age at which concrete can resist construction and shore loads when pouring upper slabs.

As regards carrying out shoring and striking operations, special emphasis is given to safety precautions when shoring and striking the structure and when shoring and reshoring successive floors.

3.1.3. Method proposed by Calavera & Fernández [17]

Deciding the striking age involves verifying that, under the loads applied in this process, the forces created can be safely resisted by the strength of the concrete at this age (Calavera 1981).

Calavera [17] proposes that if the load acting on a slab on striking is $\alpha \cdot p$; p being the total project characteristic load (self-weight plus dead loads plus live loads), the shores can be removed from the slab when the slab concrete has a tensile strength $f_{ckt,j}$ such that:

$$f_{ckt,j} \geq \alpha \cdot f_{ckt,28} \quad (1)$$

$f_{ckt,28}$: Characteristic strength of concrete at the age of 28 days.

$$\alpha = \frac{q_{const}}{p} \cdot \frac{\gamma'_{fg}}{\gamma_{fg}} \quad (2)$$

Where q_{const} is the construction load, p is the project's load, γ'_{fg} is the factor of safety for construction actions and γ_{fg} is the factor of safety for project actions.

The value of α cannot be higher than the unit; otherwise, the loads supported by a slab floor in the construction stage would be higher than those designed, thereby making the construction process unfeasible.

Eq. (1) is the principal criterion used by a large number of authors to calculate the times for carrying out the different construction processes.

3.2. Alternatives studied

There is a number of different construction processes for consecutive slab floor construction. Alvarado [18] gives the most important as: Shoring and Striking (SS), Shoring, Reshoring and Striking (SRS), and Shoring, Clearing and Striking (SCS).

These three alternatives (see below) were considered for the frequently used 1, 2, 3 and 4 consecutively shored floors in order to find the execution times.

3.2.1. Shoring and Striking (SS)

There are only two clearly defined stages in this process: i) placing the shores where the concrete is poured and ii) its later removal. The required number of sets of shores is used in this process, and two, three or more floors may be consecutively shored in this way.

Table 3 gives the mean loads on slabs (Q_{Emed}) obtained by the New Simplified Procedure [10] for the most critical operations in the different cases studied.

Table 3.
Mean load on slabs in critical operations (CO).

Span	Consecutively shored floors	C.Op.	Floor	Q_{Emed} (kN/m ²)
Central	1	Concrete Placement Floor 2	1	16.24
	2	Concrete Placement Floor 4	2	17.13
	3	Concrete Placement Floor 6	3	16.63
	4	Concrete Placement Floor 6	2	16.81
Corner	1	Concrete Placement Floor 2	1	16.24
	2	Concrete Placement Floor 5	3	16.46
	3	Concrete Placement Floor 6	3	17.53
	4	Concrete Placement Floor 8	4	16.94

Source: The authors.

3.2.2. Shoring, Clearing and Striking (SCS)

or partial striking, consists of removing formwork and more than 50% of the shores that support the slab a few days after pouring the concrete so the material required for shoring and formwork is considerably reduced. This technique reduces building costs and rationalizes the construction process.

The mean loads on slabs (Q_{Emed}) for the most critical operations of the cases studied obtained by the New Simplified Procedure [10] are shown in Table 4.

3.2.3. Shoring, Reshoring and Striking (SRS)

In this process, the shores are removed from certain floors, thus completely unloading the shores so that the loads are redistributed among the different floors. The slabs are then reshored, ensuring contact between shores and slabs so that the shores will bear part of the future load increments. The slabs are made to bear solely their own self-weight when reshored at an early age through this method.

Table 5 shows the mean loads on slabs (Q_{Emed}) obtained by the New Simplified Procedure [10] for critical operations in the different cases studied.

4. Economic study of the different alternatives

4.1. Review of the prices and times used in the building used as case study

The information relative to the project budget, processes and building times was obtained from the building company involved. It refers only to the staff that actually took part in the construction processes analyzed including: site manager,

foreman, building surveyor and construction workers. The office staff consisted of the project supervisor, project manager, safety manager, assistant safety manager, storeman, assistant storeman, secretary, and private security guards. The auxiliary equipment was composed of: shores, straining pieces and other equipment necessary for the construction of slabs with an Clearing, area of 714 m². Table 6 shows the daily cost of staff and equipment for the case study in 2013.

Table 4.
Mean loads on slabs in critical operations (SCS).

Span	Consecutively shored floors	Crit.Op.	Slab	Q_{Emed} (kN/m ²)
Central	1	Concrete Placement Slab 2	1	16.24
	2	Concrete Placement Slab 4	2	13.17
	3	Concrete Placement Slab 5	2	11.95
	4	Concrete Placement Slab 6	2	11.68
Corner	1	Concrete Placement Slab 2	1	16.24
	2	Concrete Placement Slab 5	3	13.87
	3	Concrete Placement Slab 6	3	13.77
	4	Concrete Placement Slab 8	4	13.21

Source: The authors.

Table 5.
Mean loads on slabs in critical operations (SRS).

Span	Consecutively shored floors	Crit. Op.	Slab	Q_{Emed} (kN/m ²)
Central	1	Concrete Placement Slab 2	1	16.24
	2	Concrete Placement Slab 3	2	13.39
	3	Concrete Placement Slab 6	5	12.90
	4	Concrete Placement Slab 3	2	12.84
Corner	1	Concrete Placement Slab 2	1	16.24
	2	Concrete Placement Slab 3	2	13.39
	3	Concrete Placement Slab 4	3	13.04
	4	Concrete Placement Slab 4	3	12.80

Source: The authors.

Table 6.
Daily cost of staff and auxiliary equipment.

Description	Units	Cost
Office Staff	Day	\$ 1,040,217 COP
Building Staff	Day	\$ 311,127 COP
Auxiliary equipment	Day	\$ 199,935 COP
Total		\$ 1,551,278 COP

COP = Colombian Pesos
1.00 USD = 2,615 COP (August, 2016)
Source: Constructora Marquis S.A.

In addition to the above costs, a tower crane was hired at a total cost of \$12m COP per month, including the operator.

For the construction of the tower blocks in the case study, only two sets of shores were used and the construction process chosen was that of Shoring and Striking.

The time for laying the slab was set at seven days, including five days for transporting and installing auxiliary equipment and two days for placing the concrete. Striking time was set at 10 days.

Table 7.
Total times for the alternatives studied (results in days).

Consecutively shored slabs	SS		SCS		SRS	
	Central Span	Corner Span	Central Span	Corner Span	Central Span	Corner Span
1	225	225	225	225	225	225
2	87	83	56	56	62	60
3	72	67	61	54	61	61
4	66	66	65	59	66	66

Source: The authors

Table 8.
Percentage savings or excess costs of the economic variables analyzed for each construction process.

Consecutively shored slabs	Building Staff			Office Staff			Auxiliary Equipment			Tower Crane		
	SS	SCS	SRS	SS	SCS	SRS	SS	SCS	SRS	SS	SCS	SRS
2	2%	-9%	-7%	6	-30%	-23%	5%	-48%	-52%	6	-30%	-23%
3	-3%	-7%	-7%	-11%	-24%	-24%	22%	-29%	-43%	-11%	-24%	-24%
4	-6%	-6%	-6%	-18%	-20%	-18%	40%	-12%	-32%	-18%	-20%	-18%

Source: The authors

4.2. Study of times

The execution times for the different alternatives studied were obtained from the analysis of the load transmissions (Table 7) and they agree with the striking times proposed in Calavera [17].

4.3. Study of costs

The results of the striking time calculations were used to determine the execution costs, which were then compared with the actual costs involved in the construction of the project used for the case study. The different results for each construction process and the economic variables analyzed can be seen in Table 8. Negative values signify savings and positive values signify excess costs.

5. Analysis of the results

The behavior of loads on one-way slabs and shores in a concrete frame structure was analyzed for a series of construction processes. Also analyzed were the times required for each of the construction processes studied and an assessment was made of their economic costs using the actual costs of building an eight-storey block as a reference.

The slab design load was not exceeded in any of the processes showing that all of them are viable. According to the subsequent analysis, the best behavior was obtained by the SCS process. In this technique, after clearing, only 50% of the shoring was required to support the loads between the slabs.

Construction cycles play an important role, as building times can be reduced when the shoring assembly process is optimized. From the results obtained in the building times, it can be concluded that faster execution times are not always achieved by using more shores. In fact, the best results are obtained by an SCS process with two consecutively shored floors.

The results from using only one set of shores indicate that this system is not advisable due to the long execution times required, which were the same in all the construction processes.

As regards costs, the biggest savings (approximately 30%) are obtained by implementing SCS with two sets of shores, since faster times are obtained with savings in both equipment and labor costs.

6. Conclusions

Using the New Simplified Procedure [10] to calculate shore/slab loads provides developers with a tool that guarantees correct building practice without exceeding the permitted loads on slabs during this construction stage. Secondly, calculating striking times by Calavera's method, as validated by Fernandez [17], aids in planning concrete frame projects without any risks to safety. This system allows loads to be analyzed in order to establish the minimum time requirements to guarantee the stability of the slabs.

The cost analysis of these two methods showed that considerable savings can be made over the traditional methods used for this type of project, achieving savings between 6 and 33% in equipment and labor costs.

As regards the construction processes studied, all of these are valid as long as the appropriate analyses are carried out on loads and times. The best results are achieved by using the SCS system. These methods should be recommended in Building Codes in order to guarantee the safe and effective laying of slabs in reinforced concrete framework structures.

References

- [1] Estudios económicos CAMACOL, Evolución de las normas técnicas y la inclusión de nuevos sistemas constructivos. Revista Coordinada Urbana. 44, Diciembre, 2012.
- [2] Estudios Económicos CAMACOL, Tendencia reciente de los costos en construcción de vivienda en Colombia. Revista Coordinada Urbana. 31, Octubre 2011.
- [3] Grundy, P. and Kabaila, A., Construction loads on slabs with shored formwork in multistory buildings, ACI Structural proceedings, 60(12), pp. 1729-1738, 1963.
- [4] Stivaros, P. and Halvorsen, G., Equivalent frame analysis of concrete buildings during construction, Concrete International, 13(8), pp. 57-62, 1991.
- [5] Duan, M.Z. and Chen, W.F., Improved simplified method for slab and shore load analysis during construction. Project report CE-STR-95-24, Purdue University, West Lafayette, Ind., USA, 1995.
- [6] Moragues, J.J., Catalá, J. and Pellicer, E., An analysis of concrete framed structures during the construction process, Concrete International, 18(11), pp. 44-48, 1996.
- [7] Rosowsky, D.V., Philbrick, T.W. and Huston, D.R., Observations from shore load measurements during concrete construction. Journal of Performance of Constructed Facilities, 11(1), pp. 18-23, 1997. DOI: 10.1061/(ASCE)0887-3828(1997)11:1(18)
- [8] Fang, D.P., Zhu, H.Y., Geng, C.D. and Liu, X.L., Floor load distribution in reinforced concrete buildings during construction. ACI Structural Journal, 98(2), pp. 149-156, 2001. DOI: 10.14359/10183
- [9] Alvarado, Y.A., Calderón, P.A., Gasch, I. and Adam, J.M., A numerical study into the evolution of loads on shores and slabs during construction of multistorey buildings. Comparison of partial striking with other techniques, Engineering Structures, 32(10), pp. 3093-3102, 2010. DOI: 10.1016/j.engstruct.2010.05.028
- [10] Calderón, P., Alvarado, Y.A. and Adam, J.M., A new simplified procedure to estimate loads on slabs and shoring during the construction of multistorey buildings, Engineering Structures, 33(5), pp. 1565-1575, 2011. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.01.027
- [11] Gasch, I., Estudio de la evolución de cargas en forjados y estructuras auxiliares de apuntalamiento durante la construcción de edificios de hormigón in situ mediante procesos de cimbrado, clareado y descimbrado de plantas consecutivas, PhD Tesis, Universitat Politècnica de València, Valencia, Spain, 2012. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/15407>
- [12] Gasch, I., Alvarado, Y.A., Calderón, P.A. y Torres, B., Transmisión de cargas entre forjados y puntales en un edificio de forjado reticular de caseton perdido utilizando clareado, Informes de la Construcción, 65(530), pp. 195-202, 2013. DOI: 10.3989/ic.12.046
- [13] Gasch, I., Alvarado, Y.A., Calderón, P.A. and Ivorra, S., Construction loads using a shoring-clearing-striking process, Proceedings of ICE Structures and Buildings, 167(SB4), pp. 217-229, 2014. DOI: 10.1680/stbu.12.00006
- [14] Scanlon, A. and Murray, D.B., Practical calculation of two-way slab deflection, Concrete international, 4(11), pp. 43-50, 1982.
- [15] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo, Reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10, Bogotá D.C., Colombia, 2010.
- [16] ACI Committee 347. ACI 347.2R-05: Guide for shoring/reshoring of concrete multistory buildings. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2005.
- [17] Calavera, J. and Fernández, J., Cuaderno N° 3: Criterios para el descimbrado de estructuras de hormigón, Madrid: INTEMAC, 1991.
- [18] Alvarado, Y.A., Estudio experimental y numérico de la construcción de forjados hormigonados in situ mediante procesos de cimbrado, clareado y descimbrado de plantas consecutivas, PhD Tesis,

Universitat Politècnica de València, Valencia, España, 2009. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/7285>

Y.A. Alvarado, is Full Professor in the Department of Civil Engineering at the Pontificia Universidad Javeriana Bogotá, Colombia. Is PhD from the Department of Construction Engineering of the UPV. He teaches, mainly, in the Degree of Civil Engineering and in the Master of Civil Engineering of the Pontificia Universidad Javeriana. He has also participated in several teaching innovation projects, publishing articles at conferences in this field. The research activity is carried out at the Civil Engineering Department of Pontificia Universidad Javeriana within the research of "Concrete" and "Building construction systems". ORCID: 0000-0002-1260-8211.

M.I. Pérez-Gómez, is Consultant in INGETEC. BSC. Civil Engineer with a MSc. degree in Construction from the Pontificia Universidad Javeriana Bogotá, Colombia. ORCID: 0000-0002-7657-8162.

J.A. Castellanos-Reyes, is Consultant. Civil Engineer with a MSc. degree in Construction from the Pontificia Universidad Javeriana Bogotá Colombia. ORCID: 0000-0002-3899-3920.

I. Gasch, is Full Professor in the Department of Continuous Medium Mechanics and Theory of Structures at the Universitat Politècnica de València (UPV), Spain. PhD from the Department of Construction Engineering of the UPV. She teaches, mainly, in the Degree of Mechanical Engineering since 2007. She has also participated in several teaching innovation projects, publishing articles at conferences in this field. She is also co-author of four teaching books. The research activity is carried out at the Institute of Science and Technology of Concrete (ICITECH) of the UPV within the research "Building Construction systems". Currently, she is also researching with the Pontificia Universidad Javeriana in Bogotá, where she has participated, among others, in the project "Experimental and numerical study of the load transmission between shores and slabs during the construction of buildings with industrial systems". ORCID: 0000-0001-7036-4481.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería Civil

Oferta de Posgrados

Especialización en Vías y Transportes
Especialización en Estructuras
Maestría en Ingeniería - Infraestructura y Sistemas
de Transporte
Maestría en Ingeniería - Geotecnia
Doctorado en Ingeniería - Ingeniería Civil

Mayor información:

E-mail: asisacic_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 5172

Magnetic and structural behavior of $\text{La}_{1.5-x}\text{Ba}_{1.5+x-y}\text{Ca}_y\text{Cu}_3\text{O}_z$ system $0.3 \leq x \leq 0.4$ and $0.4 \leq y \leq 0.5$

Cesar Camilo Canarías-Camargo ^a, Armando Sarmiento-Santos ^a & Carlos Arturo Parra-Vargas ^a

^a GSEC, GFM, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia. camilo6102@hotmail.com, asarmiento.santos@uptc.edu.co, carlos.parra@uptc.edu.co

Received: April 11th, 2016. Received in revised form: August 30th, 2016. Accepted: September 19th, 2016.

Abstract

In this paper we analyzed the $\text{La}_{1.5-x}\text{Ba}_{1.5+x-y}\text{Ca}_y\text{Cu}_3\text{O}_z$ system, based on the production of samples that are in the range of single phase, pure phase, proposed by West [1]. We report the production and characterization $\text{La}_{1.1}\text{Ba}_{1.4}\text{Ca}_{0.5}\text{Cu}_3\text{O}_z$, $\text{La}_{1.1}\text{Ba}_{1.5}\text{Ca}_{0.4}\text{Cu}_3\text{O}_z$, $\text{La}_{1.1}\text{Ba}_{1.6}\text{Ca}_{0.3}\text{Cu}_3\text{O}_z$, $\text{La}_{1.2}\text{Ba}_{1.3}\text{Ca}_{0.5}\text{Cu}_3\text{O}_z$, $\text{La}_{1.2}\text{Ba}_{1.4}\text{Ca}_{0.4}\text{Cu}_3\text{O}_z$, $\text{La}_{1.3}\text{Ba}_{1.2}\text{Ca}_{0.5}\text{Cu}_3\text{O}_z$, systems, in contrast to those reported in previous articles [2]. The material was produced by the solid state reaction method (SSR) with a sintered temperature between 820 and 850 °C. The morphological characterization with respect to the granular behavior using the Scanning Electron Microscopy (SEM) technique is showed; the structural characterization is obtained submitting the specimen to X Rays Diffraction (DRX) and the structural parameters are got implementing the Rietveld refinement method in software FullProf; the material results to possess tetragonal unitary cells type P4/mmm perovskite with $a \approx 3.89 \text{ \AA}$, $b \approx 3.89 \text{ \AA}$ and $c \approx 11.60 \text{ \AA}$. Systems have a pure phase, single phase as proposed by West. The critical temperature is compared with the parameters x and y .

Keywords: Superconductor; CLBCO; LaBaCaCuO ; Pure phase.

Comportamiento magnético y estructural del sistema $\text{La}_{1.5-x}\text{Ba}_{1.5+x-y}\text{Ca}_y\text{Cu}_3\text{O}_z$ $0.2 \leq x \leq 0.4$ y $0.3 \leq y \leq 0.5$

Resumen

En este artículo analizamos el sistema $\text{La}_{1.5-x}\text{Ba}_{1.5+x-y}\text{Ca}_y\text{Cu}_3\text{O}_z$, basados en la producción de muestras que se encuentran en el rango de fase única, fase pura, propuesta por West [1]. Reportamos la producción y caracterización de los sistemas $\text{La}_{1.1}\text{Ba}_{1.4}\text{Ca}_{0.5}\text{Cu}_3\text{O}_z$, $\text{La}_{1.1}\text{Ba}_{1.5}\text{Ca}_{0.4}\text{Cu}_3\text{O}_z$, $\text{La}_{1.1}\text{Ba}_{1.6}\text{Ca}_{0.3}\text{Cu}_3\text{O}_z$, $\text{La}_{1.2}\text{Ba}_{1.3}\text{Ca}_{0.5}\text{Cu}_3\text{O}_z$, $\text{La}_{1.2}\text{Ba}_{1.4}\text{Ca}_{0.4}\text{Cu}_3\text{O}_z$, $\text{La}_{1.3}\text{Ba}_{1.2}\text{Ca}_{0.5}\text{Cu}_3\text{O}_z$, en contraste con los reportados en artículos previos [2]. Las muestras fueron producidas por el método de reacción de estados sólido (SSR) con una temperatura de sinterizado de 850 °C. Se presenta la caracterización morfológica referente al comportamiento granular utilizando la técnica de Microscopía electrónica de barrido (SEM); La caracterización estructural, se determinó sometiendo las muestras a la técnica de Difracción de Rayos X (DRX) y los parámetros estructurales a partir del método de refinamiento Rietveld en el software FullProf. Los materiales resultantes tipo perovskita poseen celdas unitarias tetragonales tipo P4/mmm con $a \approx 3.89 \text{ \AA}$, $b \approx 3.89 \text{ \AA}$ y $c \approx 11.60 \text{ \AA}$. Los sistemas tienen fase única, fase pura como lo propone West. La temperatura crítica es comparada con los parámetros x e y .

Palabras clave: Superconductor; CLBCO; LaBaCaCuO ; fase pura

1. Introducción

Dentro de los descubrimientos más representativos en el campo de los materiales en las últimas décadas del siglo XX e inicios del siglo XXI, los más destacables son los producidos en

el campo de los materiales cerámicos. Ello ha requerido el replanteo de conceptos, metodologías y el uso de nuevos y sofisticados procedimientos experimentales. Recíprocamente, el progresivo avance de la tecnología ha incrementado el interés en la búsqueda de nuevos compuestos con propiedades

How to cite: Canarías-Camargo, C. C., Sarmiento-Santos, A. & Parra-Vargas C. A. Comportamiento Magnético y Estructural del Sistema $\text{La}_{1.5-x}\text{Ba}_{1.5+x-y}\text{Ca}_y\text{Cu}_3\text{O}_z$ $0.2 \leq x \leq 0.4$ y $0.3 \leq y \leq 0.5$ DYNA 83 (199) pp. 108-113, 2016

potencialmente aplicables en la industria, con el fin de optimizar procesos, disminuir costos y preservar el medio ambiente. Los anteriores factores crean la impetuosa necesidad de buscar de forma continua nuevas técnicas de síntesis, técnicas de tratamiento térmico o aplicar las técnicas existentes para lograr compuestos con una colección de propiedades que permitan satisfacer las necesidades de nuestros días [3].

Lo que comúnmente se denomina proceso de síntesis, constituye la frontera permanente en el descubrimiento de nuevos materiales. Un concepto fundamental asociado al desarrollo de nuevos materiales establece que todo material es el resultado de un proceso de fabricación, en donde, partiendo de unas materias primas específicas, obtenidas a través de un estricto y controlado procedimiento, y haciendo uso de técnicas de sinterizado se llega a una estructura característica (Redes de Bravais). Esta estructura es la responsable de las propiedades del material que son las que le confieren su comportamiento y potenciales aplicaciones. Es por esto que en las últimas décadas la intensa actividad en el estudio de los materiales cerámicos con estructura tipo perovskita se ha intensificado y está justificada en la posibilidad de variar la posición de los átomos dentro de la red cristalina, originando innumerables propiedades eléctricas, magnéticas, ópticas, mecánicas, catalíticas y térmicas [4].

Dentro de este contexto la combinación de propiedades específicas en un compuesto permite alcanzar diversos grados de multifuncionalidad, lo cual es un reto dentro del campo de la físico-química del estado sólido. Diferentes propiedades físicas de los materiales tipo perovskita se relacionan con variables como la composición química, la pureza de sus fases, defectos superficiales, estructura cristalina, morfología, condiciones de sinterización, más aún, el control de estos parámetros es crítico dentro de los procesos de producción de este tipo de compuestos [4].

Dos características fundamentales de los óxidos superconductores de alta temperatura crítica (OSATc) son su pequeña longitud de coherencia y su alta anisotropía. Uno de los sistemas más extensamente estudiado es el sistema ortorrómbico $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ (YBCO). Este sistema presenta algunas características interesantes; el compuesto parece ser más anisotrópico cuando su estructura pasa de ortorrómbica a tetragonal. El sistema $CaLaBaCu_3O_{7-\delta}$ (CLBCO), es un sistema superconductor de tipo TR: 123 con $T_c = 78$ K. (cuando $7-\delta = 6.90$) que posee una estructura tetragonal para todos los valores posibles de oxígeno [2]. Estructuralmente similar al YBCO deficiente de oxígeno, el CLBCO se ha convertido en un excelente sistema para estudiar sus propiedades superconductoras y el efecto de las fluctuaciones superconductoras.

El CLBCO fue descubierto en 1988 por W. T. Fu [3] y D. M. De Leeuw [5] a través de estudios de sustitución y dopaje de los compuestos TR-123. Ellos observaron que el $LaBaCaCu_3O_x$ posee una estructura tetragonal isomorfa, tipo $YBaCu_3O_{7-\delta}$, con el Ca y el La localizados en los sitios de Y y de Ba, presentando una temperatura crítica de aproximadamente 80 K. La fase tetragonal representa simetría de grupo espacial $P4/mmm$. Este compuesto es denominado comúnmente de TR: 1113 o CLBCO y es un prototipo de TR: $Ba_2Cu_3O_7$, donde 40 % del sitio de TR es ocupado por el ion de Ca y el 60 % restante es ocupado por el ion de La. Uno de los sitios de Bario es ocupado por una distribución de iones de Ca y La. Esta distribución hace que los

sitios de oxígeno O(4) y O(5), en las cadenas, estén aleatoriamente ocupados, formando así una estructura tetragonal independientemente del contenido de oxígeno [6]. Al contrario de la estructura de los elementos TR-123 el CLBCO presenta una estructura siempre tetragonal independientemente del contenido de oxígeno con $a = b = 3.8655$ Å y $c = 11.6354$ Å, el contenido de oxígeno en ese compuesto es de aproximadamente 7.0. West y colaboradores propusieron el diagrama de fase para el sistema $La_{1.5-x}Ba_{1.5+x-y}Ca_yCu_3O_z$ en condiciones normales de presión a una temperatura de 950 °C con $0 < x < 0.5$ y $0 < y < 0.5$ [7]. West observó que la estructura del sistema $La_{1.5-x}Ba_{1.5+x-y}Ca_yCu_3O_z$ puede coexistir con pequeñas cantidades de $BaCuO_2$, Ca_2CuO_3 y CuO y que para ser obtenida una estructura monofásica es preciso usar $x \leq 0.5$ y $0.2 < y < 0.5$, obteniendo una temperatura crítica de 77 K. con parámetros $x=0.5$ y $y=0.5$. Los resultados se esquematizan en la Fig. 1, ampliando la escala de la zona de fase Fig. 2 donde se puede observar los sistemas de estudio.

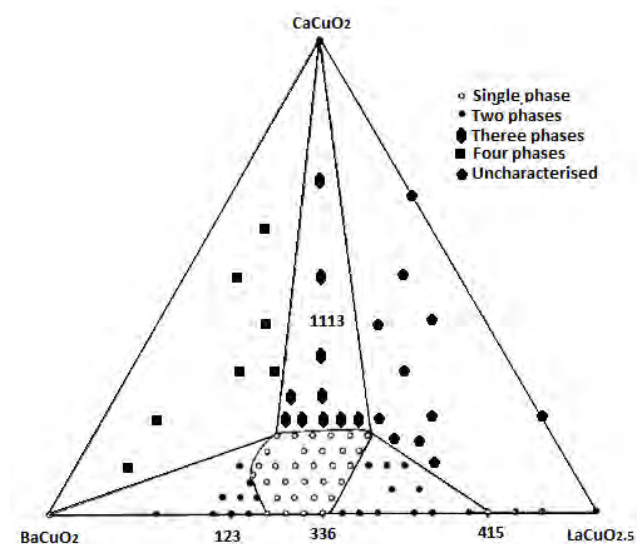


Figure 1. Diagrama de fase del sistema $La_{1.5-x}Ba_{1.5+x-y}Ca_yCu_3O_z$. Fuente: J. M. S. Skakle, A. R. West, 1994.

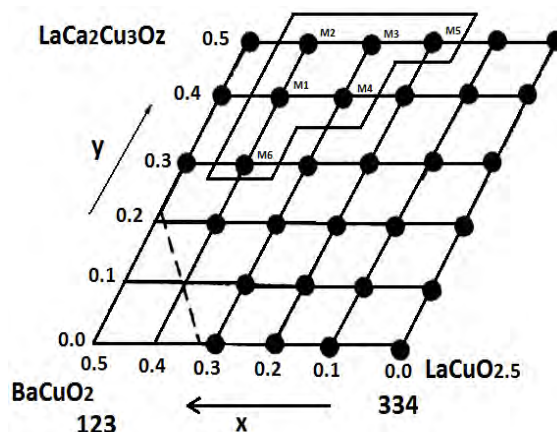


Figure 2. Diagrama de fase pseudo-ternario ampliado para el sistema $La_{1.5-x}Ba_{1.5+x-y}Ca_yCu_3O_z$. Fuente: Los autores.

2. Metodología

Las muestras superconductoras de $\text{La}_{1.5-x}\text{Ba}_{1.5+x-y}\text{Ca}_y\text{Cu}_3\text{O}_z$ fueron preparadas a través del método de reacción de estado sólido. Los óxidos utilizados La_2O_3 (Aldrich, 99.999%), BaCO_3 (Aldrich 99.999%) CaO (Aldrich, 99.999%), y CuO (Aldrich, 99.999%). Para poder ser utilizados el La_2O_3 y CuO se secaron a 600 °C, el BaCO_3 y CaO a 250 °C, durante 4 h. Cantidades apropiadas de dichos óxidos se maceraron y fueron colocados en crisoles llevados a un horno de mufla a 750 °C durante 24 h para el descarbonatado. Las muestras fueron nuevamente maceradas y llevadas a temperaturas entre 800 °C y 850 °C. Las muestras se maceraron y se llevaron al horno hasta obtener productos monofásicos. En los casos en que las muestras no eran de una sola fase, se les dio un tratamiento de calor adicional a una temperatura algo superior hasta obtener una fase pura. Un último tratamiento térmico (oxigenación) fue realizado con flujo de oxígeno disminuyendo la temperatura desde 850 °C a temperatura ambiente y una disminución gradual con una razón de 20 °C. por hora.

Las medidas de difracción fueron realizadas utilizando un difractómetro comercial de rayos X con radiación $K\alpha$, de Cu con longitud de onda 1.5406 Å de la Universidad Nacional. Todas las muestras fueron analizadas a través de la técnica de Difracción de Rayos X (DRX) con un paso $\Delta\theta=0.02$, en el rango de 20 a 90 grados y un tiempo de conteo de 2 s. El análisis de Microscopia Electrónica de Barrido se realizó con un equipo JOEL, modelo JSM 6490-LV de la Universidad de los Andes. En todas las muestras se realizó un procedimiento similar, observándolas a diferentes aumentos: 3000X y 6000X por medio de los métodos de electrones secundarios (referenciado en las micrografías como ETD). Igualmente se estudiaron las muestras a partir de la técnica EDX con el fin de detectar la presencia de los elementos constituyentes de las muestras de $\text{La}_{1.5+x}\text{Ba}_{1.5+x-y}\text{Ca}_y\text{Cu}_3\text{O}_z$.

3. Resultados y discusión

El sistema $\text{La}_{1.5+x}\text{Ba}_{1.5+x-y}\text{Ca}_y\text{Cu}_3\text{O}_z$ fue analizado a partir de bases de datos cristalográficas tales como la ICSD, comparándolo con el modelo propuesto por West [1] y otros [5], el modelo teórico utilizado para comparar las muestras superconductoras se encuentra en la Tabla 1. El resultado de los difractogramas obtenidos para las muestras de $\text{La}_{1.5+x}\text{Ba}_{1.5+x-y}\text{Ca}_y\text{Cu}_3\text{O}_z$, en la Fig. 4, se observa que es muy consistente con lo esperado, pues evidencia la estructura tetragonal predicha por West [1].

Los difractogramas experimentales fueron comparados con el modelo estructural propuesto por West [2]. A partir de este modelo se generó la celda unitaria del CLBCO, la cual fue comparada con cada difractograma y finalmente se concluyó, al igual que West, que el modelo consistente correspondía al de los datos consignados en la Tabla 1. En esta tabla se consigna el grupo espacial, que corresponde a la estructura tetragonal, los parámetros de red, la posición atómica de cada uno de los iones en la celda y su factor de ocupación. A partir de estos datos fue posible modelar la estructura ideal en el programa PowderCell, denominado modelo teórico, para efectos del refinamiento de los datos de

difracción. La estructura ideal del sistema $\text{La}_{1.5+x}\text{Ba}_{1.5+x-y}\text{Ca}_y\text{Cu}_3\text{O}_z$, así como su difractograma más probable Fig. 3. Una primera inspección a los difractogramas experimentales permite afirmar que las muestras producidas sí corresponden a una estructura con las características esperadas. En la Fig. 4 se presentan todos los difractogramas obtenidos experimentalmente, y se diferencia cada muestra con un color diferente.

Una comparación más estricta de todas las muestras se presenta en la Fig. 5, en ella se representa en diferente color las muestras de acuerdo con la simbología manejada. El análisis de esta imagen permite concluir que las muestras son de fase pura pues presentan las mismas características de otras muestras del mismo sistema $\text{La}_{1.5-x}\text{Ba}_{1.5+x-y}\text{Ca}_y\text{Cu}_3\text{O}_z$.

Tabla 1.

Modelo propuesto por West para el sistema $\text{La}_{1.5-x}\text{Ba}_{1.5+x-y}\text{Ca}_y\text{Cu}_3\text{O}_z$.

Parámetros de Red			Grupo espacial	
a (Å)	b (Å)	c (Å)	P4/mmm	
3.8742	3.8742	11.7138	FO	
Átomo	X	Y	Z	FO
La	0.5	0.5	0.500	0.50
Ca	0.5	0.5	0.500	0.50
Ba	0.5	0.5	0.181	0.75
La	0.5	0.5	0.181	0.25
Cu1	0.0	0.0	0.000	1.00
Cu2	0.0	0.0	0.345	1.00
O1	0.0	0.5	0.000	0.50
O2	0.0	0.5	0.389	1.00
O3	0.0	0.0	0.155	1.00

Fuente: Los autores.

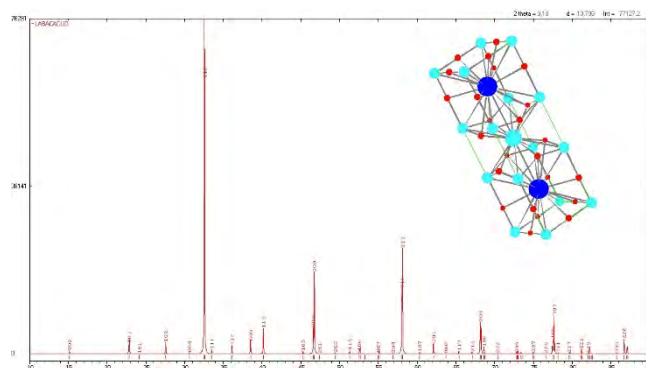


Figure 3. Modelo teórico utilizado para comparar los difractogramas experimentales.

Fuente: Los autores.

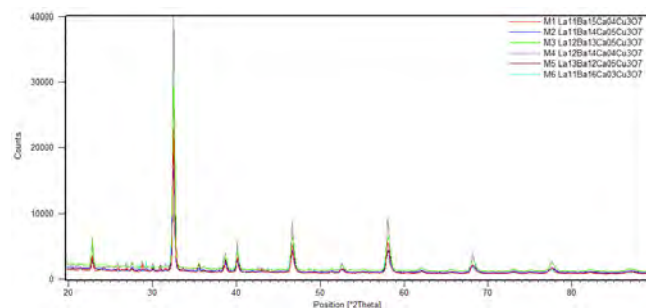


Figure 4. Resultados experimentales para las muestras de $\text{La}_{1.5-x}\text{Ba}_{1.5+x-y}\text{Ca}_y\text{Cu}_3\text{O}_z$.

Fuente: Los autores.

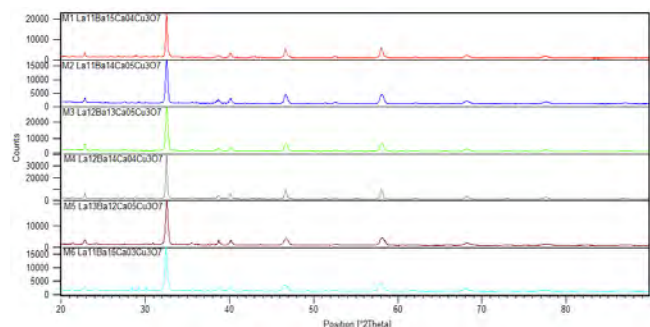


Figure 5. Contraste de los difractogramas de las muestras de $\text{La}_{1.5-x}\text{Ba}_{1.5+x-y}\text{Cu}_3\text{O}_z$.

Fuente: Los autores.

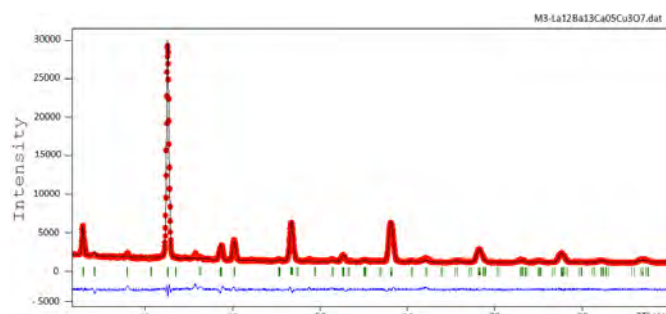


Figure 6. Refinamiento Rietveld para la composición $\text{La}_{1.2}\text{Ba}_{1.3}\text{Ca}_{0.5}\text{Cu}_3\text{O}_7$.

Fuente: Los autores.

De las muestras producidas, la única que presenta picos de impureza que no corresponden a la estructura ideal es la composición $\text{La}_{1.1}\text{Ba}_{1.6}\text{Ca}_{0.3}\text{Cu}_3\text{O}_7$. Las fases minoritarias fueron determinadas a partir del software DRXwin y RunCreafit, estableciendo que las impurezas presentes corresponden a fases minoritarias de Ba_2CuO_3 , BaCuO_2 , CuO .

En la Fig. 6 se muestra el resultado del refinamiento Rietveld para la composición $\text{La}_{1.2}\text{Ba}_{1.3}\text{Ca}_{0.5}\text{Cu}_3\text{O}_7$, donde la línea roja corresponde al patrón experimental, la línea negra el patrón teórico ajustado en el programa FullProf, las líneas verdes representan las reflexiones de Bragg de la fase utilizada y la línea azul la diferencia entre el patrón ajustado y el patrón experimental.

En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos para los parámetros de red y los parámetros χ^2 y $R(F^2)$ del refinamiento Rietveld para el sistema $\text{La}_{1.5-x}\text{Ba}_{1.5+x-y}\text{Cu}_3\text{O}_z$. Se observa que la variación de La, Ba y Ca en el sistema no afecta de forma notoria los parámetros de red, lo cual es un indicio de la estabilidad estructural del sistema y de su alta anisotropía planar $a \ll c$.

De los análisis de las micrografías, y a partir de los difractogramas de las mismas, se puede establecer que el sistema $\text{La}_{1.5-x}\text{Ba}_{1.5+x-y}\text{Cu}_3\text{O}_z$, presenta una fase superconductora pura; lo cual comprueba las afirmaciones realizadas anteriormente. En las Figs. 7 y 8 se puede ver una representación típica de las características morfológicas de este tipo de muestras. De estas figuras se puede establecer que la fase superconductora se conformó de una manera similar en cada muestra [8,9]. Igualmente se corrobora que

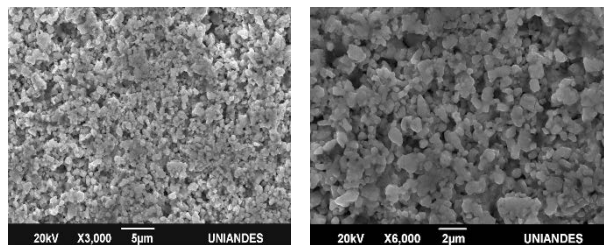


Figure 7. Micrografías obtenidas para el sistema $\text{La}_{1.1}\text{Ba}_{1.4}\text{Ca}_{0.5}\text{Cu}_3\text{O}_z$.

Fuente: Los autores.

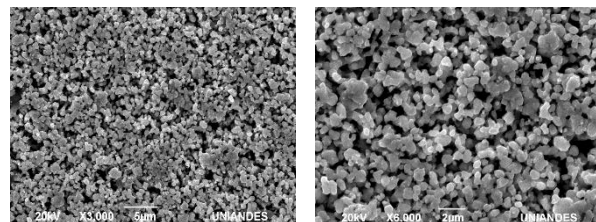


Figure 8. Micrografías obtenidas para el sistema $\text{La}_{1.3}\text{Ba}_{1.2}\text{Ca}_{0.5}\text{Cu}_3\text{O}_z$.

Fuente: Los autores.

Tabla 2.

Resultados obtenidos por la técnica EDX para el sistema $\text{La}_{1.5-x}\text{Ba}_{1.5+x-y}\text{Cu}_3\text{O}_z$.

M	SISTEMA	%	%	%	%	%
		La	Ba	Ca	Cu	O
M1	$\text{La}_{1.1}\text{Ba}_{1.5}\text{Ca}_{0.4}\text{Cu}_3\text{O}_z$	6.21	13.63	2.95	18.93	58.28
M2	$\text{La}_{1.1}\text{Ba}_{1.4}\text{Ca}_{0.5}\text{Cu}_3\text{O}_z$	7.76	12.16	4.85	22.05	53.19
M3	$\text{La}_{1.2}\text{Ba}_{1.3}\text{Ca}_{0.5}\text{Cu}_3\text{O}_z$	10.27	13.47	3.54	26.27	46.44
M4	$\text{La}_{1.2}\text{Ba}_{1.4}\text{Ca}_{0.4}\text{Cu}_3\text{O}_z$	6.91	12.21	2.04	20.39	58.45
M5	$\text{La}_{1.3}\text{Ba}_{1.2}\text{Ca}_{0.5}\text{Cu}_3\text{O}_z$	10.59	9.19	2.67	27.49	50.07
M6	$\text{La}_{1.1}\text{Ba}_{1.6}\text{Ca}_{0.3}\text{Cu}_3\text{O}_z$	9.64	14.39	1.96	22.43	51.59

Fuente: Los autores.

no hay presencia de impurezas y que estas muestras cumplen con la estequiometría esperada. La técnica EDX permitió establecer el porcentaje de los elementos químicos en cada muestra, estos resultados pueden ser vistos en la Tabla 2.

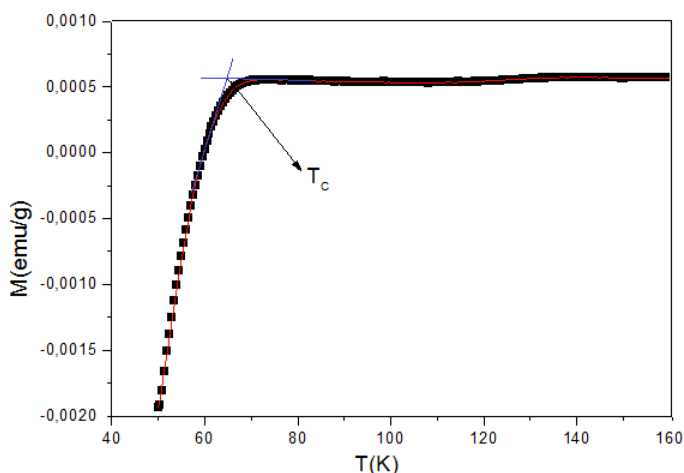


Figure 9. M Vs T para el sistema $\text{La}_{1.2}\text{Ba}_{1.4}\text{Ca}_{0.4}\text{Cu}_3\text{O}_z$.

Fuente: Los autores.

Tabla 3.

Resultados del refinamiento Rietveld para el sistema $\text{La}_{1.5-x}\text{Ba}_{1.5+x-y}\text{Ca}_y\text{Cu}_3\text{O}_z$.

Sistema	χ^2	$R(F^2)$	a (Å)	b (Å)	c (Å)	α	β	γ	R_{wp}	R_{exp}
$\text{La}_{1.1}\text{Ba}_{1.4}\text{Ca}_{0.5}\text{Cu}_3\text{O}_z$	1.503	0.1450	3.889(8)	3.889(8)	11.650(3)	90	90	90	12.60	8.38
$\text{La}_{1.1}\text{Ba}_{1.5}\text{Ca}_{0.4}\text{Cu}_3\text{O}_z$	2.036	0.1112	3.891(8)	3.891(8)	11.634(0)	90	90	90	16.00	7.86
$\text{La}_{1.1}\text{Ba}_{1.6}\text{Ca}_{0.3}\text{Cu}_3\text{O}_z$	2.185	0.0747	3.903(6)	3.903(6)	11.611(2)	90	90	90	17.20	7.87
$\text{La}_{1.2}\text{Ba}_{1.3}\text{Ca}_{0.5}\text{Cu}_3\text{O}_z$	1.651	0.1702	3.887(9)	3.887(9)	11.651(2)	90	90	90	10.60	6.42
$\text{La}_{1.2}\text{Ba}_{1.4}\text{Ca}_{0.4}\text{Cu}_3\text{O}_z$	2.702	0.0466	3.890(0)	3.890(0)	11.668(6)	90	90	90	16.40	6.07
$\text{La}_{1.3}\text{Ba}_{1.2}\text{Ca}_{0.5}\text{Cu}_3\text{O}_z$	1.642	0.1700	3.891(3)	3.891(3)	11.602(9)	90	90	90	12.40	7.55

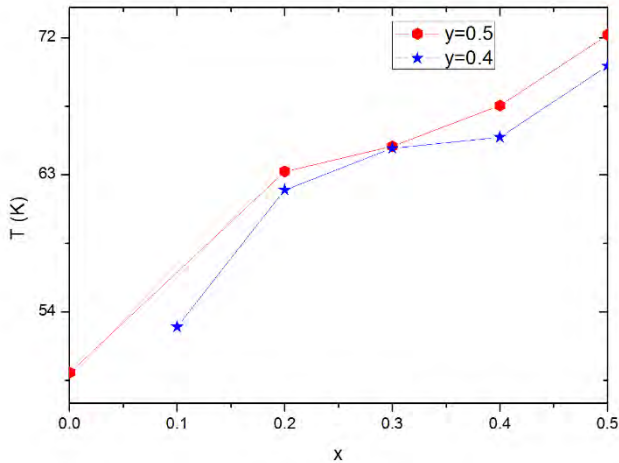
Fuente: Los autores.

Tabla 4.

Resultados obtenidos para las temperaturas críticas.

M	Sistema	x	y	Tc (K)
M2	$\text{La}_{1.1}\text{Ba}_{1.4}\text{Ca}_{0.5}\text{Cu}_3\text{O}_z$	0.4	0.5	68.55
M1	$\text{La}_{1.1}\text{Ba}_{1.5}\text{Ca}_{0.4}\text{Cu}_3\text{O}_z$	0.4	0.4	66.75
M6	$\text{La}_{1.1}\text{Ba}_{1.6}\text{Ca}_{0.3}\text{Cu}_3\text{O}_z$	0.4	0.3	65.85
M3	$\text{La}_{1.2}\text{Ba}_{1.3}\text{Ca}_{0.5}\text{Cu}_3\text{O}_z$	0.3	0.5	65.90
M4	$\text{La}_{1.2}\text{Ba}_{1.4}\text{Ca}_{0.4}\text{Cu}_3\text{O}_z$	0.3	0.4	65.86
M5	$\text{La}_{1.3}\text{Ba}_{1.2}\text{Ca}_{0.5}\text{Cu}_3\text{O}_z$	0.2	0.5	64.22

Fuente: Los autores.

Figure 10. Temperatura crítica en función del parámetro x para el sistema $\text{La}_{1.5-x}\text{Ba}_{1.5+x-y}\text{Ca}_y\text{Cu}_3\text{O}_z$.

Fuente: Los autores.

La Fig. 9 se muestra la curva de magnetización ZFC en función de la temperatura, la cual es típica de un material superconductor; se muestra la forma como se calculó la temperatura crítica en cada una de las muestras.

En la Tabla 4 se consigna los resultados obtenidos para los valores de la temperatura crítica todas con un campo aplicado de 200 Oe.

En la Fig. 10 se representa la T_c Vs x , se evidencia que al variar los parámetros x e y del sistema $\text{La}_{1.5-x}\text{Ba}_{1.5+x-y}\text{Ca}_y\text{Cu}_3\text{O}_z$ se presenta un cambio en la temperatura crítica; comparando [1,8,10], con los resultados obtenidos se ve claramente como la T_c crece con el incremento de x e y .

4. Conclusiones

El método de reacción de estado sólido permitió producir las muestras del sistema $\text{La}_{1.5-x}\text{Ba}_{1.5+x-y}\text{Ca}_y\text{Cu}_3\text{O}_z$ demostrando que efectivamente todas las muestras sinterizadas poseen la estructura cristalina esperada.

Los análisis de Microscopía electrónica de barrido permitieron ver una representación típica de las características morfológicas de materiales superconductores. Estableciendo que la fase superconductora se conformó de una manera similar en cada muestra. Igualmente se corroboró que no hay presencia de impurezas en las mismas y que estas muestras cumplen con la estequiometría. La técnica EDX permitió establecer el porcentaje de los elementos químicos en cada muestra, esta nos mostró una aproximación de las estequiometrías de las muestras y ver su coherencia.

El refinamiento Rietveld de las medidas de Difracción de rayos X, así como las de microscopía electrónica de barrido permitieron inferir de manera indudable que las muestras producidas del sistema $\text{La}_{1.5-x}\text{Ba}_{1.5+x-y}\text{Ca}_y\text{Cu}_3\text{O}_z$ son efectivamente de fase pura. Corroborando que todas las muestras corresponden a una estructura tetragonal con grupo espacial $P4/mmm$. Los resultados permitieron establecer que los sistemas de $\text{La}_{1.5-x}\text{Ba}_{1.5+x-y}\text{Ca}_y\text{Cu}_3\text{O}_z$, se ajustan a los parámetros estructurales, corroborando su alta anisotropía.

Se observa que al variar los parámetros x e y del sistema $\text{La}_{1.5-x}\text{Ba}_{1.5+x-y}\text{Ca}_y\text{Cu}_3\text{O}_z$ la temperatura crítica cambia; se presenta una disminución de la temperatura crítica a medida que los parámetros x e y disminuyen.

Referencias

- [1] Skakle, J.M.S. and West, A.R., Physica C, 227, pp. 336-342, 1994. DOI: 10.1016/0921-4534(94)90090-6
- [2] Skakle, J.M.S. and West, A.R., Physica C, 220, pp.187-194, 1994. DOI: 10.1016/0921-4534(94)90900-8
- [3] Boudali, A., et al., First - principles study of structural, elastic, electronic, and thermal properties of SrTiO_3 perovskite cubic. Physics Letters A, 373(8-9), pp. 879-884, 2009. DOI: 10.1016/j.physleta.2008.12.017
- [4] Goldschmidt V.M., Lunde, B.T. and Zacharias, G., en W.H., Geochemical distribution law of the elements, ed. S.N.V. Akad. Vol. 1, 1926, 117 P.
- [5] Sholtz, J.J., Von Einige, E.N., Wijngaarden, R.J., Griessen, R. and Leeuw, D.M., Pressure dependence of T_c and H_{c2} of $\text{CaLaBaCu}_3\text{O}_7$ up to 50 GPa Physica C, 198(3), pp. 231-236, 1996. DOI: 10.1016/0921-4534(92)90196-J

- [6] Schilling, A., Cantoni, M., Guo, J.D. and Ott, H.R., Superconductivity above 130 K in the Hg–Ba–Ca–Cu–O system. *Nature*, 363, pp. 56-58(1993). DOI: 10.1038/363056a0
- [7] Dong, C., Liang, J.K., Che, G.C., Xie, S.S., Zhao, Z.X., Yang, Q.S. Ni Y.M. and Liu, G.R., Superconductivity and crystal structure in the La-Ba-Cu-O system. *Phys. Rev. B*. 37(10), pp. 5182-5185, 1988. DOI: 10.1103/PhysRevB.37.5182
- [8] Supelano, I., Sarmiento-Santos, A., Parra-Vargas, C., Landínez, D. y Roa, J., Síntesis y propiedades estructurales del sistema superconductor $\text{La}_{1.5+x}\text{Ba}_{1.5-x}\text{Ca}_y\text{Cu}_3\text{O}_z$. *Ciencia en Desarrollo* 4(2), pp. 27-32, 2013. DOI: 10.19053/01217488.2632
- [9] Wada, T., Suzuki, N., Maeda, A., Yabe, T., Uchinokura, K., Uchida, S. and Tanaka, S., Preparation and properties of superconducting $\text{La}_{1+x}\text{Ba}_{2-x}\text{Cu}_3\text{O}_y$ ($0 \leq x \leq 0.5$) ceramics sintered in N_2 gas atmosphere. *Phys. Rev. B* 39(13), pp. 9126-9138, 1989. DOI: 10.1103/PhysRevB.39.9126
- [10] Parra-Vargas, C.A. Pimentel Jr., J.L., Pureur, P., Landínez-Téllez, D.A. and Roa-Rojas, J., Behavior of the irreversibility line in the new superconductor $\text{La}_{1.5+x}\text{Ba}_{1.5-x-y}\text{Ca}_y\text{Cu}_3\text{O}_z$, *Physica B*, 407, pp 3128-3130, 2012. DOI: 10.1016/j.physb.2011.12.043

C.C. Canaria-Camargo, completó su pregrado en Física Pura en el 2012 en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia; Tunja, Colombia, actualmente es estudiante tesista de la maestría en Ciencias Física de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Se desempeña desde el 2013 como docente en la Universidad de Boyacá, Colombia y como Joven Investigador para los grupos GFM y GSEC de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
ORCID: 0000-0001-6347-4674

A. Sarmiento-Santos, realizó sus estudios de Pregrado y Maestría en Física en la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia y de Doctorado en Ciencia e Ingeniería de Materiales en la Universidad Federal de Santa Catarina, Brasil. Desde el 2008 es profesor de la Escuela de Física de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia donde también es Coordinador del Grupo de Superficies Electroquímica y Corrosión - GSEC, donde realiza sus trabajos en el campo de la Ciencia de Materiales.
ORCID: 0000-0003-3382-0104

C.A. Parra-Vargas, terminó sus estudios de Pregrado en Licenciatura en Ciencias de la Educación en Física y Matemática en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, su Maestría y Doctorado en Ciencias Física en la Universidad Nacional de Colombia. Desde 1997 es profesor de la Escuela de Física de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia donde también es Coordinador del Grupo de Física de Materiales - GFM, donde realiza sus trabajos en el campo de la Ciencia de Materiales.

ORCID: 0000-0001-8582-3337



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería
Química e Ingeniería de Petróleos

Oferta de Posgrados

Maestría en Ingeniería - Ingeniería Química
Maestría en Ingeniería - Ingeniería de Petróleos
Doctorado en Ingeniería - Sistemas Energéticos

Mayor información:

E-mail: qcaypet_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 5317

Procedure to energetic analysis of centrifugal pumping systems

Manoel Socorro Santos-Azevedo^a Carlos A. de León-Benítez^b Jandecy Cabral-Leite^a & Ignacio Pérez-Abril^b

^a Instituto de Tecnología Galileo del Amazonas, Manaus, Brasil. manoelazevedo@yahoo.com.br, jandecycabral@hotmail.com.

^b Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Cuba. charle@uclv.edu.cu, iperez@uclv.edu.cu

Received: February 29th, de 2016. Received in revised form: August 8th, 2016. Accepted: September 29th, 2016

Abstract

The renewed interest in the efficient use of energy, has made the use of speed control by frequency variation for flow control in pumping systems, has now become the most attractive option for this purpose, the which makes it necessary to obtain as accurately as possible energy saving in comparison with other mechanical means used for this purpose. This paper presents a mathematical procedure that reduces the limitations of application of laws affinity on systems with high initial static load for calculation of potential savings when employed these drives is developed.

Keywords: Affinity law, centrifugal pumps, energy saving.

Procedimiento para el análisis energético de sistemas de bombeo centrífugos

Resumen

El renovado interés por el uso eficiente de la energía, ha hecho que el empleo del control de velocidad por variación de frecuencia para la regulación del flujo en sistemas de bombeo, se haya convertido en la actualidad en la opción más atractiva con este fin, lo cual hace que sea preciso obtener con la mayor precisión posible el ahorro de energía en comparación con otros medios mecánicos utilizados con este objetivo. En este trabajo se desarrolla un procedimiento matemático que permite reducir las limitaciones de aplicación de las leyes de afinidad en sistemas con elevada carga estática inicial, para el cálculo de los potenciales de ahorro cuando son empleados estos accionamientos.

Palabras clave: Leyes de afinidad, bombas centrifugas, ahorro de energía.

1. Introducción

Hoy en día, aproximadamente 22% de la energía suministrada a los motores eléctricos es consumida por los sistemas de bombeo [1-3]. Debido al renovado interés en el ahorro de energía, el empleo de accionamientos eléctricos de frecuencia variable (AEFV), se ha convertido en la mejor opción para su empleo en tales sistemas lo que se traduce en un importante ahorro energético en comparación con medios mecánicos para ajustar el flujo en dichos sistemas [3-5] Hay un gran número de tipos de bombas que se utilizan en aplicaciones industriales, las más difundidas son las bombas centrífugas

La aplicación de las leyes de afinidad en bombas

centrífugas debe hacerse con cautela [6]. Generalmente, pueden ser aplicadas cuando el sistema de bombeo tiene una alta carga de fricción en comparación con la carga estática. Esto es debido a que las leyes de afinidad son más precisas cuando se aplican entre las curvas de rendimiento que están a una misma eficiencia de la bomba [1] Las leyes de afinidad consideran que la disminución de la velocidad no afecta la eficiencia de la bomba. Esta aproximación puede ser considerada como válida hasta una reducción de velocidad igual a 0.7 veces la velocidad nominal [7] Sin embargo la eficiencia en el nuevo punto de operación debe ser chequeada en todos los casos, especialmente en sistemas con alta carga estática [8-10]. No tener en cuenta; lo anteriormente planteado introduce una incertidumbre en los cálculos de los

How to cite: Santos-Azevedo, M. S., de León-Benítez, C. A., Cabral-Leite, J. & Pérez-Abril, I. Procedimiento para el análisis energético de sistemas de bombeo centrífugos DYNA 83 (199) pp. 114-117, 2016

potenciales de ahorro de energía en las diferentes variantes de control de flujo en los sistemas de bombeo. El procedimiento desarrollado en este trabajo permite disminuir la incertidumbre en el cálculo de los potenciales de ahorro de energía cuando se analiza la factibilidad de empleo de los variadores de velocidad en estas aplicaciones.

2. Materiales y métodos

2.1. Leyes de afinidad

Las leyes de afinidad gobiernan las relaciones entre velocidad, presión de descarga y potencia de entrada de la bomba y permiten predecir el rendimiento de una bomba a una velocidad que no sea la característica.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left[\frac{N_1}{N_2} \right]^2 \quad (2)$$

$$\frac{BHP_1}{BHP_2} = \left[\frac{N_1}{N_2} \right]^3 \quad (3)$$

Donde:

Q: Flujo volumétrico (m³/hr.)

N: Velocidad de la bomba (rpm)

H: Carga de la bomba (m).

BHP: Potencia de entrada en la bomba (kW)

El subíndice 1 indica la condición inicial de operación y el subíndice 2 la condición final.

Ron Carson [10], recomienda en entonces utilizar una curva de afinidad que intercepte el sistema en la condición final, lo cual es la base para el desarrollo del procedimiento analítico desarrollado en este artículo.

2.2. Curva característica del sistema hidráulico

El sistema se caracteriza por un modelo bajo la condición de régimen permanente y turbulento de la forma [3].

$$H_{sist} = H_{est} + K_t \cdot Q^2 \quad (4)$$

Donde:

H_{sist}: Carga del sistema (m).

H_{est}: Carga estática del sistema (m)

K_t: Coeficiente de resistividad de la tubería (s²/m⁵)

En este procedimiento, basado en la propuesta realizada por Carson [10], se definen como curvas de enlace, aquellas, que sin carga estática, contienen los puntos de operación del sistema de bombeo en condición inicial y final. Por tanto de la ecuación (4) para condiciones de régimen turbulento, para el valor de flujo requerido (Q_{req}) se obtiene la carga requerida (H_{req}) en dicho punto y se cumple que:

$$H_{req} = H_{est} + K_t \cdot Q_{req}^2 \quad (5)$$

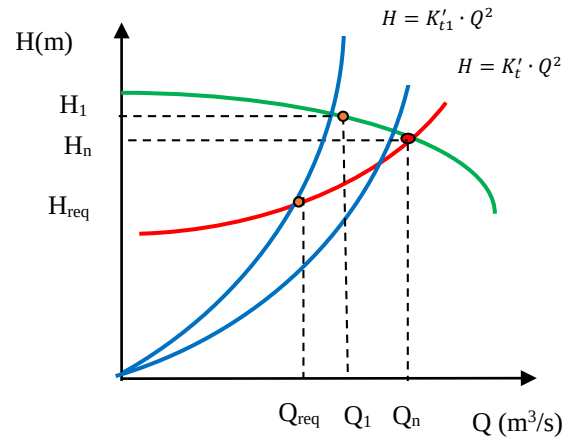


Figura 1. Curvas de enlace.
Fuente: Autor.

Para la curva de enlace (Fig.2):

$$H_n = K'_t \cdot Q_n^2 \quad (6)$$

Siendo K'_t la constante ficticia de la tubería representada por la curva de enlace.

En condiciones nominales de operación, el valor de flujo es el correspondiente al valor nominal (Q_n), igualando ambas expresiones (Ec.4 y Ec.6) despejando el valor de K'_t, para la curva de enlace:

$$k'_t = \frac{H_{est}}{Q_n^2} + K_t \quad (7)$$

De la misma forma para una nueva condición de flujo requerido por el sistema (Q_{req}), se cumple para la curva de enlace:

$$k'_{t1} = \frac{H_{est}}{Q_{req}^2} + K_t \quad (8)$$

En la curva de enlace (Fig. 1), partiendo del origen de coordenadas, estará contenido el punto que se corresponde con el valor deseado de flujo y carga (Q_{req}, H_{req}) y la misma se intercepta con la ecuación característica de la bomba en el punto (Q₁, H₁) donde se cumple:

$$\left(\frac{H_{est}}{Q_{req}^2} + k_t \right) Q_1^2 = a + bQ_1 - cQ_1^2 \quad (9)$$

Cuando un sistema de bombeo es estrangulado con el objetivo de reducir los requerimientos de flujo del proceso, la carga del motor eléctrico que acciona la bomba cambia y consecuentemente ocurren cambios en su velocidad de rotación. Sus parámetros de comportamiento deben ser reajustados a fin de realizar un cálculo más exacto de la potencia eléctrica demandada

La potencia demandada por la bomba se expresa como:

$$P = \frac{\gamma Q H_b}{100 \cdot \eta_b \cdot \eta_t} \quad (10)$$

Donde:

P: Potencia demandada (kW)

$\eta_b \eta_t$: Eficiencias de la bomba y la transmisión.

La definición de las curvas de enlace permitirá mediante el cálculo iterativo la determinación de los cambios de carga y velocidad que ocurren en la bomba centrífuga cuando el sistema es estrangulado mediante válvulas para obtener el flujo requerido por el proceso y cuando es empleado un variador de frecuencia con este fin.

2.3. Ejemplo de aplicación

El procedimiento ha sido aplicado en un sistema de bombeo de guarapo del CAI Hermanos Almejeiras de Villaclara. El sistema está conformado por tres bombas de idénticas características. Los datos nominales de dichas bombas son:

Flujo Nominal (Q_n) – 0.058 m³/s.

Carga Nominal (H_n) – 52m

Eficiencia Nominal (η_b) – 88%

Velocidad Nominal (N) – 1775 rpm.

Datos del motor eléctrico.

Potencia Nominal (P_n) – 60hp

Voltaje Nominal (V_n) – 460V

Corriente Nominal (I_n) – 72A

Eficiencia Nominal (η_n) – 91.6%

Velocidad Nominal – 1775 rpm.

Factor de Potencia Nominal ($\cos\theta_n$) – 89%

Mmax/Mnom – 2.26

Los datos de flujo y carga para la obtención de la ecuación característica de la bomba:

Utilizando la función “polyfit” del Matlab 5.3 para el ajuste de curvas, basada en el método de los mínimos cuadrados se obtiene, el polinomio de la ecuación característica de la bomba:

$$H_b = 5392.2Q^2 - 24.5Q + 73.5 \quad (11)$$

El cálculo del sistema de tuberías consiste en hallar el valor la función $H=f(Q)$ que caracteriza al mismo, para lo cual es necesario determinar el valor de la constante K_t (ecuación .1) que depende del estado en que se opera el sistema hidráulico. El valor del flujo estará en función de los requerimientos del proceso tecnológico y este puede ser obtenido estrangulando el sistema o variando la velocidad del motor manteniendo el sistema a válvula abierta. Para el sistema analizado, partiendo de la información de los especialistas como resultado del cálculo del sistema de tuberías, se tiene que:

$$H_{sist} = 10 + 12343 \cdot Q^2 \quad (12)$$

La potencia demandada por la bomba en condiciones nominales de operación se obtiene aplicando la Ec.10

Tabla 1

Datos de la bomba.

Q_b [m ³ /s]	0	0.033	0.041	0.05	0.058
H_b [m]	75	67	65	60	52

Fuente: Información del fabricante

$$P = \frac{\gamma Q H_b}{100 \cdot \eta_b \eta_t} = \frac{1164.0.058.52}{100.0.88} = 39.8 \text{ kW}$$

Para calcular el flujo requerido por el proceso se realiza un balance de masa a partir del plan de molienda, de los por cientos de fibra en la caña, el bagazo y la cantidad de agua suministrada. En esta aplicación el flujo de jugo mezclado requerido para una capacidad de molienda del 90% es de 0.048 m³/s con un factor de seguridad del 15%. Para este valor de flujo requerido, la carga requerida es de 59.9 m y la eficiencia de la bomba para esta condición es 85.88%.

La aplicación de las leyes de afinidad para esta nueva condición de requerimiento de flujo del sistema daría como resultado

$$H_2 = H_1 \cdot \left[\frac{Q_2}{Q_1} \right]^2 = 52 \cdot \left[\frac{0.048}{0.058} \right]^2 = 35,6 \text{ m}$$

$$BHP_2 = BHP_1 \cdot \left[\frac{Q_2}{Q_1} \right]^3 = 39,8 \cdot \left[\frac{0.048}{0.058} \right]^3 = 22,5 \text{ kW}$$

El punto de operación para un flujo de 0,048 m³/s y una carga de 35,6 m no intercepta la curva del sistema y se encuentra distante del valor de la carga de la bomba en el intervalo de operación de la misma lo que demuestra que el valor de potencia obtenido es incorrecto y consecuentemente el cálculo del ahorro de energía obtenido la utilizar un AEFV no es el real.

A partir de la ecuación (4) se determina el valor de la constante para la curva de enlace en condiciones nominales K'_t .

$$K'_t = \frac{10}{(0.058)^2} + 12343 = 15315 \text{ s}^2 / \text{m}^5$$

En el punto de operación en condiciones de velocidad variable (Q_{req} , H_{req}), determinar el valor de la constante de la curva enlace del sistema (k'_{t1} Fig.1) aplicando la ecuación (8).

$$k'_{t1} = \frac{10}{(0.048)^2} + 12343 = 16683 \text{ s}^2 / \text{m}^5$$

Determinar el valor de Q_1 aplicando la ecuación (9)

$$Q_1 = \frac{24.51 + \sqrt{601.2 + 4(16683 + 5392)73.52}}{2(16683 + 5392)} = 0.0572 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Para esta condición evaluando en la ecuación característica de la bomba ec. (11) se obtiene que el valor de la carga es 92.5 m.

A partir del valor de velocidad nominal, por las relaciones de flujo capacidad entre el punto (Q_1, H_1) y (Q_{req}, H_{req}), aplicando la leyes de afinidad a través de las curvas de enlace son determinados los valores de velocidad y carga requeridos para la nueva condición de operación:

$$\eta_l^1 = \frac{0.048}{0.0572} \cdot 1775 = 1490 \text{ rpm}$$

Para esta nueva condición el valor de carga obtenido es de 65,2 m el cual está dentro del rango de operación de la bomba.

La potencia demandada por la bomba en esta nueva condición es de 24,4 kW. Nótese como la diferencia de la potencia demandada por la bomba sería de 2,1 kW, lo cual implicaría que se estarían sobrestimando los niveles de ahorro de energía ya que en un tiempo promedio de 16 horas diarias durante los 140 días de zafra azucarera del año representarían 12,2 MW.h anuales.

3. Conclusiones

El procedimiento analítico desarrollado permite disminuir en gran medida la incertidumbre en el cálculo del ahorro de energía que se deriva de la aplicación de (EVFD) en el control del flujo en los sistemas centrífugos de bombeo, con una justificada adecuación de las leyes de afinidad a sistemas con alta carga estática. Se demuestra como una inadecuada aplicación de las mismas puede traer consigo cálculos erróneos que pueden propiciar una incorrecta valoración económica en los estudios de factibilidad para la introducción de este equipamiento altamente costoso en las actividades industriales y los servicios.

Referencias

- [1] Almeida, A.T., Fonseca, P., Falkner, H. and Bertoldi, P., Market transformation of energy-efficient technologies in the EU. *Energy Policy*, 31, pp. 563-575. 2003. DOI: 10.1016/S0301-4215(02)00100-3.
- [2] Jagtap, S.P. and Pawar, A.N., Energy efficiency evaluation in pumping system. *Modern Mechanical Engineering*, 3(4), pp. 171-180, 2013
- [3] Vodovozov, V., Gevorkov, L. and Raud, Z., Modeling and analysis of pumping motor drives in hardware-in-the-loop environment. *Journal of Power and Energy Engineering*, 2(10), pp. 19-27, 2014. DOI: 10.4236/jpee.2014.210003.
- [4] Coelho, B. and Andrade-Campos, A., Efficiency achievement in water supply systems—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, pp. 59-84, 2014
- [5] Su, C.L., Chung, W.L. and Yu, K.T., An energy-savings evaluation method for variable-frequency-drive applications on ship central cooling systems. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 50(2), pp. 1286-1294. 2014.
- [6] Jones, W.V., Motor selection for centrifugal pump applications made easy. In *Pulp and Paper Industry Technical Conference (PPIC), Conference Record of 2011 Annual IEEE*, pp. 140-150, 2011.
- [7] Ahonen, T., Tamminen, J., Ahola, J. and Kestilä, J., Frequency-converter-based hybrid estimation method for the centrifugal pump operational state. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59, pp. 4803-4809, 2012. DOI: 10.1109/TIE.2011.2176692
- [8] Finnemore, J.E. and Franzini, J.B., *Fluid Mechanics*. McGraw-Hill, 2002.
- [9] Messina, J.P., *Pump Handbook*. Vol. 3. New York: McGraw-Hill, 1986.
- [10] Carlson, R., The correct method of calculating energy savings to justify adjustable-frequency drives on pumps. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 36(6), pp. 1725-1733, 2000.
- [11] Crane, *Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías*. McGraw-Hill, 1987.

M.S. Santos-Azevedo, es graduado en Matemática en 1985, en Procesamiento de Datos en 1999, ambos de la Universidad Federal de Amazonas, Brasil y MSc. Ingeniería Eléctrica en 2006, de la Universidad Federal de Campina Grande, Brasil. Es profesor asistente de la Universidad del Estado de Amazonas (UEA), Brasil. Tiene experiencia en el área de Sistemas Computacionales con énfasis en Modelos Analíticos y simulación de sistemas. Es coordinador de proyectos en ITEGAM. Doctorado en Ing. Eléctrica UFPA, 2014.
ORCID 0000-0002-0611-2906

C.A. de Leon-Benitez, es Ing Eléctrico Graduado UCLV en 1983. Profesor Titular de la Facultad de Ing. Eléctrica de la UCLV. Jefe de departamento en el periodo 2008-2012. Especialista en sistemas Eléctricos Industriales, Maquinas eléctrica y accionamientos. Colaborador del Instituto de Tecnología Galileo del Amazonas. ORCID 0000-0003-2749-1134

J.Cabral-Leite, es graduado en Matemática en 1987 de la Universidad Federal de Rondônia (UNIR), Brasil; en Ingeniería en Producciones Eléctricas, en 2006 de la Fundación Centro de Análisis Pesquisa e Innovación Tecnológica – FUCAPI, Brasil; MSc. en Ing. Industrial y en Sistemas en 2001, de la Universidad Federal de Santa Catarina (UFSC), Brasil y Dr. en Ing. Eléctrica en 2013, de la Universidad Federal de Pará (UFPA), Brasil. Es Director Presidente e investigador del Instituto de Tecnología y Educación Galileo de la Amazonía (ITEGAM), Brasil. Sus áreas de interés incluyen: calidad de la energía, análisis, diseño y optimización de sistemas eléctricos de potencia.
ORCID 0000-0002-1337-3549

I. Perez Abril, es Ing Eléctrico Graduado UCLV en 1984. Profesor Titular de la Facultad de Ing. Eléctrica de la UCLV. Actualmente Director del Centro de Estudios Electroenergéticos de la UCLV. Especialista en Sistemas Eléctricos Industriales y Calidad de la Energía Colaborador del Instituto de Tecnología Galileo del Amazonas.
ORCID 0000-0001-9547-6615



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

**Área Curricular de Ingeniería
Eléctrica e Ingeniería de Control**

Oferta de Posgrados

Maestría en Ingeniería - Ingeniería Eléctrica

Mayor información:

E-mail: ingelcontro_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 52 64

Study of surface movement of a shallow-multilayered soil under P-waves

Víctor H. Aristizábal-Tique ^{a,e}, Camilo A. Flórez-Velásquez ^b, Santiago Pérez-Echavarría ^b, Marlon Rincón-Fulla ^{c,d}, Juan L. Palacio-Bedoya ^c, Iliana M. Ramírez-Velásquez ^e & Francisco J. Vélez-Hoyos ^a

^a Facultad de Ingeniería, Universidad Cooperativa de Colombia, Medellín, Colombia. vharisti@yahoo.com, fjvelez@gmail.com

^b Facultad de Telecomunicaciones, Universidad Santo Tomás, Medellín, Colombia. camilo.florez@ustamed.edu.co, santiago.perezchavarria@gmail.com

^c Facultad de Ingeniería, Institución Universitaria Pascual Bravo, Medellín, Colombia. marlonfulla@yahoo.com, jlpalaci@gmail.com

^d Escuela de Física, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. marlonfulla@yahoo.com

^e Facultad de Ciencias Exactas y Aplicadas, Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín, Colombia. vharisti@yahoo.com, ilianaramirez@itm.edu.co

Received: November 8th, 2015. Received in revised form: September 15th, 2016. Accepted: October 3th, 2016.

Abstract

In this work it was designed and implemented an experimental setup to study the surface acceleration of a multilayered soil and the experimental measurements were contrasted with a one-dimensional theoretical model based on ray tracing. For this purpose, a soil was suited, where tiles and expanded polystyrene (EPS) slabs were buried. This soil was disturbed by a sound wave at normal incidence from a subwoofer. In experiment were obtained resonance frequencies which are according to the studied theoretical model.

Keywords: Soil exploration, surface soil movement, soil vibration, buried plates, seismic waves, elastic waves, multilayer soil.

Estudio del movimiento superficial de un suelo multi-capas poco profundo sometido a ondas P

Resumen

En este trabajo se diseñó e implementó un montaje experimental para estudiar la aceleración superficial de un suelo formado por capas y se contrastaron las mediciones experimentales con un modelo teórico unidimensional de trazado de rayos. Para tal fin se preparó un suelo donde fueron enterradas placas de poliestireno expandido (EPS: Expanded PolyStyrene) y baldosas. Dicho suelo fue perturbado por una onda acústica bajo incidencia normal proveniente de un parlante. En el experimento se obtuvieron frecuencias de resonancia que están de acuerdo con el modelo teórico estudiado.

Palabras clave: Exploración de suelo, movimiento superficial de suelo, vibración de suelo, placas enterradas, ondas sísmicas, ondas elásticas, suelo multicapas.

1. Introducción

El estudio de la propagación de ondas mecánicas en el suelo sigue siendo un tema de interés investigativo a nivel mundial y las aplicaciones de los resultados de estas investigaciones se han traducido en técnicas para la detección de discontinuidades físicas en el subsuelo (cavidades vacías o con diversos fluidos y materiales, cambios de densidad en sistemas de capas, objetos enterrados, etc.) [1], que son ampliamente utilizadas en los

sectores Metalúrgico y de Combustibles Fósiles [2,3], en Ingeniería Civil y de Construcción [4-8], en los sectores de la Arqueología y las Ciencias Forenses [9], y en el ámbito militar para el desminado [10-14].

Una de las técnicas para la prospección de subsuelos ha sido la relacionada con el registro de patrones de ondas sísmicas generadas arbitrariamente, mediante un agente perturbador como una fuente de ondas elásto-acústicas [2,5-7,9,11,12,15]. El patrón de las vibraciones medidas sobre un punto de la superficie del suelo,

How to cite: Aristizábal, V. H., Flórez, C. A., Pérez, S., Fulla, M. R., Palacio, J. L., Ramírez, I. M. & Vélez, F. J. Estudio del movimiento superficial de un suelo multi-capas poco profundo sometido a ondas P DYNA 83 (199) pp. 118-123, 2016

producidas por la dinámica de la propagación de las ondas elásticas cuando interactúan con las discontinuidades presentes en el subsuelo, puede ser predicho a partir del uso de modelos de parámetros distribuidos regido por la ecuación de onda elástica en medios homogéneos e isotrópicos o ecuación de Navier [16] así como en medios inhomogéneos y anisotrópicos [17], o por la ecuación de propagación de ondas en medios porosos de Biot [18].

Debido a la complejidad asociada a la ecuación de onda elástica y a la dificultad inherente en la descripción detallada del tensor que representa un medio de propagación real, existen muy pocas soluciones analíticas a las ecuaciones mencionadas y es necesario recurrir al empleo de métodos numéricos como los elementos finitos [19], el uso del método de la Transformada pseudo-espectral de Fourier [20,21], o los métodos de estimación de las derivadas espaciales y temporales como las diferencias finitas, entre otros [21].

Otra posible vertiente de análisis de la dinámica de la propagación de una onda sísmica en un suelo compuesto por diversas capas y discontinuidades es el empleo de la teoría de rayos como solución aproximada de la ecuación de onda elástica [22], que evidencia de una forma elemental los fenómenos presentes en la propagación de ondas sísmicas tales como la refracción, la reflexión y la interferencia como consecuencia de la estructura de capas del suelo. Si la longitud de la onda sísmica en estado estacionario es inferior a las dimensiones del sistema bajo estudio (suelo multicapa + cavidad), entonces la ecuación de onda elástica se puede aproximar asintóticamente a la ecuación de la Eikonal, cuya solución se puede estimar empleando trazado de rayos geométricos superpuestos en la región de interés. La representación de ondas por medio de rayos facilita el modelamiento físico-matemático y el entendimiento fenomenológico de la propagación, lo que a su vez permite introducir e identificar parámetros escalables y dominantes en un modelo físico de partida.

2. Configuración y modelo experimental

En este trabajo se diseñó e implementó un montaje experimental para estudiar el desplazamiento y la aceleración superficial de un suelo, el cual fue adecuado para que su comportamiento se aproxime al de un semi-espacio (ver Fig. 1). En dicho suelo se enterraron placas de diferentes materiales (baldosa y poliestireno expandido (EPS)) a profundidades dadas, tal como se muestran en las Fig. 2(a), 2(b), para luego hacer incidir de forma perpendicular una onda acústica emitida por un parlante (ver Fig. 3).

La Fig. 4 muestra el esquema del montaje experimental. Inicialmente se genera una señal eléctrica sinusoidal a través de un generador de onda, esta pasa por un amplificador de potencia de audio para alimentar directamente a un parlante, generando de esta manera, la onda acústica normal a la superficie del terreno (ver Fig. 3), donde se encuentra enterrado el objeto, bien sea la baldosa o la placa de EPS (ver Fig. 2(a), 2(b)). Las vibraciones mecánicas de la superficie son sensadas por un módulo acelerométrico triaxial desarrollado por el grupo de trabajo con base en una fuente consultada [12], el cual es alimentado por una fuente de voltaje DC variable. Las tres señales acelerométricas dadas por el dispositivo son tomadas por una tarjeta de adquisición y guardadas finalmente en un computador para ser procesadas posteriormente.



Figura 1. Terreno adecuado para la experimentación de este trabajo. En la figura se muestra la excavación de una cavidad de 3mx3m por 1m de profundidad.

Fuente: Los autores.

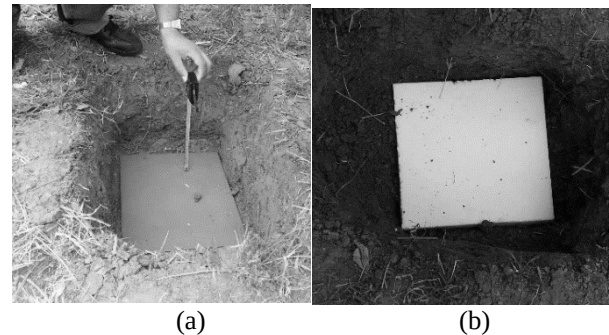


Figura 2. (a) Baldosa de 0.5 cm de espesor y (b) placa de poliestireno expandido (EPS) de 2 cm de espesor enterradas a 36 cm y 25 cm de la superficie del suelo, respectivamente.

Fuente: Los autores.



Figura 3. Perturbación acústica del suelo mediante un parlante. Las medidas de la aceleración y presión del aire en la superficie se hacen mediante un acelerómetro y un sonómetro.

Fuente: Los autores.

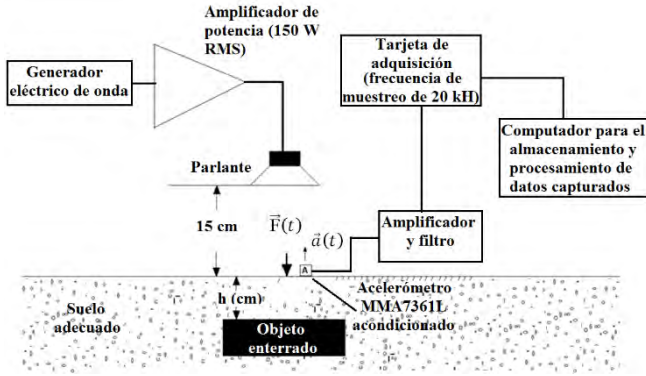


Figura 4. Esquema del montaje experimental.

Fuente: Los autores.

Nótese en la Fig. 3 el uso de un sonómetro para medir la presión acústica. Esta medida se hizo en función de la frecuencia de la señal eléctrica, lo que permite estimar la fuerza acústica sobre la superficie del suelo donde está actuando directamente el parlante, y así estimar la ganancia del sistema, o lo que es lo mismo su función de transferencia, que se define en la siguiente sección.

Los datos experimentales obtenidos bajo las condiciones descritas en esta sección son contrastados con los obtenidos mediante un modelo analítico unidimensional que se describe en la siguiente sección, el cual asume el problema como un sistema de varias capas, donde los materiales son elásticos y homogéneos, y las ondas incidentes y propagadas son planas.

3. Modelo de trazado de rayos

Inicialmente se estudia el caso de una onda P, $\vec{u}_0$, incidiendo desde el medio 0 normal a la superficie de la discontinuidad, de la cual una parte se refleja, $\vec{u}_R$, y otra se transmite, $\vec{u}_T$, al medio 1, tal como se muestra en la Fig. 5. Aquí $k_l = 2\pi/\lambda_l = \omega/c_l$ con $l = 0, 1$ es el número de onda, donde λ_l es la longitud de onda, c_l es la velocidad de propagación de la onda y ρ_l es la densidad volumétrica de masa del medio l , respectivamente. $\omega = 2\pi f$ es la frecuencia angular y f la frecuencia de la onda. R_{01} y T_{01} son llamados los coeficientes de reflexión y transmisión desde el medio 0 al 1, respectivamente. El factor $e^{i\omega t}$ se omitirá de aquí en adelante.

En el problema de la Fig. 5 se debe cumplir que los campos de desplazamientos y tracciones deben ser continuos en $y = 0$, es decir,

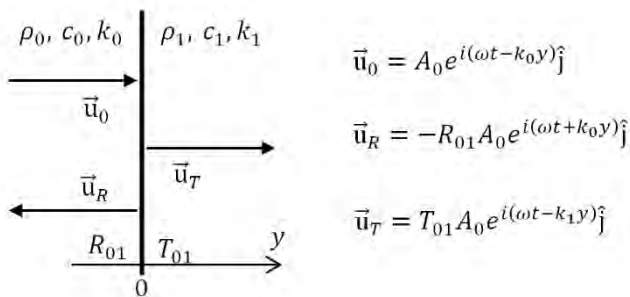


Figura 5. Diagrama del proceso de reflexión y transmisión de una onda P que incide sobre una superficie de discontinuidad entre los medios 0 y 1. Fuente: Los autores.

$$\vec{u}_0(y=0) + \vec{u}_R(y=0) = \vec{u}_T(y=0) \quad (1)$$

$$\frac{c_0^2}{\rho_1} \frac{\partial \vec{u}_0}{\partial y} \Big|_{y=0} + \frac{c_0^2}{\rho_1} \frac{\partial \vec{u}_R}{\partial y} \Big|_{y=0} = \frac{c_1^2}{\rho_0} \frac{\partial \vec{u}_T}{\partial y} \Big|_{y=0} \quad (2)$$

Al aplicar las condiciones de frontera (1) y (2) a las ecuaciones que se muestran en la Fig. 5 se obtiene que

$$R_{01} = \frac{c_1 \rho_1 - c_0 \rho_0}{c_1 \rho_1 + c_0 \rho_0} \quad (3)$$

$$T_{01} = \frac{2c_0 \rho_0}{c_1 \rho_1 + c_0 \rho_0} \quad (4)$$

Ahora se propone un modelo unidimensional para estudiar el problema descrito en la sección 2, el cual consta de 4 regiones: aire ($y \leq 0$)-suelo ($0 \leq y \leq h$)-objeto ($h \leq y \leq h+d$)-suelo ($h+d \leq y$), tal como se muestra en la Fig. 6. En la Fig. 7 se muestran los rayos (ondas P o longitudinales) que surgen en las diferentes capas al incidir normalmente una onda acústica desde el aire. Los coeficientes de reflexión y transmisión, que se muestran en la Fig. 7, están dados por:

$$R_{lk} = \frac{c_k \rho_k - c_l \rho_l}{c_k \rho_k + c_l \rho_l} \quad (5)$$

$$T_{lk} = \frac{2c_l \rho_l}{c_k \rho_k + c_l \rho_l} \quad (6)$$

donde l y k pueden tomar valores de 0, 1, 2.

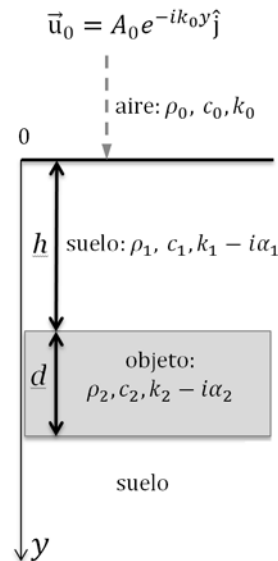


Figura 6. Diagrama del modelo unidimensional de capas propuesto para el problema descrito en la sección 2.

Fuente: Los autores.

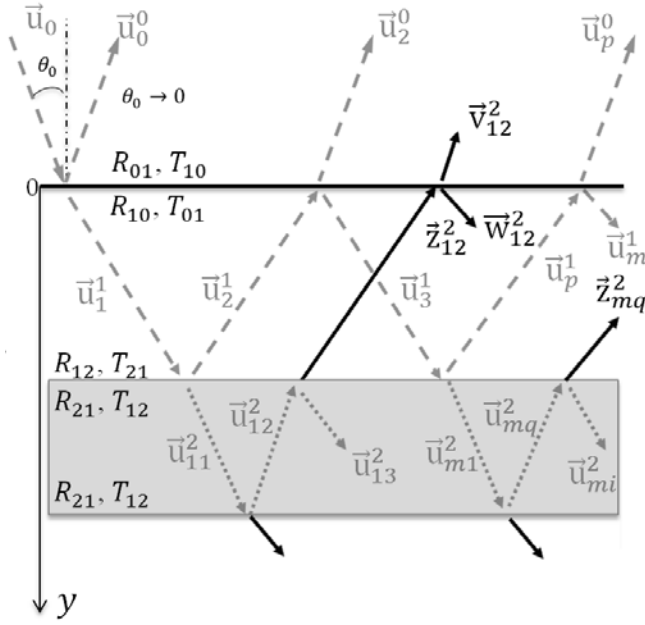


Figura 7. Diagrama de los rayos que se transmiten y reflejan en las diferentes capas.

Fuente: Los autores.

Entonces, para hallar el campo de desplazamiento en la superficie del suelo se hace el trazado de todos los rayos hasta la superficie aire-suelo para tener en cuenta las contribuciones de todas las ondas que llegan a $y = 0$ (ver Fig. 7), obteniéndose:

$$\begin{aligned} \vec{u}(y=0) = & \vec{u}_0 + \vec{u}_0^0 \\ & + \sum_{n=0}^{\infty} \left(\vec{u}_p^0 + \vec{u}_m^1 + \vec{u}_p^1 \right. \\ & \left. + \sum_{N=0}^{\infty} (\vec{z}_{mq}^2 + \vec{v}_{mq}^2 + \vec{w}_{mq}^2) \right) \end{aligned} \quad (7)$$

donde

$$\vec{u}_0 = A_0 \hat{j} \quad (8)$$

$$\vec{u}_0^0 = -R_{01} A_0 \hat{j} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \vec{u}_p^0 = & -T_{10} [R_{12} R_{10}]^{\left(\frac{p}{2}-1\right)} R_{12} T_{01} A_0 e^{-\alpha_1 p h} e^{-i k_1 p h \hat{j}} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \vec{u}_m^1 = & [R_{12} R_{10}]^{\left(\frac{m-1}{2}\right)} T_{01} A_0 e^{-\alpha_1 (m-1) h} e^{-i k_1 (m-1) h \hat{j}} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \vec{u}_p^1 = & -[R_{12} R_{10}]^{\left(\frac{p}{2}-1\right)} R_{12} T_{01} A_0 e^{-\alpha_1 p h} e^{-i k_1 p h \hat{j}} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\vec{z}_{mq}^2 = -u_{mq}^2(y=h) T_{21} e^{-\alpha_1 h} e^{-i k_1 h \hat{j}} \quad (13)$$

$$\vec{v}_{mq}^2 = -u_{mq}^2(y=h) T_{21} T_{10} e^{-\alpha_1 h} e^{-i k_1 h \hat{j}} \quad (14)$$

$$\vec{w}_{mq}^2 = u_{mq}^2(y=h) T_{21} R_{10} e^{-\alpha_1 h} e^{-i k_1 h \hat{j}} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} u_{mq}^2(y=h) = & [R_{21}]^{(q-1)} T_{12} [R_{12} R_{10}]^{\left(\frac{m-1}{2}\right)} T_{01} A_0 \\ & \times e^{-(\alpha_1 m h + \alpha_2 q d)} e^{-i(k_1 m h + k_2 q d)} \end{aligned} \quad (16)$$

con $m = 2n + 1$, $p = 2(n + 1)$ y $q = 2(N + 1)$ siendo $n, N = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$; donde α_1 y α_2 son los factores de atenuación de las ondas en los medios 1 y 2, respectivamente.

Calculando la aceleración en la superficie para un campo armónico en el tiempo se obtiene:

$$\begin{aligned} \vec{a}(y=0) = & \left. \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \right|_{y=0} = -\omega^2 \vec{u}(y=0) \\ = & -4\pi^2 f^2 \vec{u}(y=0) \end{aligned} \quad (17)$$

y la fuerza aplicada por el parlante sobre la superficie del suelo:

$$\begin{aligned} \vec{F}(y=0) = & \sigma_{yy}(y=0) A_{subw} \hat{j} \\ = & c_0^2 \rho_0 A_{subw} \left. \frac{\partial \vec{u}_0}{\partial y} \right|_{y=0} \hat{j} \\ = & -2i\pi A_0 f c_0 \rho_0 A_{subw} \hat{j} \end{aligned} \quad (18)$$

donde σ_{yy} es la tensión principal en y sobre la superficie, la cual coincide con la presión acústica emitida por el subwoofer. $A_{subw} = \pi R_{subw}^2$ es el área donde actúa la onda acústica sobre la superficie, la cual es aproximadamente igual al área del subwoofer debido a que este está cerca al suelo (ver Fig. 3), siendo R_{subw} el radio del subwoofer.

Finalmente, se define la ganancia (o función de transferencia) del sistema como

$$G = \left. \frac{\text{mag}[a]}{\text{mag}[F]} \right|_{y=0} = \frac{2\pi f \text{mag}[u(y=0)]}{A_0 c_0 \rho_0 A_{subw}} \quad (19)$$

4. Resultados y discusión

Para el modelo se tomaron los parámetros de las Tablas 1 y 2, los cuales se remplazaron en la expresión (19). Los coeficientes de atenuación, α_1 y α_2 , se tomaron cero debido a que la posición de los picos de resonancia no cambiaban con ellos, solo sufrían una leve atenuación para los valores de h y d usados. De otro lado, en el modelo teórico se encontró que la posición de los picos de resonancia cambia ante la diferencia de densidad entre el material enterrado y el suelo. Así, la posición de estos picos es altamente sensible al valor de la velocidad de propagación de la onda longitudinal en el suelo (en la primera capa) y a la profundidad h del objeto enterrado. En el modelo se fijaron las profundidades dado que se midieron directamente en campo y se probaron diversos valores de c_1 obteniendo gran cercanía con los datos experimentales cuando $c_1 = 60$ m/s, tal como se muestra en la Fig. 8.

Tabla 1.

Parámetros del aire, suelo y parlante usados en el modelo teórico.

Parámetro	Valor
$A_0[m]$	1
$\rho_0[kg/m^3]$	1
$c_0[m/s]$	343
$\rho_1[kg/m^3]$	1300
$c_1[m/s]$	60
$R_{subw}[m]$	0.195

Fuente: Los autores

Tabla 2.

Parámetros de la baldosa y placa de EPS usados en el modelo teórico.

Parámetro	Valor para baldosa	Valor para EPS
$\rho_2[kg/m^3]$	2000	12
$c_2[m/s]$	1300	400
$h[m]$	0.36	0.25
$d[m]$	0.005	0.02

Fuente: Los autores

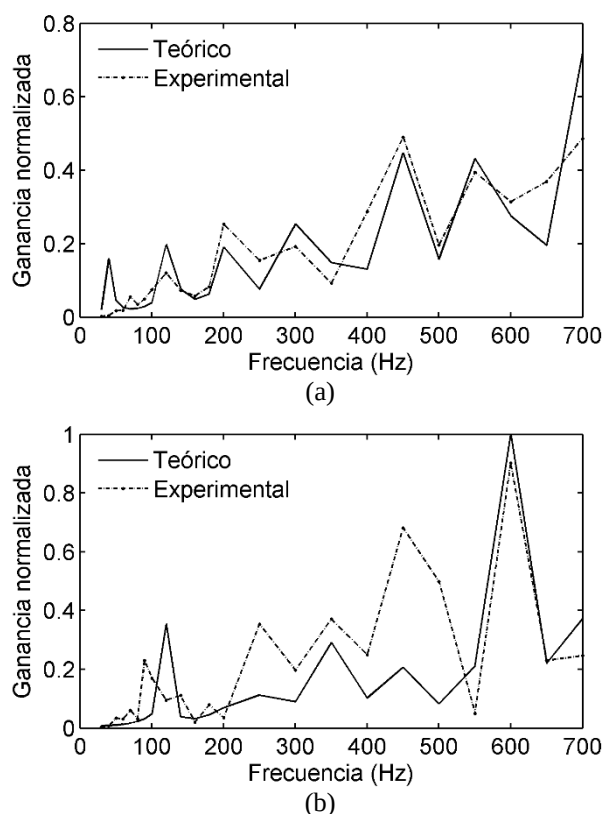


Figura 8. Ganancia normalizada VS Frecuencia para la (a) baldosa y (b) la placa de EPS, donde el modelo teórico fue evaluado en las frecuencias experimentales.

Fuente: Los autores.

5. Conclusiones

En este trabajo se diseñó e implementó un montaje experimental con un alto comportamiento unidimensional para la determinación de discontinuidades en el suelo, donde la reflexión, refracción e interferencia de las ondas elasto-acústicas son los efectos dominantes. Dichos efectos son

generados por la discontinuidad suelo-objeto y los cambios de fase que se producen por la profundidad de las discontinuidades, los cambios de densidad y de velocidad de propagación de las ondas en los diferentes medios. El modelo teórico basado en trazado de rayos permitió un mejor entendimiento físico y la identificación de los parámetros dominantes del problema, y por medio del manejo de dichos parámetros fue posible reproducir gran parte de los resultados experimentales.

Agradecimientos

V.H. Aristizabal and F.J. Velez agradecen el apoyo financiero de la Universidad Cooperativa de Colombia mediante el proyecto con código O44-1044. C.A. Flórez and S. Pérez agradecen el apoyo financiero de la Universidad Santo Tomás. M.R. Fulla and J.L. Palacio agradecen el apoyo financiero de la Institución Universitaria Pascual Bravo mediante el proyecto con código IN201403.

Referencias

- [1] Srdanovic, V., Aristizabal, V.H., Fulla, M.R. and Florez, C.A., Ondas sísmicas y sensores inalámbricos: herramientas potenciales para la prospección de subsuelos a baja profundidad. *Cintex*, 17, pp. 80-95, 2012.
- [2] Shu, S., Xiong, J., Ma, C. and Tang, Y., A small-scale wireless transmission network attached to largescale seismic acquisition and recording system. *International Conference on Automatic Control and Artificial Intelligence (ACAI 2012)*, pp. 292-295, 2012. DOI: /10.1049/cp.2012.0976
- [3] Savazzi, S., Spagnolini, U., Goratti, L., Molteni, D., Latva-Aho, M. and Nicoli, M., Ultra-wide band sensor networks in oil and gas explorations. *IEEE Communication Magazine*, 51(4), pp. 150-160, 2013. DOI: 10.1109/MCOM.2013.6495774
- [4] Otálvaro, I. and Nanclares, F., Seismic site response evaluation for the Medellín aragón area. *DYNA*, 75(156), pp. 147-155, 2008.
- [5] Ryden, N. and Mooney, M.A., Analysis of surface waves from the light weight deflectometer. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(7), pp. 1134-1142, 2009. DOI: 10.1016/j.soildyn.2009.01.002
- [6] Sun, J. and Wen, J., Target location method for pipeline pre-warning system based on HHT and time difference of arrival. *Measurement*, 46 (8), pp. 2716-2725, 2013. DOI: 10.1016/j.measurement.2013.04.059
- [7] Muggleton, J.M., Brennan, M.J. and Rogers, C.D.F., Point vibration measurements for the detection of shallow-buried objects. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 39, pp. 27-33, 2014. DOI: 10.1016/j.tust.2012.02.006
- [8] Muggleton, J.M. and Papandreou, B., A shear wave ground surface vibration technique for the detection of buried pipes. *Journal of Applied Geophysics*, 106, pp. 164-172, 2014. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2014.04.021
- [9] García-García, A., Levey, M.D. and Watson, E.B., High resolution seismic study of the Holocene infill of the Elkhorn Slough, central California. *Continental Shelf Research*, 55, pp. 108-118, 2013. DOI: 10.1016/j.csr.2013.01.012
- [10] Xiang, N. and Sabatier, J.M., An experimental study on antipersonnel landmine detection using acoustic-to-seismic coupling. *Journal of the Acoustical Society of America*, 113(3), pp. 1333-1341, 2003. DOI: 10.1121/1.1543554
- [11] Scott, W.R., Martin, J.S. and Larson, G.D., Experimental model for a seismic landmine detection system. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 39(6), pp. 1155-1164, 2001. DOI: 10.1109/36.927432
- [12] Bulletti, A., Valentini, S., Cioria, F., Borgioli, G., Calzolari, M., Capineri, L. and Masotti, L., Silicon micromachined accelerometers for the detection of compliant anti-personnel landmines. *Proceedings*

- of the seventh IEEE Sensors conference (IEEE Sensors 2008), pp. 1159-1162, 2008. DOI: 10.1109/ICSENS.2008.4716647
- [13] Cardona, L., Jiménez, J. and Vanegas, N., Landmine detection technologies to face the demining problem in antioquia. DYNA, 81 (183), pp. 115-125, 2014. DOI: 10.15446/dyna.v81n183.37441
 - [14] Cardona, L., Jiménez, J. and Vanegas, N., Nuclear quadrupole resonance for explosive detection. Ingeniare, Revista Chilena de Ingeniería, 23(3), pp. 458-472, 2015.
 - [15] Albert, D.G., Taherzadeh, S., Attenborough, K., Boulanger, P. and Decato, S.N., Ground vibrations produced by surface and near-surface explosions. Applied Acoustics, 74(11), pp. 1279-1296, 2013. DOI: 10.1016/j.apacoust.2013.03.006
 - [16] Middleton, G.V.G. and Wilcock, P.R., Mechanics in the Earth and Environmental Sciences. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
 - [17] Aki, K. and Richards, P.G., Quantitative seismology. Sausalito: University Science Books, 2002.
 - [18] Biot, M.A., General theory of three-dimensional consolidation. Journal of Applied of Physics, 12(2), pp. 155-164, 1941. DOI: 10.1063/1.1712886
 - [19] McCowan, D.W., Dynamic finite element analysis with applications to seismological problems. PhD. Thesis, Pennsylvania State University, USA, 1975.
 - [20] Buttkus, B., Spectral analysis and filter theory in applied geophysics. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2000.
 - [21] Moczo, P., Kristek, J. and Gális, M., The finite-difference modelling of earthquake motions: Waves and ruptures. United Kingdom: Cambridge University Press, 2014.
 - [22] Piedrahita-Escobar, C.C., Algunos problemas provenientes de la teoría de rayos aplicada a las ecuaciones de onda sísmica. Revista de Ingeniería de la Universidad Distrital Jose Francisco de Caldas, 18(2), pp. 97-113, 2013.

V.H. Aristizábal-Tique, obtuvo su grado en Ingeniería Física de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín (2004) y una Maestría en Ciencias-Física (2008) de la misma universidad. Actualmente es candidato a Doctor en Ingeniería de la Universidad EAFIT. Es profesor-investigador de tiempo completo y miembro del grupo de investigación TERMOMECA de la Universidad Cooperativa de Colombia. Áreas de trabajo: Simulación electromagnética analítica y computacional, Modelado y simulación de ondas sísmicas, Redes de comunicaciones y de sensores de fibra óptica, Monitoreo y simulación estructural.

ORCID: 0000-0002-7880-58839

C.A. Flórez-Velásquez, es Ing. Electricista de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Actualmente se desempeña como profesor-investigador y líder del grupo de investigación METELLIUM de la Facultad de Ingeniería de Telecomunicaciones de la Universidad Santo Tomás Sede Medellín, en las áreas de procesamiento digital de señales y radiocomunicaciones. Actualmente hace parte del grupo de investigación interinstitucional conformado por los grupos METELLIUM de la USTAMED, GICEI de la IUPB y TERMOMECA de la UCC, que trabaja alrededor de la prospectiva sísmica y sus aplicaciones.

ORCID: 0000-0002-6357-9449

S. Pérez-Echavarría, es Ing. en Telecomunicaciones de la Universidad Santo Tomás sede Medellín. Actualmente se desempeña como ingeniero de mantenimiento de radio y televisión en la red del Sistema de Medios Públicos de RTVC, Colombia. Áreas de trabajo: Instrumentación, Redes de telecomunicaciones alámbricas e inalámbricas.

ORCID: 0000-0003-2142-2563

M. Rincón-Fulla, es profesor de Física Computacional y Física-Matemática en la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, y de Algoritmos y Programación en la Institución Universitaria Pascual Bravo. Candidato a Doctor en Ciencias-Física, M.Sc. en Ciencias-Física e Ingeniero Físico de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Actualmente es el líder del grupo de investigación en ciencias electrónicas e informáticas -GICEI- de la Institución Universitaria Pascual Bravo.

ORCID: 0000-0002-7972-3636

J.L. Palacio-Bedoya, es profesor de electrónica e instrumentación en la Institución Universitaria Pascual Bravo y de Biofísica en la Universidad CES, MSc. Ciencias-Física, Inge. Físico de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín. Actualmente es investigador del Grupo de investigación en

ciencias electrónicas e informáticas -GICEI- de la Institución Universitaria Pascual Bravo.

ORCID: 0000-0003-0613-4301

I.M. Ramírez-Velásquez, es docente asociada de matemáticas y física en la Institución Universitaria Instituto Tecnológico Metropolitano -ITM- de la ciudad de Medellín, MSc. en Automatización y Control Industrial (2012). Miembro del grupo Didáctica y Modelamiento en Ciencias Exactas y Aplicadas del ITM. Los campos de trabajo: procesamiento de imágenes y señales, metrología científica, modelamiento y simulación.

ORCID: 0000-0001-9779-4019

F.J. Vélez-Hoyos, es profesor-investigador de la Universidad Cooperativa de Colombia, candidato a Doctor en Ingeniería de la Universidad EAFIT. MSc. en Ciencias-Física (2008) e Ingeniero Físico (2004) de la Universidad Nacional de Colombia. Miembro del grupo de investigación TERMOMECA de la Universidad Cooperativa de Colombia. Áreas de trabajo: Modelamiento Computacional en ciencia e Ingeniería, Física aplicada, Óptica, Ondas, Fibras Ópticas y Sensores.

ORCID: 0000-0002-4267-042X



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN

FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería
Eléctrica e Ingeniería de Control

Oferta de Posgrados

Maestría en Ingeniería - Ingeniería Eléctrica

Mayor información:

E-mail: ingelcontro_med@unal.edu.co

Teléfono: (57-4) 425 52 64

Uplift force and momenta on a slab subjected to hydraulic jump

Mauricio González-Betancourt

Investigador del convenio COLCIENCIAS- Servicio Nacional de Aprendizaje SENA y miembro del Grupo de investigación del Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, Colombia. magonzalezb@sena.edu.co; mao275@yahoo.com

Received: August 03th, 2015. Received in revised form: February 14th, 2016. Accepted: July 18th, 2016.

Abstract

As part of the search for safe and economic design criterion to line slabs of stilling basins, the present study is one of the first to calculate the center of pressure, uplift forces, and momenta from a spatiotemporal analysis of the pressures measured above and below instrumented slabs in a physical model. Controlled release of the waterstops, and variation in the dimensions of expansion joints and in the gap between foundation and the lining slab were carried out in order to consider their effects on the magnitudes of uplift forces and momenta. An offset of the center of pressure from the slab's center of gravity was identified. The objective of this work was to consider the failure mechanism induced by momentum in the slab's design. Design criterion to make the lining slab's thickness to length between 6 and 12 times the incident flow depth, is proposed, and this is compared to other design criteria.

Keywords: Uplift pressure; hydrodynamics uplift; slabs, physical model; stilling basins; hydraulic jump.

Fuerza de levantamiento y momentos en una losa sometida a salto hidráulico

Resumen

Buscando un criterio de diseño seguro y económico para las losas de los tanques de amortiguación, se calcularon fuerzas de levantamiento, centros de presión y momentos a partir de un análisis espacio-temporal de las presiones medidas encima y debajo de losas instrumentadas en un modelo físico. La liberación controlada de los sellos y la variación en las dimensiones de las juntas y de la separación entre la cimentación y la losa, fueron realizadas para considerar sus efectos sobre la fuerza de levantamiento y los momentos. Se identificó desplazamiento del centro de presión respecto al centro de gravedad de la losa. Para considerar el mecanismo de falla inducido por el momento en el diseño de losas, objetivo del trabajo, se propone un criterio de diseño para el espesor equivalente de las losas con longitudes entre 6 y 12 veces la profundidad del flujo incidente y se compara con otros criterios.

Palabras clave: Presiones de levantamiento; levantamiento hidrodinámico; losas; modelo físico; tanques de amortiguación; salto hidráulico.

1. Introduction

Outlet works conduit typically requires dissipation of excess kinetic energy to prevent downstream channel erosion as this flow often discharges at a high velocity. An energy dissipator, such as a stilling basin, is used to retard the fast moving water by creating a hydraulic jump [1]. The design of an energy dissipating structure need criteria to avoid cavitation, abrasion, internal erosion, hydrodynamic uplift, etc.

Historical reporting of the failure of slabs in flumes and

stilling basins, with an equivalent thickness ranging from 0.3 m to 4 m, has show the hydrodynamic uplift to be a structural design problem [2-5]. Equivalent thickness is the real slab thickness, and anchors are defense against uplift.

Since the early 60s, design criteria for lining slabs to calculate the uplift force and equivalent thickness have been proposed. The most recognized design criteria were based on stochastic analysis of the pressure and force fluctuations at the floor of the hydraulic jump in a physical model [6-10]. A summary of the criteria can be found in references [11-12]. They determine the uplift force taking into account the length

How to cite: González Betancourt, M. Uplift force and momenta on a slab subjected to hydraulic jump DYNA 83 (199) pp. 124-133, 2016

(L) and width (W) of the slab. Researchers agree with the criteria that the length of the slab in direction of flow has an inverse relation to the uplift force [6,7,9,10,12]. However, there is no complete agreement as to the slab's width influence on the uplift force. Bellin and Fiorotto [10] suggest building the slab with the minimum width technically possible, and other criteria indicate otherwise [8,9,12].

There are differences between design criteria due to simplifications in the physical and conceptual models that were supported. For the same condition, the slab's equivalent thickness that was calculated using existing criteria shows large differences. Thus, it is difficult to choose criteria that guarantee the stability of the slab with the lowest cost and, generally, the designer chooses the more conservative criteria. According to Khatsuria [11], the vast variation between criteria points to the fact that this science is still in an evolutionary stage. While Bollaert [13] expressed that *"despite major advances in measurement technology and data acquisition, a safe and economic design method for any kind of concrete lined stilling basin is still missing today. Especially the dynamic or even transient character of pressure pulsations as a function of their two-dimensional spatial distribution above and underneath the lining is not fully assessed and implemented in existing design methods."* [13].

In addition, the physical models that supported the design criteria were not simulated in their true scale joints, waterstops, slab thickness (s), and gap between soil foundation and the concrete slab (δ) since the pressure drop through the joints to the foundation was depreciated. In the prototype, gap δ and width joint (ε) can change by sources of natural movement, internal erosion, etc. Furthermore, the position and number of sensors reported by the references [6-10] were not sufficient to be able to accurately estimate both the uplift force and its center of pressure.

To date, the evidence suggests that hydrodynamic uplift is also influenced by the interaction of fluid with joint and detachment of the waterstops [13-19]. However, these factors have not been considered in the design criteria of the slab subjected to a hydraulic jump with horizontal aprons.

Previous work was observed in which joints and waterstops act as pressure filter fluctuations generated in the flume [18]. Also, the joints generate a time delay between the entry of the pressure wave at the joint and its arrival below the slab. It leads to the pressure differential between top and bottom of the slab and, therefore, the uplift force emerges. The interactions between the joints and the main stream alter the amplitude of pressure wave below the slab. Joints and waterstops promote pressure generating pressure gradients below the slab and some instants, the pressure gradients will have positive or negative linear correlation. With only one open transversal joint, the pressure below the slab was uniform. With two or more open joints, pressure gradients below the slab were generated.

No uniformity in pressure over a slab leads to the consideration of the failure mechanism induced by momentum of force. If a slab turns a little due to momentum, offset between slabs occurs and the stagnation point increases the uplift pressure and drag force. Failure or loss of intimate

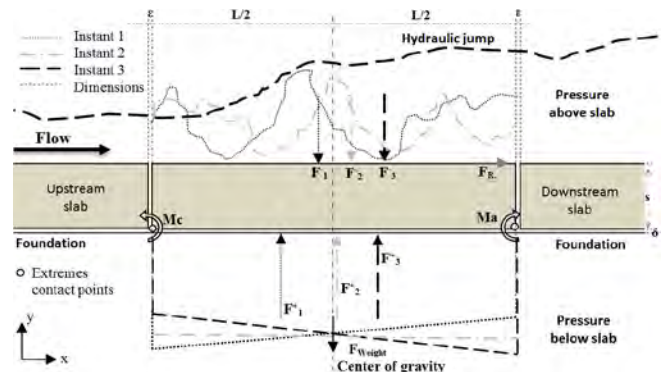


Figure 1. Force and momentum diagram of a slab in three instants.
Source: The author

contact with the soil is typically the result of a slab overturning its downstream contact point [1]. The forces of interest in a momentum balance are slab weight (F_{weight}), strength of the anchors, the resultant forces F^+ and F^- of field pressure acting on the surface above and below the slab, and drag force (F_R). The net uplift force (F_{net}) is a vector sum of the forces F^+ and F^- , which could have a center of pressure in a different coordinate to the center of gravity of the slab that changes over time (Fig. 1).

Therefore, in this study the author determined the forces F^+ , F^- and F_{net} from a spatial integration of pressure fields and balance forces. The author established the pressure fields from measured pressures with multiple sensors above and below a slab that was subject to hydraulic jump. The center of pressure to be able to calculate the momenta of force F^+ and F^- was also identified, and the momentum M_a in terms of the downstream contact point of the slab, and the momentum M_c , in terms of the upstream contact point of the slab (Fig. 1) was calculated. The author also contemplated the variation of magnitude of the force F^+ and its center of pressure by the joints, the damage of the waterstops, and the variation of gap δ and ε .

Multiple tests including physical and hydrodynamic variations were evaluated. They were analyzed and helped improve the understanding of the uplift hydrodynamic of the lining slabs. The author present the design criterion that has an equivalent thickness of the slabs with lengths between 6 and 12 times the depth of the incident flow. This paper is based on the author's PhD thesis [18].

2. Materials and methods

Pressures were measured above and below slabs in a physical model that was made in the Hydraulic Laboratory at the "University of Valle" in Cali, Colombia (Fig. 2). The physical model contains slabs fixed under the horizontal flume floor at different distances from the load tank. The flume was 0.5 m high, 8m long, and 0.35 m wide. The slab and its details such as expansion joints, slab thickness, gaps δ , and ε , were simulated with several acrylic boxes with dimensions from largest $((L+2\varepsilon)*(W+2\varepsilon)*(s+\delta))$, internal dimensions) to smallest $(L*W*s)$, external dimensions; Table 1; Figs. 1, 2).

Table 1.

Slab type, dimensions (mm) and sensors distribution (D).

Slab type	L	W	s	ϵ	δ	D	# tests
S1A	280	150	30	2	0.5	D1	58
S1A*	280	150	30	2	0, 0.2, 1	D1	180
S1B	294	156	34	0.5	0.5	D2	70
S2	299	160	37	1	1	D2	56
S3	299	160	38	1.5	1	D2	56

Source: The author

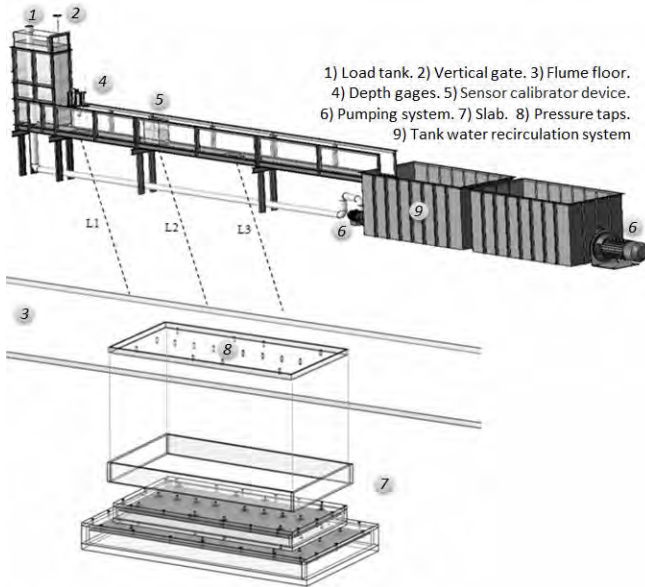


Figure 2. Physical model.

Source: Adapted from [18]

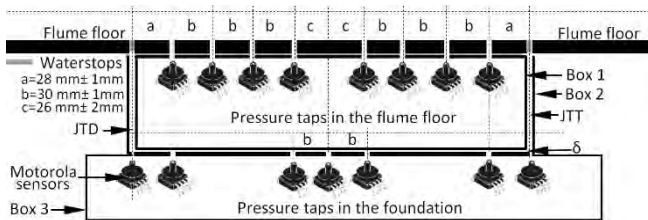


Figure 3. Lateral section of the slab on the x axis

Source: The author

The length (L) of individual slabs ranged from 6 to 12 times the incident flow depth (y_1), and the slab's width was approximately half its length. The gap δ was possible by interposing aluminum sheet rings 1 mm in diameter and thickness that were required to achieve the desired separation.

The flume floor was drilled and slotted to provide continuity to pressure taps and joints (Fig. 3). The model slabs were fixed to the basin to prevent motion. The coupling between elements in the system was monitored to avoid stagnation points by the offset between edges, as was recommended and studied in references [19-20]. The offset was estimated to be 10^{-5} m. This could be the case for the prototype due to imperfections in the finishing of the slabs and their rearrangement by natural movement.

The flow entering the hydraulic jump was full and partially developed with a Reynolds number in the boundary layer (Re_x) between 300,000 and 17,380,000. The first slab (S1) was located at a distance at which the Re_x was between 300,000 and 660,000 (transition), the second slab 2 (S2) was in the area of Re_x between 4,150,000 and 9,130,000, and the third slab (S3) was the farthest from the load tank with Re_x between 7,900,000 and 17,380,000. The experimental design varied the state of development of the boundary layer since the magnitude of pressure fluctuation depended on whether the flow is fully developed or undeveloped [11]. However, the flow regime was always turbulent with Reynolds numbers between 90,000 and 200,000. Incident flow velocities (V_1) ranged from 1.65 and 5.76 m/s.

The pressure was measured with 32 Motorola sensors (MPXV 4006GC7U, range 0-6 kpa and accuracy $\pm 5\%$) and with circular pressure taps of 2 mm in diameter above and below the slab with two distributions (Fig. 4). The first sensors distribution (D1) selected 16 pressure taps above and below the slab that had an equal distribution (Fig. 4a, sensor symbol “●” and “■”). The second sensors distribution (D2) selected 8 pressure taps that were located above the slab in the central line (Fig. 4a; sensor symbol “●”). When these sensors failed, the pressure taps next to the longitudinal joint were used (Fig. 4a; sensor symbol “■”). Furthermore, 24 pressure taps below the slab and the bottom of the joints were implemented to achieve a higher resolution of the pressure field (Fig. 4b; sensor symbol “◆”).

Every five working hours, in accordance with the methodology proposed in the reference [21], the pressure measurement system was dynamically calibrated, and dynamic uncertainty was, on average, 8.82%. The signs that

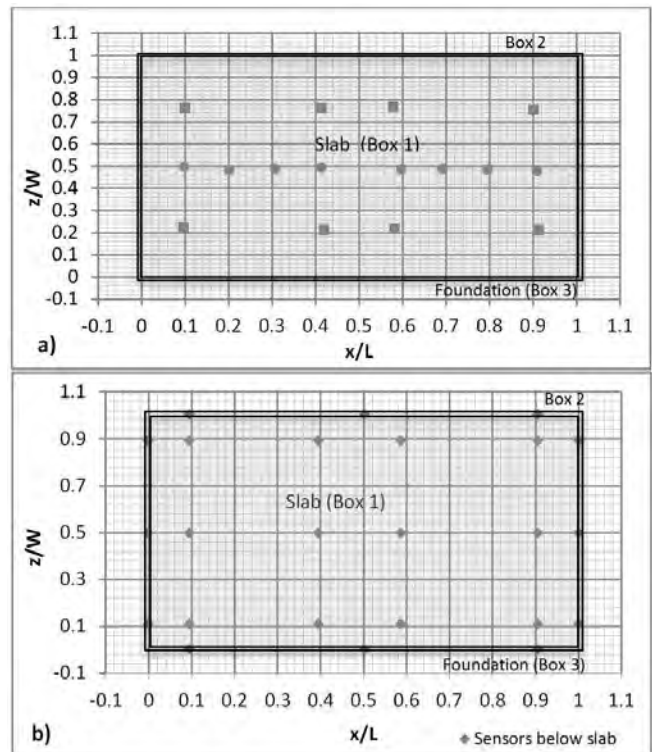


Figure 4. The expansion joints and two sensors distributions

Source: The author

were acquired with a data acquisition system (DAQ National Instruments, NI SCXI: 1000, 1102B, 1600, 1300) were sent to a laptop. The sampling frequency (f_s) was 200 Hz and was limited by the data acquisition system available. In addition, it held the sampling theorem (avoiding aliasing) and improved the resolution in the time of the digitized signal (5 ms). In signal processing, a median digital filter was used to remove frequency components that were not part of the phenomenon since it closely recovers the original signal while removing noise [22]. According to the analysis of the frequency signal and the dynamic characteristics of the pressure measurement system, the cutoff frequency of the digital filter was 10.5 Hz (window median filter equal to nineteen). Thus, the typical overshoot of the pressure measurement system in response to a sudden change of pressure (pressure fluctuation) was minimized. "Overshoot is the amount of output measured beyond the final steady output value in response to a step change in the measurand" [23].

In each test, the slab type (S1A, S1A*, S1B, S2, and S3; Table 1), the open joint(s), and the Fr_1 , were selected. Hydrodynamic variations included a minimum seven different Fr_1 between 2.3 and 10 for each physical variation.

Physical variations include the controlled release of the waterstop(s) in: a) one of the four joints, front transverse joint (FTJ), rear transverse joint (RTJ), or longitudinal joint (LJ); b) two joints simultaneously, longitudinal joints (LJ), or transverse joints (TJ); c) all joints (AJ).

The flow depth was measured on a) FTJ, b) LJ in the middle of the slab, c) RTJ. At each point, the minimum and maximum depth detected in 30 seconds were measured with depth gages that had a 300 mm range and an accuracy of ± 0.2 mm. The discharge was regulated between 8.15 and 14.1 Gallon/min, as was the vertical gate of the load tank (1.8m high, 1m long and 0.35 m wide) between 2.5 and 5.5 cm. The discharge was measured from an Omega flow meter (FMG-901). The flow rate was measured with a Prandtl tube at a point located 0.05 m upstream of the front transverse joint, and the measurement error was 4%.

The test was run over 15 minutes and the data acquisition was performed during in the last five minutes. Data acquisition time was mainly associated with extensive data and the number of tests explored (420). One test had 60,000 discrete samples in which the pressure fields were analyzed.

The hydraulic jump with rectangular weirs of heights ranging from 5 to 20 cm at the end of the flume was induced. Because, in general, the highest pressure fluctuations are reported in the first third of the length of the free hydraulic jump [8,24-30], the slabs were located under 30% of its length. Some tests in the slab "S1" had a submerged hydraulic jump.

3. Data processing and results

This researcher evaluated each sampling instant from the 58 test samples that had an S1A configuration, the forces F^+ , F^- , F_{net} , their center of pressure over the slab surfaces, and the momenta Ma and Mc . Using data processing, the pressure fields from the pressure measured above and below the slab in each sampling instant were adjusted. According to the theory of Riemann integration, to obtain the total force

vectors F^+ and F^- (eq. 1 and eq. 2), the area of slab was discretized and the sum of the partial pressures was computed.

$$F^- = \iint P^-(x,y) dx dy = \Delta x \Delta y \sum P^-(x,y) \quad (1)$$

$$F^+ = \iint P^+(x,y) dx dy = \Delta x \Delta y \sum P^+(x,y) \quad (2)$$

Where, P^- and P^+ are the pressures above and below the slab's surfaces. $\Delta x \Delta y$ (L/186 x B/115) are area elements in which the slab area (A_L) was discretized.

The x-coordinate of center of pressure (intersection of the resultant force and the surface's line of action) was obtained with eq. 3.

$$\bar{X} = \frac{\sum P^{\pm}(x,y)x_i}{\sum P^{\pm}(x,y)} \quad (3)$$

Where x_i is x coordinate of the center of the differential element of area.

The forces F^+ and F^- 's centers of pressure were different to their centers of gravity, which affect momenta that induce rotation of the slab. The offset percentage of the center of pressure from the center of gravity in x-coordinate was calculated using eq. 4 (Fig. 5).

$$\text{offset}_{xc}(\%)^{\pm} = \frac{(x_c - \bar{X})}{x_c} * 100 \quad (4)$$

Where x_c is x-coordinate of the slab's center of gravity (or centroid).

The author calculated the momenta balances with respect to the slab's extreme contact points. The clockwise momentum was positive. The F_{net} and net momenta (Ma_{net} and Mc_{net}) determine the possibility of the slab's uplift or rotation (Fig. 1). Then, the maximum value of F_{net} , Ma_{net} , Mc_{net} in each test was selected and expressed in terms of net instability dimensionless coefficients (F_{NM}^* , Ma_{NM}^* , $|Mc_{NM}^*|$; eq. 5 -7).

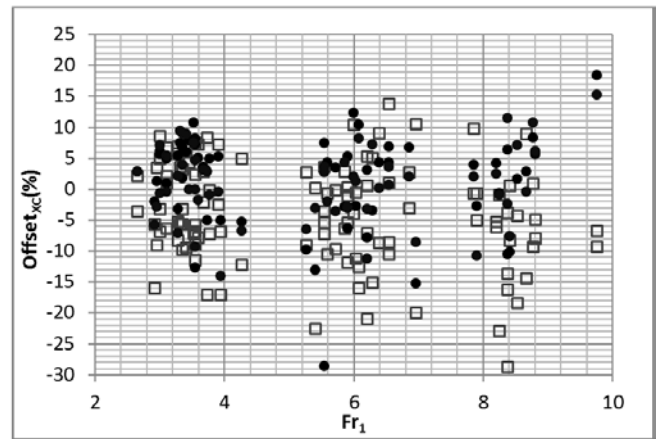


Figure 5. Offset percentage of the center of pressure from the center of gravity above (□) and below (●) the slab.

Source: The author

$$F_{NM}^* = \frac{F_{net}}{\gamma A_L V_1^2 / 2g} \quad (5)$$

$$Ma_{NM}^* = \frac{Ma_{net}}{x_c \gamma A_L V_1^2 / 2g} \quad (6)$$

$$Mc_{NM}^* = \frac{Mc_{net}}{x_c \gamma A_L V_1^2 / 2g} \quad (7)$$

Where γ is the specific weight of water and g is the gravity.

The coefficients F_{NM}^* were lower than the coefficient Ma_{NM}^* and $|Mc_{NM}^*|$ (Fig. 6), which show that the mechanism of initial failure is the slab's rotation. The dotted boundary was called the enveloping curve of instability net coefficients (C_{net}) and it will be used to predict the uplift hydrodynamic in the next subsection. Two values of $|Mc_{NM}^*|$ that fall outside the area of the curve (Fig. 6). These values manifest the combination of a great uplift force with a great center of pressure offset from the center of gravity below the slab (Fig. 6).

To expand upon the above, the author analyzed the impact on uplift force of the variations of Re_x , the gap δ , the gap ε , and the controlled release of the waterstops. It was considered that these physical variables only affect pressure fields below the slab, i.e. the force F^+ . Thus, in each sampling instant from the 420 tests we calculated the force F^+ (eq. 2) and then expressed it in the form of a dimensionless coefficient, according to eq. 8.

$$F^* = \frac{F^+}{\gamma \bar{h} A_L} \quad (8)$$

Where $\bar{h}$ was calculated as the average of three minimum depths measured on FTJ, LJ, RTJ with a baseline below the slab.

To avoid the mistake of basing the analyses on a spurious value, ten maximum values identified in each test were plotted (Figs. 7-10). For same Froude number, coefficient F^* varied as a result of pressure fluctuations of the hydraulic jump and the geometric variations made in each test.

The incidence of the state of development of flow over force F^+ was not clear. The force F^+ is proportional to the Froude number and, generally, it was lower than twice the average hydrostatic force below the slab ($\bar{h}\gamma A_L$; Fig. 7).

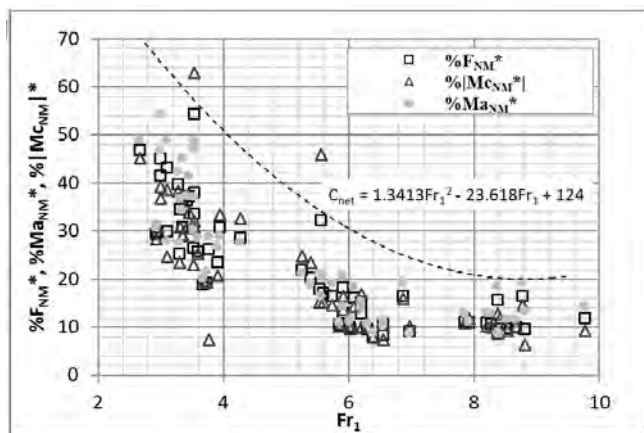


Figure 6. Net instability coefficients and their enveloping curve
Source: The author

The effect on the force F^+ by detachment of the waterstops, the change of the gaps ε , and δ can be deduced from Figs. 8-10. These showed the maximum F^+ found in the different tests with S1 configuration and open transversal joints (Fig. 8), open longitudinal joints (Fig. 9), and all open joints (Fig. 10). Furthermore, a slab configuration with gap ε of 0.5 mm and 2 mm; and gap δ of 0.2 mm, 0.5 mm, and 1 mm was also considered

As a result of these tests, it is possible to say that the narrowest joint ($\varepsilon=0.5$ mm) induced a greater uplift force F^+ (Fig. 8-10). Tests with open transversal joints induced major uplift forces under the slabs, and these were followed by tests with all open joints.

The incidence of gap δ on uplift force was not clear. For the condition of open transverse joints an inverse relationship between the uplift force and the gap δ was observed (Fig. 8).

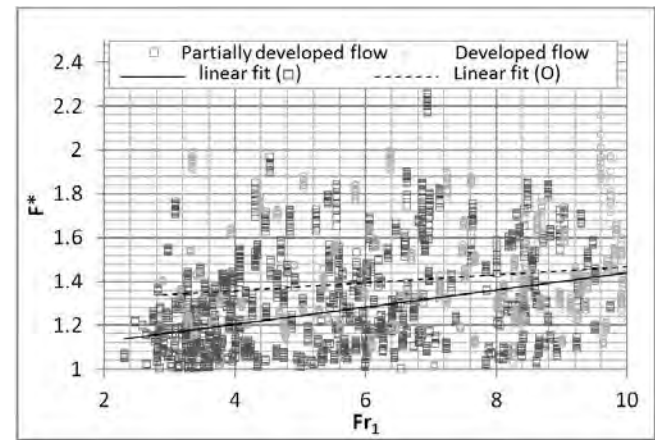


Figure 7. The tests' maximum force F^+ .
Source: The author

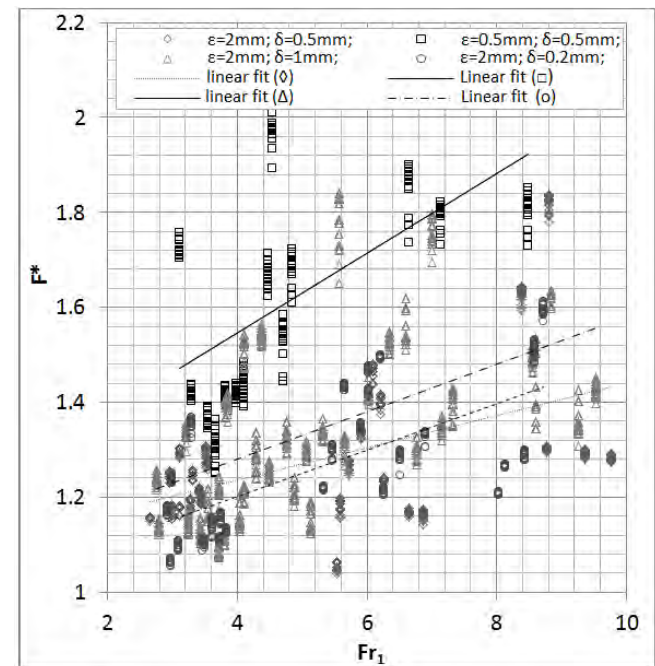


Figure 8. The maximum force F^+ with open transversal joints
Source: The author

However, occasionally the author identified a proportional relationship between F^+ and gap δ in tests with longitudinal joints or all open joints (Figs. 8, 9). The greatest uplift forces obtained from the combination of gap ε of 0.5 mm and gap δ of 0.5 mm, and the results showed in references [15,16], led to us leaving the hypothesis open (narrower gap δ leads to a hydraulic jack).

The study of net uplift force and its point of application showed that it is necessary to consider the equivalent thickness of lining slabs in design criteria as well as the failure mechanism induced by momentum. Also, detachment of the waterstops, the size and the orientation joints that have an effect on the uplift force, and consequently influence its momentum should also be considered.

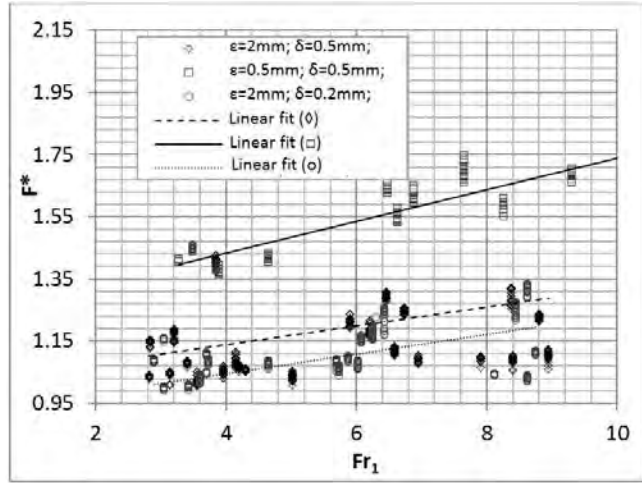


Figure 9. The maximum force F^+ with open longitudinal joints
Source: The author

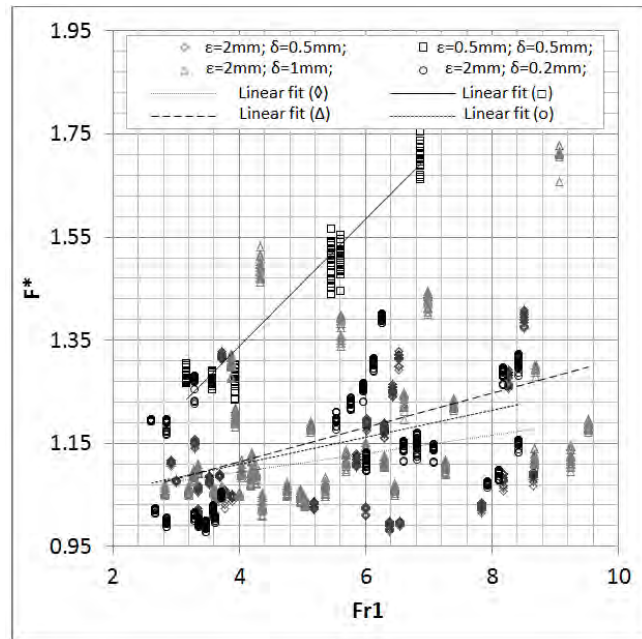


Figure 10. The maximum force F^+ with all joint exposed.
Source: The author

4. Estimation of hydrodynamic uplift

The author proposes experimental tests and design criterion to estimate the equivalent thickness of a slab with lengths between 6 and 12 times the incident flow depth. The design of concrete slabs for hydrodynamic loading focuses on the determination of the maximum possible destabilizing force and momentum. In this criterion, uplift force and momenta are considered by the dimensionless design coefficient C_d , calculated by eq. 9.

$$C_d = C_{net} f_1 f_2 \quad (9)$$

Where, C_{net} is the instability net coefficients, which can be obtained from Fig. 6's envelope curve. " f_1 " is a dimensionless experimental coefficient that takes into account the increase of the force F^+ and its momentum from the detachment of the waterstops, and the size and the orientation joints. " f_2 " is a dimensionless experimental coefficient that takes into account extreme instabilities.

To obtain the coefficients f_1 and f_2 , the force F^+ found in each sampling instant from 420 tests was used to calculate the momenta Ma^+ and Mc^+ . The largest momenta Ma^+ and Mc^+ in each test were selected and expressed in form of dimensionless coefficients (eq. 10 and eq. 11).

$$Ma^* = \frac{Ma^+}{h\gamma A_L x_c} \quad (10)$$

$$Mc^* = \frac{Mc^+}{h\gamma A_L x_c} \quad (11)$$

The largest absolute value of the coefficients Ma^* and Mc^* in each test were identified and called coefficient M (eq. 12).

$$M = \text{Maximum}(|Mc^*|, |Ma^*|) \quad (12)$$

M coefficients from 58 tests with an S1A configuration were added to the subscript r (M_r). A curves adjustment over the maximum value of M_r and M vs. Fr_1 was plotted (Fig. 11). The M curves that were proposed as lines ensured that the slope is always positive as the uplift force F^+ is proportional to Fr_1 . Furthermore, since the positive and negative maximum pressure

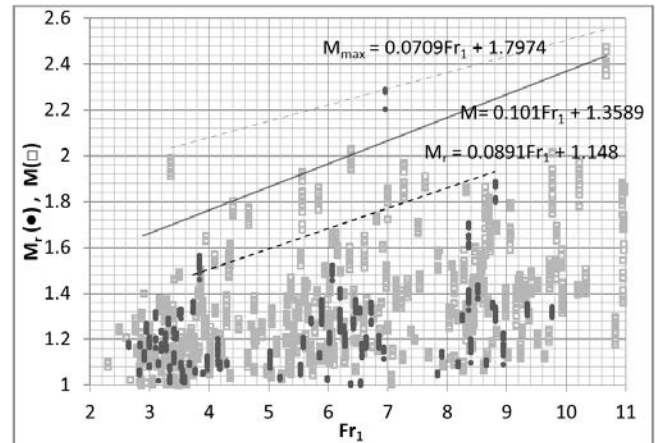


Figure 11. Maximum instability coefficients M_r and M
Source: The author

coefficient increases over time [8,27], the line fits the data conservatively to compensate for the short-time data acquisition (5 min).

The amplification factor f_1 that depends on Fr_1 is calculated according to equation 13 (Fig. 11).

$$f_1(Fr_1) = 1 + \frac{(M-M_r)}{M_r} = 1 + \frac{0.012Fr_1 + 0.2109}{0.0891Fr_1 - 1.148} \quad (13)$$

M_{max} were associated with the extreme instabilities and the low probability of occurrence (Fig. 11). To determine the coefficient f_2 , the same methodology used to determine f_1 was implemented, and the M curve was compared with a curve fit to M_{max} (eq. 14, Fig. 11).

$$f_2(Fr_1) = 1 + \frac{(M_{max}-M)}{M} = 1 + \frac{(-0.0301Fr_1 + 0.2109)}{0.0891Fr_1 - 1.148} \quad (14)$$

The design coefficient in the Fr_1 function is presented in Fig. 12. The buoyancy is considered by the design coefficient if the real thickness used in the prototype is less than the calculated thickness scaling model to prototype (Table 1). If the above are fulfilled, the thickness of the slab can be calculated with equation 15.

$$s = C_d \gamma V^2 / (\gamma_c 2g) \quad (15)$$

Where γ_c is the specific weight of concrete. In a scenario in which the slab could be immersed in a water-sediment mixture (for example, during the flushing of sediments from reservoirs), it is necessary to replace the specific weight of water by mixture (γ_m). The above equation intends to compensate for the increase in the buoyancy force on the slab by the increased density of the mixture.

The slab thickness is most often selected empirically as achieving stability to resist uplift force alone with this parameter requires a heavy slab, and this is not always possible. In these cases, the methodology of equivalent thickness through the anchor should be used [31]. Slab thickness and the anchor could be calculated with eq. 16

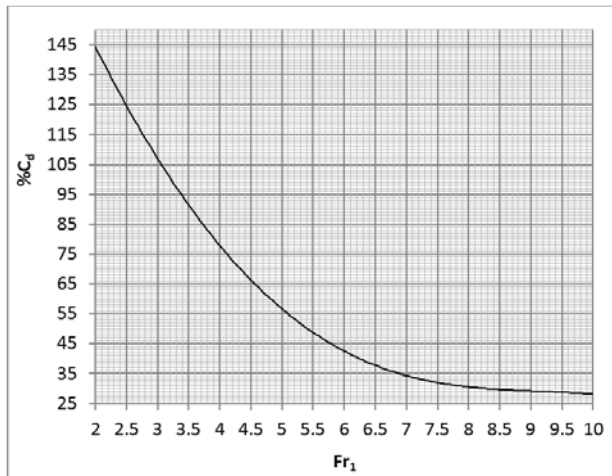


Figure 12. Coefficient C_d to estimate hydrodynamic uplift
Source: The author

$$C_d A_L f_d \gamma_m V^2 / 2g = s \gamma_c A_L + 0.5 A_n \sigma_a n_a \quad (16)$$

The left side of eq. 16 is considered the hydrodynamic uplift. " f_d " is the drainage coefficient, and it can be used as a means to theoretically reduce up to 50% of the pressure uplift ($f_d = 0.5$; [32-33]). The right side of eq. 16 represents the forces that counteract the uplift force, including the weight of the concrete slab and the force that provides the anchor. Where, " σ_a " is the tensile stress between steel-slab, n_a is the number of steel bars, and A_n is the area of the steel bar. For safety purposes, double the area of the anchor steel is assumed to design slabs in stilling basins [31].

Underdrains, anchors, cutoffs, and slab thickness are all provided to stabilize the slabs [32]. A slab that is about 600 mm thick is the minimum recommended [33], and this shall be determined by analyzing hydrostatic uplift and an elastic foundation analysis [32]. Uplift momenta and misalignment between slabs can be prevented by adding steel in the partial contraction deboned joint located the transversal joint (the joint with slip dowels). Thus, the deboned joint allows the expansion or contraction of the slab while the steel counteracts the shear loads void misalignment between slabs [32,34-35]. Also, safety reinforcement counteracts the momentum of force F_R .

5. Analysis

To ensure that the physical model represents the prototype, there must be geometrical, kinematic, and dynamic similarity [36-38]. Therefore, it is necessary to consider the effects of scale before using any lining slabs design criteria.

In hydraulic jump, when the large eddies are well reproduced in a model, the representation of turbulence is nearly achieved since the eddies are the energy carriers [11]. The large eddies in the turbulent flow are proportional to the principal dimension of the flow field, and they ensure correct simulation using a geometrically similar model [11]. The author recommends using a geometric scale more generous than 1:50 [36].

Viscous effects can lead to scale effects, especially in models based on Froude, for which the Reynolds number is always less than the prototype [11]. In tests with an Fr_1 between 2.3 and 7.15, viscous effects and scale effects in terms of void fraction, bubble count rate, and bubble chord time distributions were overcome. Their influence was at least minimized since in the model the flow depth was greater than 30 mm, and there was a turbulent flow with Reynolds numbers greater than 100,000 [39,36-41]. When the physical model does not take into account the concentration of air in the evaluation of the pressures, it may require an additional safety factor. Pinheiro [25] found that increased air concentration decreases the mean pressure value and the standard deviation of force.

According to Lopardo *et al.* [29], the pressure data collected in a physical model with a free vertical gate system and horizontal flume can be extrapolated to sloping channels in hydraulic jump stilling basins. That is as long as the error is on the side of safety. Similarity law of fluctuating pressure spectrum in the strongly rolling area agrees with gravity law [41]. Thus, data from basic research provides pressure values

that are useful for stilling basin predesign, despite the limits in scale similarity.

Viscous and inertial forces dominate physical processes involving flow through small cracks or joints along a channel boundary [19]. The dimensions used to simulate the expansion joints (0.5 mm - 2 mm) lead us to suggest the use of a geometric scale more generous than 1:30. To establish similarity between the roughness implemented in the general contour of the model (coated in acrylic: $n_{\text{Manning}} = 0.009$) and prototype (coated concrete: $n_{\text{Manning}} = 0.014$), the geometric scale should be 1:14. Thus, the Manning roughness scale factor limits the geometric scale [36]. When this parameter has no similarity, the model is rougher than its prototype, and scale effects are generated.

Inside the joints and the δ gap, as with the cavities, constrictions, and junctions, the propagation speed of pressure wave (c) becomes a function of the variation of fluid density (compressibility), and area (distensibility) increases in pressure [42]. For a given Fr_1 , the effects of the Reynolds number on the two-phase flow properties are particularly notable in the developed shear layer [38]. Thus, aeration in a prototype will be higher than in the model, and a similar or smaller “ c ” can be expected in the prototype. Pressure waves experience diffraction, interference, reflection, and refraction that depend of solid material in the boundary. These can alter the propagation speed, amplitude and the transmitted energy [14,18]. In the prototype, the boundary may be concrete and soil. The boundary was acrylic in the model, in which “ c ” may decrease and energy losses in the reflection of the pressure wave increase. Nevertheless, in a prototype designed with the criterion and a scale more generous than 1:14, the impact of the last variables are less in the resonance phenomena and persistence time of the net uplift pressure due to the length of the slabs [27], the hydraulic jump’s low frequency [27,31,37], and the role of the joints as frequency filters [17,18]. The pressure amplification under the slab for the effects of fluid, joints interaction, and pressure waves at frequencies below 10.5 Hz were considered as part of this criterion.

In these cases that Fr_1 is greater than 7.16, and/or the stilling basin demands a greater geometric scale than 1:15 to be able to establish similarity. The criterion proposed can be used for the predesign of lining slabs. “For a joint length of 18 m and c of 100 m/s, one obtains a resonance frequency < 3 Hz [13]”. If the resonance is demonstrated, the transient approach needs a quantification of pressure amplification inside the joints, which can be the use of an appropriate pressure amplification coefficient [13]. To verify resonance inside the joints and the gap δ , a model scale 1:1, pressure sensors with high natural frequency and with a damping close to 0.6 to prevent overshoot error are required. To check the stability of the slabs in the physical model of the prototype, a scale more generous than 1:14 is recommended. Given the opportunity to try alternatives, analyze different solutions, view operating conditions in extreme situations, and eventually, reduce the risk [43], physical modeling allows details to be refined so to as find a safer and more economical project.

To compare the developed criterion with other traditional criteria to estimate the slab equivalent thickness, some scale effects are ignored and two illustrative examples are shown. The author consider the hydraulic jump stilling basin with the

following details. The first example: $y_1=2.43\text{m}$, $y_2=31.45\text{m}$ (major conjugate of the hydraulic jump). Size of panel monolith: $W=11.5$ m ($W=4.4y_1$) and $L=25$ m ($L=9.76y_1$). $V_1 = 46.1$ m/s and $Fr_1 = 9.44$. Second illustrative example: $y_1=0.45\text{m}$, $y_2=3.54$ m, $W=4.5$ m ($W=4.4y_1$), $L=2$ m ($L=10y_1$), $V_1 = 16.5$ m/s and $Fr_1 = 5.5$. In the computation, the submerged specific weight is 1.6 ton/m³, and a safety factor and an operating drainage system are not considered.

Hydrostatic uplift is evaluated using three conditions: spillway design flood, stilling basin empty, and sudden drawdown following design flood [11,33]. Usually, the first condition gives the maximum uplift force in the slab close to the hydraulic jump [11]. The latter is due to the pressure of tail water level (T_w), which is transmitted by a saturated foundation that has greater fluid pressure on the slab. The criteria belonging to Hajdin [7] and Toso *et al.* [8] was used, which are based on the measurement of fluctuating pressures, and the criteria of Farhoudi *et al.* [9] and Bellin *et al.* [10], which are based on direct measurement of fluctuating force. In all these studies, except Bellin *et al.* [10], propagation of fluctuating pressures below the apron was not considered. For the criteria to be applied, the influence of the length and width of the slab are taken into account by using the coefficient of spatial correlation (ϕ_1, ϕ_2), the force coefficient (C_{fl}, C_{fw}), or the uplift coefficient (Ω). This paper also considers the dimensionless pressure coefficient (C_p), which is based on the maximum positive (C_p^+) and negative pressure (C_p^-) deviation from the mean pressure, and the coefficient based on root-mean-square pressure fluctuations (C_p') that is reported in the references [7-10, 27, 30].

In each example, two computations to evaluate Bellin *et al.* [10] and Toso’s [8] criteria with two C_p were used as it is important acknowledge the importance of a correct selection pressure coefficient when estimating the equivalent thickness. The slab equivalent thickness computation using various relationships is presented in Table 2.

The first computation of the two illustrative C_p examples was based on C_p^+ and C_p^- experimental data. In this case, the equivalent thickness estimated by criteria from Bellin *et al.* [10], Hajdin [7], and Farhoudi *et al.* [9] were similar. The equivalent thickness that was estimated by the criterion proposed in this paper (last row, table 2) is greater than those mentioned above while Toso *et al.*’s criterion [8] was most conservative.

In the second computation in the two illustrative examples, C_p was based on the suggestions from each group of researchers. Bellin *et al.* [10] suggest assuming the pressure coefficients C_p^+ , $C_p^- = 1$ in case of a lack of experimental data while Toso *et al.* [10] suggest C_p 0.9 for the incident Froude number between 7.7 and 10. In this case, the criteria were very conservative.

The Toso [8] criteria may be safely assumed, but it is conservative for a large slab that presents the compensation of the pressure pulses on its upper face. In the hydraulic jump, the pressure pulses on big slabs are uncorrelated since the slab length is larger than the integral scale of the pressure fluctuations. The integral scale is thereby defined as the distance on which, on average, two pressure pulses become fully uncorrelated. In other words, it defines the maximum possible area in which a pulse may reasonably act [13,17].

Table 2.

Comparison of equivalent thickness of concrete lining that are calculated using various criteria

Method	Conditions/assumption	Fr ₁	s(m)
Hydrostatic uplift $s = (T_w - \bar{h})\gamma / (\gamma_c - \gamma)$	$\bar{h}/y_1 = 2.95$	9.44	15.17
	$\bar{h}/y_1 = 3.8$	5.55	1.14
Hajdin [7]	$\phi_1 = 0.68; \phi_2 = 0.93.$	9.44	7.68
$s = \frac{C_p K \phi_1 \phi_2 V_1^2 \gamma}{2g(\gamma_c - \gamma)}$	$K = 3.09. C_p' = 0.058$		
	$\phi_1 = 0.55; \phi_2 = 0.88.$	5.55	0.93
	$K = 3.09. C_p' = 0.072$		
Toso [8]; $C_p = C_p^+ + C_p^-$	$C_p = 0.43 + 0.28$ [8]	9.44	16.03
$s = \frac{C_p V_1^2 \gamma}{6g(\gamma_c - \gamma)}$	$C_p = 0.9$ [8]	9.44	20.33
	$C_p = 0.5 + 0.38$	5.55	2.55
	$C_p = 1$	5.55	2.89
Farhoudi [9]; $C_f'^2 = C_{fl} C_{fw}'$	$C_f'^2 = C_{fl} C_{fw}' = 0.022 * 0.044$	9.44	7.37
$s = \frac{V_1^2 \gamma 3.5 C_f'}{2g(\gamma_c - \gamma)}$	$C_f'^2 = C_{fl} C_{fw}' = 0.022 * 0.055$	5.55	1.05
Bellin [10]	$\Omega = 0.16.$	9.44	7.15
$s = \frac{V_1^2 \gamma \Omega (C_p^+ + C_p^-)}{2g(\gamma_c - \gamma)}$	$C_p^+ = 0.40; C_p^- = 0.26$		
	$\Omega = 0.16. C_p^+ = 1 C_p^- = 1;$	9.44	21.68
	$C_p^+ = 0.51 C_p^- = 0.32 \Omega = 0.12$	5.55	0.86
	$\Omega = 0.12. C_p^+ = 1 C_p^- = 1;$	5.55	2.08
Author. Eq. 15	$C_d = 0.29$	9.44	12.01
	$C_d = 0.49$	5.55	2.61

Source: The author

Thus, extreme pulses recorded by a single sensor in the large slab are not a representative sample of the pressure fields above and below the slab to accurately calculate the uplift force [13,18]. Above the large slab, a positive or negative pulse is a local effect.

In the first illustrative example, for the first computation and the discarded Toso criterion, hydrostatic uplift was the most critical condition for the slab's stability. This clearly shows that the release of waterstops at two different points in the floor stilling basin leads to critical situations that deserve to be paid more attention from engineers.

In this study, a slab was located in the highest pressure fluctuations zone of the hydraulic jump as the study of Farhoudi *et al.* [9] and Bellin *et al.* [10] indicated. Differential heads resulting from the sloping water surface of the jump can cause a circulating flow under the slab if leakage is allowed to enter the joint at the downstream end of the basin and to flow out of the joint at the upstream end [32]. Therefore, it is necessary in future research to mount several slabs along the hydraulic jump and to vary the number of waterstops detached on two different slabs: one at the area of maximum pressure fluctuation in the toe jump and the other at the area of maximum depth.

The criterion proposed contributed to the search for a safe and economic design method for a concrete lined stilling basin because it considers uplift force and momenta. It was computed from a spatiotemporal analysis of the pressure fields that was measured above and below the instrumented slabs in a physical model. Furthermore, the criterion was supported by a large amount of experimental information, for which details that had previously been poorly studied such as joints, waterstops, and gaps between foundations and the concrete slab were considered. The design coefficient that is supplied by a curve in an Fr_1 function facilitates the designer's application of the criterion.

6. Conclusions

The waterstops, the size, and the orientation joints have an effect on the uplift pressures, and consequently, influence the magnitude of uplift forces and momenta. The narrower joints and open traversal joints generated major uplift forces below the slabs. An offset of the center of pressure from the center of gravity in the flow direction increased the momenta Ma and Mc by up to 30%. Thus, it was necessary to consider the failure mechanism induced by momentum in the design criteria.

Considering the maximum force and momenta in each test, a design coefficient was found that defines the equivalent thickness depending on the incident Froude number between 3 and 10. It considers the effects of the offset on the center of pressure from the slab's center of gravity. This is generated by the influence of waterstops, joints, and hydraulic jump macroturbulence with full and partially developed inflow. According to changes in the hydrodynamic conditions and the physical model's characteristics, the study involves slabs with lengths between 6 and 12 times the incident flow depth.

The author discusses the scale effect that is inherent to the physical model and concludes that the experimental results are useful for: a) Designing the lining slabs in hydraulics structures that are similar to the model using scale more generous than 1:14, and an Fr_1 between 2.3 and 7.15; b) Predesigning the lining slabs in stilling basins that require a geometric scale greater than 1:15 in order to establish similarity and/or an Fr_1 between 7.16 and 10.

Acknowledgments

This research project was partially funded by COLCIENCIAS. The author would like to give a special thanks to Efraín del Risco and Lilian Posada for their valuable suggestions and insights in this field. The experiments necessary for the development of this research were undertaken in the Hydraulic Laboratory at the University of Valle in Cali, Colombia. The author sincerely appreciates the support.

References

- [1] Federal Emergency Management Agency., Outlet works energy dissipators best practices for design, construction, problem identification and evaluation, inspection, maintenance, renovation, and repair. Technical manual, USA, FEMA P-679, pp. 1-66, 2010.
- [2] Hepler, T.E. and Johnson, P.L., Analysis of spillway failure by uplift pressure. ASCE National Conference, Colorado Springs, Colorado, august 8–12, pp 857-862, 1988.
- [3] VSL International. Soil and rock anchors, Examples from practice. Berne, Switzerland. [Online]. pp 19-20, 1992 [Consulted: 15th of august of 2009]. Available at: www.vsl.net/Portals/0/vsl_techreports/PT_Ground_Anchors.pdf
- [4] Bowers, C.E. and Tsai, F.Y., Fluctuating pressures in spillway stilling basins. J. Hydraulic Division, ASCE, 95(6), pp. 2071-2079, 1969.
- [5] Bribiescas, S. and Capella, V., Turbulence effects on the lining of stilling basins. Proceedings ICOLD. Congrès des Grands Barrages. Madrid. Q.41. R.83. pp. 1575-1592, 1973.
- [6] Bribiescas, S. and Fuentes, O., Tanques amortiguadores. Technical Report, Project 7045. UNAM, México D. F. pp. 1-50, 1978.

- [7] Hajdin, G., Contribution to the evaluation of fluctuation pressure on fluid currents limit areas- based on the pressures recorded at several points of the area. VIII Conference of Yugoslav Hydraulics Association, Portoroz, 1982.
- [8] Toso, J. and Bowers, C., Extreme pressures in hydraulic-jump stilling basins, *J. of Hydraulic Engineering*, 114(8), pp. 829-843, 1988. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1988)114:8(829)
- [9] Farhoudi, J. and Narayanan, R., Force on slab beneath hydraulic jump. *J. of Hydraulic Engineering*, 117(1), pp. 64-82, 1991. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1991)117:1(64)
- [10] Bellin, A. and Fiorotto, V., Direct dynamic force measurements on slab in spillway stilling basin. *J. of Hydraulic Engineering*, 121(10), pp. 686-693, 1995. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:10(686)
- [11] Khatsuria R.M., Hydraulics of spillways and energy dissipators. New York: Marcel Dekker, 2005. pp 411-424.
- [12] Pinheiro, A., Quintela, A. and Ramos, C., Hydrodynamic forces in hydraulic jump stilling Basins. Proceedings of the symposium on fundamentals and advancements in hydraulic measurements and experimentation. ASCE. New York. USA. pp. 321-330, 1994.
- [13] Bollaert, E.F.R., Dynamic uplift of concrete linings: Theory and case studies, USSD Annual Meeting, April 24-26 2009, Nashville, United States. pp. 1-16, 2009.
- [14] Bollaert, E.F.R. and Schleiss, A.J., Transient water pressures in joints and formation of rock scour due to high-velocity jet impact. Communication 13, Laboratoire de Constructions Hydrauliques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. 2002.
- [15] del Risco, E., Hurtado, E. y González, M., Estudio experimental de las presiones de levantamiento bajo una losa con juntas transversales al flujo. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 1(1), pp. 31-42, 2010.
- [16] Hurtado, E., del Risco, E. y González, M., Presiones medidas en la base de una losa de fondo con juntas paralelas al flujo en un canal. *Revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia*, 47, pp. 39-52, 2009.
- [17] Melo, J., Pinheiro, A. y Ramos, C., Forces on plunge pool slabs: Influence of joints location and width. *J. of Hydraulic Engineering*, 132(1), pp. 49-60. 2006. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:1(49)
- [18] González, M., Levantamiento de una losa de piso sometida a un flujo turbulento. PhD Tesis, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. 2013.
- [19] Frizell, W.K., Uplift and crack flow resulting from high velocity discharges over. Report DSO-07-07 U.S. Department of the interior, Bureau of Reclamation. Denver, Colorado, 2007, pp. 2-5.
- [20] del Risco, E., Investigación experimental de la falla de losas de revestimiento de tanques amortiguadores. MSc. Tesis, Facultad de Ingeniería. UNAM, México, 1983.
- [21] González, M. y Giraldo, S., Caracterización dinámica de sensores de presión utilizando el principio de la botella de mariotte. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, 71, pp. 146-156, 2014.
- [22] Proakis, J.G. and Manolakis D.G., Tratamiento Digital de Señales. Prentice Hall. España, 2000.
- [23] The International Society of Automation (ISA 37.16.01). A guide for the dynamic calibration of pressure transducers. pp. 13-38, 2002.
- [24] Vasiliev, O.F. and Bukreyev, V.I., Statistical characteristics of pressure fluctuations in the region of hydraulic jump. Proceedings 12th IAHR Congress, Fort Collins, USA, pp. 1-8, 1967.
- [25] Pinheiro, A., Accoes hidrodinâmicas em bacias de dissipacao de energia por ressalto. PhD. dissertation, Universidad Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, 353 P., 1995.
- [26] Khader, M. and Elango, K., Turbulent pressure field beneath a hydraulic jump. *J. of Hydraulic Research*, 12(4), pp. 469-489, 1974. DOI: 10.1080/00221687409499725
- [27] Fiorotto, V. and Rinaldo, A., Fluctuating uplift and linings design in spillway stilling basins. *J. Hydraulic Engineering ASCE*. 118(4), pp. 578-596. 1992a. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1992)118:4(578)
- [28] Fiorotto, V. and Rinaldo, A., Turbulent pressure fluctuations under hydraulic jumps. *J. of Hydraulic Research*, 130, pp. 499-520, 1992b. DOI: 10.1080/00221689209498897
- [29] Lopardo, R., de Lio, J. and Lopardo, M., Physical modelling and design estimation of instantaneous pressures in stilling basins. Proceedings of the XXVIII IAHR Congress. Graz. 132 P., 1999.
- [30] Mees, A., Estudo dos esforços hidrodinâmicos em bacias de dissipação por ressalto hidráulico com baixo número de Froude. MSc. Thesis. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil. 2008.
- [31] Fiorotto, V. and Salandin, P., Design of anchored slabs in spillway stilling basins. *ASCE. J. of Hydraulic Engineering*. 126(7), pp. 502-512. 2000. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2000)126:7(502)
- [32] Blair, H.K. and Rhone, T.J., Design of small dams. Bureau of Reclamation, 3a ed., Washington, DC, cap. 9, Spillways structural design details. 1987, pp. 429-434.
- [33] Bureau of Indian Standards., Structural design of energy dissipators for spillways criteria. Doc. WRD 09(489). Preliminary Indian Standard. July 2007. Available at: [www.bis.org.in/sf/wrd/WRD09\(489\).pdf](http://www.bis.org.in/sf/wrd/WRD09(489).pdf)
- [34] Bussell, M. and Cather, R., Design and construction of joints in concrete structures, report 146. Construction industry research and information association. London, UK, pp.12-64, 1995.
- [35] British Standard 8007., Code of practice for design of concrete structures for retaining aqueous liquids. UDC 624.953, pp. 11-19. 1987.
- [36] Chanson, H., The hydraulics of open channel flow. Edward Arnold, London, UK. 1999.
- [37] Murzyn, F., and Chanson, H., Free surface, bubbly flow and turbulence measurements in hydraulic jumps. Report CH63/07, Div. of Civil Engineering, University of Queensland, Brisbane, Australia, August, July. 2007. 116 P.
- [38] Chanson, H., Turbulent air-water flows in hydraulic structures: dynamic similarity and scale effects. *Environ. Fluid. Mechanics* 9(2), pp. 125-142, 2009. DOI: 10.1007/s10652-008-9078-3
- [39] Lopardo, R., Discussion: Prototype measurements of pressure fluctuations in The Dalles Dam stilling basin. *Journal of Hydraulic Research*, 48(6), pp. 822-823. 2010. DOI: 10.1080/00221686.2010.536432
- [40] Novak P., Nalluri C. and Narayanan R., Hydraulic Structures. Fourth Edition Taylor & Francis. New York pp: 246-265. 2007
- [41] JiJian, L. JiMin, W. and JinDe, G., Similarity law of fluctuating pressure spectrum beneath hydraulic jump. *Chinese Science Bulletin*. 53(14). pp. 2230-2238, 2008. DOI: 10.1007/s11434-008-0300-y
- [42] Lighthill, J., Waves in fluids. Cambridge University Press. pp. 89-202, 1979.
- [43] Lopardo, R., Algunos aportes de los modelos físicos en la optimización hidráulica de grandes presas Argentinas. V Congreso argentino de presas y aprovechamientos hidroeléctricos. San Miguel de Tucumán (Tucumán). pp. 1 -19, 2008.

M. Gonzalez-Betancourt, is BSc. in Agricultural Engineering jointly from the Universidad Nacional de Colombia (Palmira campus), and Universidad del Valle, Cali, Colombia, in 2008. He received his PhD in Engineering with an emphasis on Hydraulic Resources in 2014 from the Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. Between 2008 and 2010, he worked at the Hydraulic Laboratory at the Universidad del Valle. Since 2009 he has been associated with the Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos research group [Postgraduate program on the use of Hydraulic Resources] at the Universidad Nacional de Colombia. From 2014 to date, he has been a researcher in Colombia subject to the terms of the joint agreement between the Organización de Estados Iberoamericanos [Organization of Iberoamerican States], the Servicio Nacional de Aprendizaje [National Apprenticeship Service] and COLCIENCIAS [Administrative Department of Science, Technology and Innovation].
ORCID: 0000-0001-5485-8043

The behavior of a foundation transversally loaded at the top over highly porous and collapsible soil

Roberto Kassouf ^a, David de Carvalho ^b & Paulo José Rocha-de Albuquerque ^b

^a Kassouf Engineering, Itatiba, Brasil. kassouf.engenharia@kassouf.com.br

^b Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil. d33c@uol.com.br, pjra@fec.unicamp.br

Received: August 17th, 2015. Received in revised form: February 15th, 2016. Accepted: October 3rd, 2016.

Abstract

In geotechnical engineering, the use of caisson foundations transversally loaded at the top is common. This type of foundation is frequently used on high-porosity and collapsible soils, which are common in many regions in Brazil. Because of the limited information available in the literature, two loading tests were performed with transversal loading in a caisson built at full scale (0.8 m diameter, 9.0 m depth, 1.6 m base diameter). A load test was performed with the soil in its natural humidity condition, and another load test was performed after the previous soil flooding. Load vs horizontal displacement curves and the horizontal direction coefficient of the soil were obtained. The results permitted the verification of the applicability of behavior-predicting theoretical formulae in addition to the proposal of parameters for use on the studied soil. Before executing the load tests, laboratory and in-situ tests were performed to investigate the local subsoil.

Keywords: transversal loading, caisson, porous soil, collapsible soil.

Comportamiento de cimentación cargada transversalmente en su cabeza en suelo altamente poroso y colapsable

Resumen

En la práctica de la ingeniería geotécnica es común el empleo de fundaciones por pilas cargadas transversalmente en la parte superior. Frecuentemente este tipo de fundación es ejecutada en suelos de alta porosidad y colapsables, comunes en varias regiones de Brasil. Debido a la poca información disponible en la literatura, se realizaron dos pruebas de carga con cargamento transversal en una pila (diám. 0,8 m; prof. 9,0m; diám. base 1,60m). Se realizó una prueba de carga estando el suelo en su condición de humedad natural y otra después de la previa inundación. Fueron obtenidas las curvas carga x desplazamiento horizontal y los coeficientes de reacción horizontal. Los resultados permitieron verificar la aplicabilidad de fórmulas teóricas de previsión de comportamiento, así como proponer parámetros a ser utilizados para el suelo. Previo a la realización de las pruebas de carga fueron realizados ensayos de laboratorio y campo para la investigación del subsuelo.

Palabras clave: carga transversal, pila, suelo poroso, suelo colapsable.

1. Introduction

The deep foundation design planner, in addition to the executive-system-related aspects and the type of material employed, is concerned with the loading system, which can be translated due to an axial load, transversal load (horizontal) and bending moments. Regarding the horizontal loading, generally, foundations are subject to forces at the

top, for example, in bridges, viaducts, transmission line towers, wind power generation towers, or along a shaft, as for the earth's pressure. In countries with seismic activities, the construction code requires the consideration of the horizontal load in foundation designs, thus minimizing the consequences of a possible earthquake.

In the dimensioning of foundations to resist horizontal loads, the project criteria involve not the capacity of the

How to cite: Kassouf, R., de Carvalho, D. & Rocha-de Albuquerque, P. J. The behavior of a foundation transversally loaded at the top over highly porous and collapsible soil DYNA 83 (199) pp. 134-139, 2016

ultimate horizontal loading but the maximum or pre-established displacement that can be reached. Currently, there are many mathematical methods for the prediction of the horizontal displacement of a pile. The common difficulty among these methods concerns the adoption of the geotechnical parameters to be used in the calculations.

The main parameter used is the modulus of the horizontal reaction (n_h), which is defined as the soil resistance along the foundation divided by its deflection at a point. Simplified mathematical models have been created for the analysis because the modeling of the horizontal action problem is tridimensional and extremely complex for routine solutions by the project planners. The most well-known and diffused theory for the evaluation of these actions is the "Theory of the Horizontal Reaction of the Soil", where the n_h factor represents the proportionality between the reaction and displacement acting on the soil mass. However, this factor is difficult to theoretically estimate. Nevertheless, this factor can be "measured" using load tests and obtaining a reliable value for the horizontal resistance of the soil where the construction will occur.

The soil's reaction is a function of many factors, such as pile properties, soil stress vs. strain, depth of the analyzed point, foundation displacement level, etc. Because of the difficulty of establishing a function including all of these factors, the simplified Winkler's hypothesis is normally used, where the soil's reaction is proportional to the pile's displacement.

For the horizontal loading, in the first few meters, the superficial soil has great influence over the load vs. horizontal displacement of the foundation's behavior. To predict the behavior of horizontally loaded foundations, theoretical approaches are available in the literature [1, 2, 3, 4]; however, parameters determined for the local soil are necessary for its application.

Superficial soils with porosities higher than 50% cover great area extensions in Midwest Brazil. Because of their large void volumes, these soils undergo great deformations under loads. In addition, many of these soils are collapsible, i.e., when the soils are under loads and when a significant increase in the moisture content or soil saturation occurs, the structure collapses, which results in unacceptable displacement values for the edifices [5].

Given the lack of available information in the literature concerning horizontally loaded caissons on highly porous collapsible diabase soil, this study was developed to examine the performance of two load tests in a caisson, with soil at its natural and after-flooding.

Based on the horizontal loading tests, the effect of soil flooding on the load vs. horizontal displacement curve and the values for the horizontal reaction coefficient for the soil's conditions at its natural and pre-flooded were verified. The results obtained for the horizontal reaction coefficient were compared with the results for other types of foundations on similar soils.

The acting stresses and displacements on a pile under bending moments and horizontal loadings were determined using the theory of horizontal soil reaction, which is based on the model proposed by Winkler. The soil behavior under horizontal forces is simulated by a set of independent,

identical and equally spaced springs. Thus, the soil's reaction is considered proportional to the displacement of the analyzed point. This supposition simplifies the problem, considering that the relation between the pressure of contact at the base of the foundation and its corresponding consolidation is the same for any support area. Using the model proposed by Winkler, the concept of the modulus of horizontal reaction, K , was introduced by [6]. It is defined as the relation between the soil's reaction (in units of applied force by the pile's length) and the corresponding displacement (eq. 1):

$$K = \frac{p}{y} \quad (1)$$

where: K = the modulus of horizontal reaction (FL^{-2}), p = the applied pressure (FL^{-1}) and y = the horizontal displacement (L).

This notation presents the advantage of being independent of the diameter of the foundation. Therefore, the eq. 2 can be rewritten as:

$$K = k_h \cdot D \quad (2)$$

where: k_h = the horizontal reaction coefficient (FL^{-3}) and D = the diameter of the foundation (L).

For pure sands, the elasticity modulus increases (approximately) linearly with depth. Therefore, the soil reaction to the load applied to the pile is assumed to also linearly increase with depth (eq. 3):

$$K = \frac{p}{y} = n_h \cdot z \quad (3)$$

where: n_h = the modulus of the horizontal reaction of the soil (FL^{-3}) and z = the depth (L).

It is necessary to understand the variation of K throughout the foundation for the analysis of its behavior based on the theory of soil reaction. Refinements and sophistications in the reaction modulus function by depth are not justified because the errors in the results of the calculations are very small compared with the ones involved in the estimation of numerical values of the modulus of the soil reaction. [7] completely agree with this assessment because the results are satisfactory and can be obtained for the majority of practical cases as simple forms of variation of the reaction modulus with depth. Additionally, in practical problems, the uncertainty inherent to the soil's behavior estimate based on conventional tests is generally compatible with the small errors that can be introduced by the depth using a simple form of the soil reaction modulus function.

[8] were the precursors to the presentation of curves obtained for horizontal loads tests on sandy soils. They presented these curves in the form of n_h at the y-axis and the displacement y_0 at the x-axis. To create these curves, the cited authors used eq. (4) by [9] for the displacement for the application of only one horizontal load parallel to the ground surface, i.e.:

$$y_o = \left(\frac{HT^3}{E_p I_p} \right) \Delta_y \quad (4)$$

Where: T is the relative stiffness between the pile and the soil, and for soils with sandy behavior and normally consolidated clays. It is defined by eq. 5:

$$T = \sqrt[5]{\frac{E_p I_p}{n_h}} \quad (5)$$

To calculate n_h , eq. 6 is used:

$$n_h = \frac{4,42H^{5/3}}{y_o^{5/3}(E_p I_p)^{2/3}} \quad (6)$$

In the present study, the soil characteristics are analyzed using geotechnical laboratory tests and in-situ tests, with the aim of predicting its behavior in terms of deformability, resistance and collapsibility. To determine the horizontal reaction coefficient (n_h), the curves of the horizontal reaction coefficients (n_h) vs. the horizontal displacement at the surface (y_o) were obtained based on the performed load tests adopting a range of horizontal displacement values. [8] proposed the curves (n_h) vs. (y_o) using values in the 6.35 to 12.70 mm range. Based on these authors' studies but making a small modification in the range, the range between 6.0 mm and 12.0 mm was adopted, which was used by [10, 11, 12, 13]. The curves of the horizontal reaction coefficients vs. horizontal displacement were divided into two groups: load tests performed with natural soil moisture content and load tests performed with pre-flooding.

2. Materials and Methods

The aims of this study were achieved based on geotechnical analysis of the soil under investigation, execution of caissons, conduction of load tests in a caisson and analysis of the obtained data.

2.1. Geological and Geotechnical Characteristics

The study was conducted at the experimental site located at the School of Civil Engineering, Architecture and Urban Studies (Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo) of the University of Campinas (Universidade Estadual de Campinas - Unicamp) in the municipality of Campinas, State of São Paulo, Brazil. The subsoil geotechnical properties were determined by the removal of undisturbed samples up to 8 m in depth and disturbed samples up to 9 m of depth (impenetrable). In-situ tests were performed: the standard penetration test (SPT) and the electric cone penetration test (CPT). The simple characterization tests are presented in Table 1, and the results for the triaxial tests, permeability tests, consolidation tests and the collapse index are presented in Table 2.

Table 1
Mean physical parameters of subsoil.

Layer (m)	LL (%)	PI (%)	γ_{nat} (kN/m ³)	w (%)	e	n (%)	SUCS
0 → 2.0	48	17	14.2	28	1.77	64	MH
2.0 → 8.0	45	10	14.9	27	1.60	61	ML
8.0 → 9.0	52	10	15.2	36	1.67	63	MH

LL- liquid limit; PI – plasticity index; γ_{nat} – natural specific weight; w – moisture content (Feb/2010); e – void ratio; n – porosity; * tests performed without deflocculant.

Source: Adapted from [14]

Table 2.
Resistance parameters, coefficients of permeability, compression indices of edometric test and collapse indices.

Depth (m)	1	2	3	4	5	6	7	8
C (kPa)	7	12	-	5	18	43	43	-
ϕ (°)	22	24	-	23	24	22	21	-
k (cm/s)	1.80	1.50	-	1.50	0.69	-	1.20	-
CI	0.33	0.42	0.26	0.29	0.16	0.15	0.15	0.13
CLI*(%)	6	23	20	27	7	9	11	0.10

C – cohesion; ϕ – Friction angle; k – permeability; CI – Compression index; CLI – Collapsivity index * Stress of 400 kPa

Triaxial test CU (total stress) test

Source: Adapted from [14]

The edometric tests conducted on undisturbed samples with flooding at different stress levels indicate the collapsible characteristics of the soil. Tests performed with tensions of 100 kPa, 200 kPa and 400 kPa. According to [15], indicated that the representative sample at 1 m of depth was observed to be collapsible, with a very elevated index for all the flooding stresses. For the 2 m and 3 m deep layers, it was possible to observe the low collapsibility index for the 100 kPa and 200 kPa stress, which in turn had a high index for the 400 kPa stress. Based on the data obtained for the 100 kPa stress, only the 1 m, 4 m and 8 m depths were observed to be collapsible. However, for the 200 kPa stress, only the 2 m and 3 m depths were not collapsible. Finally, for the flooding stress of 400 kPa, all of the depths were observed to be collapsible, with the exception of the 8 m depth. With the conduction of triaxial tests (CU), numerical values were obtained for the angle of friction and the cohesion intercepts (Table 2) for each depth. [16] verified a significant reduction of these values with the soil saturation.

The results for the SPT and CPT tests performed at 0.50 m from the caisson axis are presented in Table 3.

The grain size analysis indicates that the soil is mostly composed of silt and clay. However, its permeability characteristics with coefficients of the order of 1.5×10^{-3} cm/s

Table 3.
Results of the SPT and CPT tests.

Depth (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
N_{72}	2	4	4	4	4	5	6	8	45
q_c (MPa)	2.56	1.42	1.32	1.86	2.14	2.37	3.00	1.88	1.73
f_s (MPa)	36.6	2.5	2.2	17.9	15.4	22.3	42.0	36.8	63.4
F_R	1.4	0.2	0.2	1.0	0.7	1.0	1.4	2.0	3.7

N_{72} – SPT test penetration resistance index; q_c – CPT test point resistance; f_s – CPT test lateral resistance; F_R – friction ratio (f_s/q_c).

Source: Adapted from [17]

and its characterization through results of the CPT test, when using classification graphs, indicate that its behavior is that of a sandy soil. Therefore, the analysis will be performed based on parameters proposed for the soil of granular behavior.

The information obtained based on the cone penetration test (CPT) and the standard penetration test (SPT) regarding the resistance parameters, soil type and unsaturated condition allow the prediction of a low resistance and most likely collapsible soil.

2.2. Preparation of Caissons

Three caissons were built to perform the load tests: one to undergo the transversal load and two to serve as a reaction to the applied load. All of the caissons had lengths of 9 m, shaft diameters of 0.8 m, base diameters of 1.6 m and base heights of 0.7 m. The caissons were set up along the depth with 15 bars with $\phi=25.0$ mm and stirrups with $\phi=10.0$ mm, spaced every 15 cm in steel with $f_y=500$ MPa. The concrete used exhibited $f_{ck}=20$ MPa, and the slump test was equal to 22 mm. The caissons were built using a manual excavation process. The caissons were constructed in a manner in which they would not undergo significant structural strains when subjected to loadings.

2.3. Load Tests

Before the execution of load tests, trenches were excavated between the caissons at a depth of 0.60 m under the caisson top for alignment with the application axis of the horizontal load. The load tests were performed using a hydraulic jack with 500 kN capacity with a pump, applying the load on the test caisson at one side and reacting against two other caissons at the other side, as the model displays in Figs. 1 and 2.

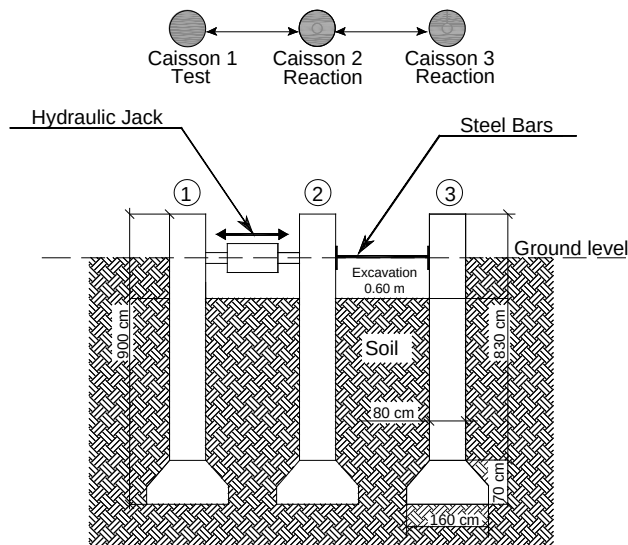


Figure 1. System setting.
Source: The authors.



Figure 2. Assembly detail.
Source: The authors.

To determine the load applied at the top of the caisson, a 500 kN load cell was used, and three deflectometers, with 0.01 mm precision, fixed on a reference beam were used for the measurement of the displacements. In two of the deflectometers, the readings were taken at the same level of the load application (horizontal), and in the third, the reading was taken along the vertical axis of the load.

Two load tests were performed in the same caisson following the guidelines of the standard [18]. The first test was of the slow maintained load type, with the soil in its natural moisture content state. The second, of the quick maintained load type, was performed after the superficial soil flooding with a pit for 48 h. The slow test was conducted with loads applied in equally increasing values, with readings of the displacements taken at pre-determined time intervals until the stabilization of the displacements, when a new load was increased, never more than 20% of the predicted working load. The consolidation was considered stabilized when the value read between the two successive times did not surpass 5% of the total consolidation of the loading stage. To perform the quick test, the load was maintained for 10 min, reading the initial and final stage values. The total load with an increase not higher than 10% of the working load proceeded until reaching twice the predicted working load for the caisson. Unloading was performed soon after the last loading stage in four load levels.

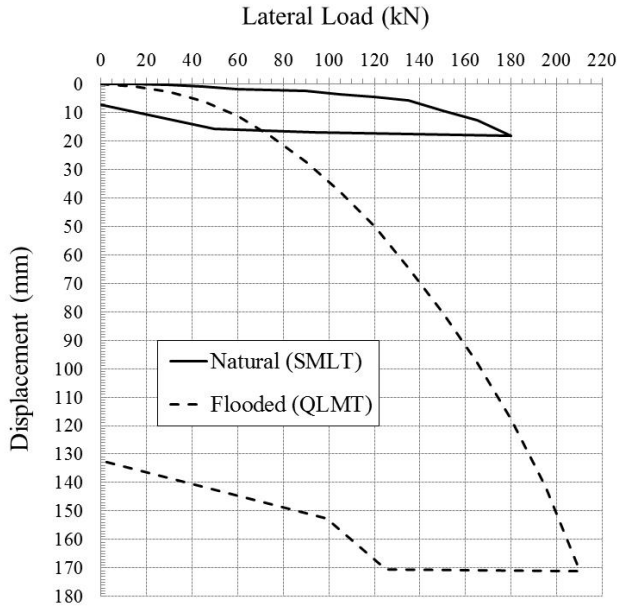


Figure 3. Load vs. horizontal displacement curves.
Source: The authors.

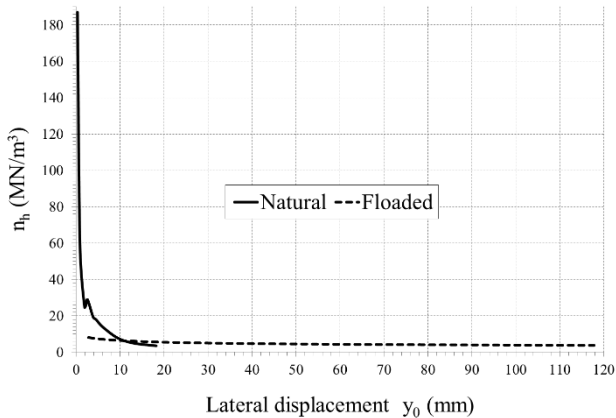


Figure 4. Graph of n_h vs. horizontal displacement.
Source: The authors.

3. Results and Analysis

Based on the performance of the load tests, the load vs. horizontal displacement curves were obtained. Plots of the horizontal reaction coefficient vs. horizontal displacement are presented in Figs. 3 and 4.

By analyzing Fig. 3, the displacement for each applied load level can be verified. For the admissible structure load of the caisson (140 kN), the horizontal displacement at the caisson top was observed to be 9 mm. The observations indicate that the curve obtained for the pre-flooded soil exhibited greater horizontal displacement for the same load applied.

The analyzed soil was lateritic and highly porous and unsaturated; its sand particles were cemented by clay and silt lumps, where the main minerals present were kaolinite and gibbsite. Hence, this soil had matrix potential because of the

Table 4. Values of horizontal loads, displacements and horizontal reaction coefficients.

Soil condition	Load to be displaced		Maximum values		n_h (MN/m³)
	6 mm	12 mm	Load	Displacement	
Natural	135 kN	165 kN	180 kN	18.17 mm	12
Flooded	47 kN	62 kN	210 kN	171.1 mm	6

Source: The authors.

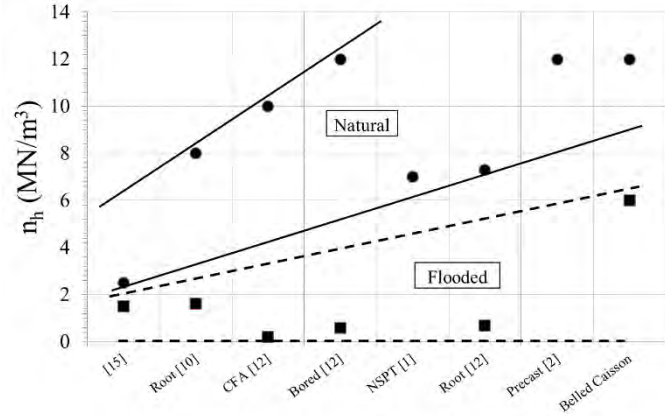


Figure 5. Graph of n_h vs. authors load tests.
Source: The authors.

suction, which was lost when the soil is flooded, leading to a reduction in the resistance. This phenomenon can be observed in the analysis of Fig. 3 and 4, where the loss of stability can be noted in the presence of water, thus reducing its resistance characteristics. Note that the n_h values in the pre-flooded situation practically do not vary, which demonstrates a resistance loss of the soil from the beginning of loading (Fig. 4). Table 4 presents the load and horizontal displacement values in addition to the results for the horizontal reaction coefficients as a function of the subsoil condition.

The pre-flooding of the soil caused a pronounced increase in the displacements for the same load applied in the tests with natural soil. The results proved that the pre-flooding caused a reduction of the applied load by 2.5 to 3 fold to reach displacements of 6 and 12 mm. These results demonstrate the intensity of the effect of the variation of the soil moisture on the horizontal displacement characteristics of the pile.

The values for the horizontal reaction coefficients obtained in the literature for different types of deep foundations built on soil with similar behavior to the one from the present study (under natural and pre-flooded conditions) are presented in Fig. 5.

By analyzing Fig. 5, it is verified that in piles built on similar soils (sandy behavior, unsaturated and lateritic), the values for the horizontal reaction coefficient vary between 2 and 12 MN/m³. With the exception of the precast concrete pile with 0.18 m and the foundation in this paper (belled caisson) with 0.8 m, the other piles exhibited diameters of 0.4 m. The observations indicate that the execution process of the pile did not affect the results. On the same graph (Fig. 3), the pre-flooding effect on the soil can be evaluated, with the reduction of n_h values, in some cases obtaining values lower than 1 MN/m³. Generally, the values were reduced by at least 50%.

4. Conclusions

Based on the results obtained and the analysis performed, the following can be concluded:

- Because the first few meters of the soil have a great effect on the horizontal loading, their proper geotechnical characterization in terms of porosity, resistance and collapsibility is important.
- The laboratory and field tests indicated a highly porous, collapsible and low resistance soil, allowing the prediction of low n_h values and the great effect of the variation in the soil's moisture content.
- The horizontal reaction coefficient obtained for the soil at its natural moisture content was 12 MN/m^3 , a higher value when compared with the literature for soils of high porosity, which suggests values of 2 MN/m^3 , thus indicating the importance of its determination for each type of soil and therefore avoiding generalizations.
- The loads for pre-flooded soil to reach certain displacement levels were observed to be on average three times smaller than the ones for the soil at its natural moisture content. For the horizontal reaction coefficient of the soil, the pre-flooded values were approximately 50% lower than the ones for the soil at its natural moisture content.
- For the collapsible soils, the analysis of the possibility of saturation or great humidity variation of the superficial soil during its construction service life was of fundamental importance in the determination of project parameters.

References

- [1] Décourt, L., Load-deflection prediction for laterally loaded piles based on N-SPT, *Proceedings of International Conference on Piling and Deep Foundations*, 4(1), pp. 549-555, 1991.
- [2] Carvalho, D., Albuquerque, P.J.R., Claro, A.T. e Ferreira, C.V., Análise de estaca carregada transversalmente no topo, em solo residual de diabásio, *Seminário de Engenharia de Fundações Especiais (SEFE 3)*, 1, pp. 145-154, 1996.
- [3] Velloso, D.A. e Lopes, F.R., *Fundações - Volume 2*. Rio de Janeiro: COPPE-UFRJ, 2002
- [4] Reese, L.C. and Van Impe, W.F., *Single piles and piles groups under lateral loading*. London: CRC Press – Taylor and Francis Group, 2011.
- [5] Valencia, Y., Camapum, J. y Lara, L., Aplicaciones adicionales de los resultados de pruebas de carga estáticas en el diseño geotécnico de cimentaciones. *Revista DYNA [Online]*, 79(175), 2012. [date of reference August 5th of 2016] Available at: <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/28167/43527>
- [6] Terzaghi, K., Evaluation of coefficients of subgrade reaction. *Géotechnique*, 5(4), pp. 297-326, 1955.
- [7] Matlock, H. and Reese, L.C. Generalized solutions for laterally loaded piles. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division - ASCE*, 86 (SM5), pp. 63-91, 1960.
- [8] Alizadeh, M. and Davisson, M.T., Lateral Load Tests on Piles – Arkansas River Project. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division - ASCE*, 96 (SM5), pp. 1583-1604, 1970.
- [9] Matlock, H. and Reese, L.C., Foundation analysis of offshore pile supported structures. *Proceedings of International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 5(2), pp. 91-97, 1961.
- [10] Miguel, M.G., Execução e análise de provas de carga horizontal em estacas em solo colapsível, MSc. Thesis, Department of Geotechnics, University of São Paulo, São Carlos, Brasil, 1996.
- [11] Menezes, S.M., Carvalho, D., Sampaio, F.M.T. e Ribeiro, K.D., Provas de carga horizontais em estacas pré-moldadas de concreto cravadas em solo de alta porosidade. *Seminário de Engenharia de Fundações Especiais (SEFE 5)*, 2, pp. 500-506, 2004.
- [12] Miranda Júnior, G., Estacas submetidas a esforços horizontais em solos colapsíveis do interior de São Paulo nas condições natural, melhorada e inundada. PhD. Dissertation, Faculty of Agricultural Engineering, University of Campinas, Campinas, Brasil, 2006.
- [13] Zammataro, B.B., Estudo de comportamento de estacas tipo escavadas e hélice contínua submetidas a esforços horizontais, MSc. Thesis, Department of Geotechnics and Transportation, University of Campinas, Campinas, Brasil, 2007.
- [14] Gon, F.S., Caracterização geotécnica através de ensaios de laboratório de um solo de diabásio da região de Campinas/ SP, M.S Thesis, Department of Geotechnics and Transportation, University of Campinas, Campinas, Brasil, 2011.
- [15] Vargas, M., *Introdução à Mecânica dos Solos*. São Paulo: McGraw - Hill do Brasil, 1978.
- [16] Paschoalin-Filho, J.A., Estudo do comportamento à tração axial de diferentes tipos de estacas executadas em solo de diabásio da região de Campinas-SP. PhD. Dissertation, Faculty of Agricultural Engineering, University of Campinas, Campinas, Brasil, 2008.
- [17] Rodriguez, T.G., Caracterização geotécnica de um solo de diabásio por meio de ensaios SPT e CPT M.S. Thesis, Department of Geotechnics and Transportation, University of Campinas, Campinas, Brasil, 2013.
- [18] Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 12131: Estacas – Prova de Carga Estática. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

R. Kassouf, received the BSc. In Civil Engineer in 1986, MSc. in Geotechnical Engineering in 2012, He is currently director - Roberto Kassouf Engenharia Ltd, since 1986. Professor of the Faculty of Integrated Metropolitan Campinas (Metrocamp) course in Foundations of Civil Engineering disciplines I and II and Soil Mechanics. Master in Civil Engineering from Unicamp - University of Campinas. Works in the area of Civil Engineering, with emphasis on Geotechnical, acting on the following topics: geotechnical investigation, deep foundations and foundation pathology.
ORCID: 0000-0002-2963-2883

D. Carvalho, received the BSc. In Civil Engineer in 1978, MSc. in Engineering in 1985, PhD. in Geotechnical Engineering in 1991. He is Associate Professor at University of Campinas since 1998, developing researches in Foundations, Soil Mechanics and In-Situ tests. He guided several students in geotechnical researches and has published papers in conferences and technical journals. Currently teaches classes for Civil Engineering, Agricultural Engineering and Geology.
ORCID: 0000-0002-5270-3627

P.J.R. Albuquerque, received the BSc. In Civil Engineer in 1993, MSc. in Engineering in 1996, PhD. in Soil and Foundation Engineering in 2001 and postdoctoral in 2010 at the Polytechnic University of Catalunya in Barcelona/Spain. He is Associate Professor at University of Campinas since 2001, teaching and researching, with emphasis in in-Situ tests, laboratory tests and foundations. He was the secretary of the Technical Commission of In-Situ Tests of the Brazilian Association of Soil Mechanics (ABMS) between 2007-2010 and the president for the Biennium 2011/2012. He is secretary of the Technical Commission of Foundation of the Brazilian Association of Soil Mechanics for the Biennium 2013-2016. In biennia 2013-2016 will act as Vice-President of the Regional Center of São Paulo (ABMS). Since 2015 is Brazilian representant of ABMS on TC102 Technical Commission of Foundations of ISSMGE.
ORCID: 0000-0003-0726-7165

The systemic approach as an analytical tool of an electronic device, case study: “iPod Nano seventh generation”

Diego Fernando Sánchez-Zambrano ^a & Oscar Mayorga-Torres ^b

^a Vicerrectoría de Investigaciones, Universidad Manuela Beltrán, Bogotá, Colombia. diego.sanchez@umb.edu.co

^b Facultad de Ingeniería, Universidad de la Salle, Bogotá, Colombia. osmayorga@unisalle.edu.co

Received: September 02nd, 2015. Received in revised form: February 20th, 2016. Accepted: July 22th, 2016.

Abstract

This article shows how the systemic approach, being a design tool for new products, can analyze objects in terms of its form, its function and ergonomics, while understanding the different elements of the product which become integrators design factors. And it becomes a tool of possible improvements in the product, giving the opportunity for a redesign. The study takes into account various tools used to redesign products, comparing with the proposed methods. As a studio unit, an electronic device of the 7th-generation -iPod was taken, emphasizing the most important features of this product specifically related to: external and internal geometry, performance and all the special design of the object. The main finding which should be mentioned is that the model of systemic approach integrates practices exposed methods, it is a complete methodology for the analysis and study of the electronic device.

Keywords: Systemic approach, Function, Ergonomics, Shape, Analysis of object, Methods

El enfoque sistémico como herramienta de análisis de un artefacto electrónico, caso de estudio: “iPod Nano de séptima generación”

Resumen

El presente artículo muestra cómo el enfoque sistémico, siendo una herramienta de diseño de productos, puede analizar objetos existentes en cuanto a forma, función y ergonomía, comprendiendo al mismo tiempo los distintos elementos que componen el producto los cuales se convierten en factores integradores del diseño. Convirtiéndolo en una herramienta de posibles mejoras en el producto, dando la oportunidad de un rediseño. El estudio toma en cuenta diversas herramientas que sirven para el rediseño de productos, comparando los métodos con el propuesto. Como unidad de estudio, se tomó un artefacto electrónico -iPod de 7ma generación-, recalando las características más importantes de éste producto específicamente, relacionándolo con: la geometría exterior e interior, las prestaciones y todas las particularidades de diseño. El principal hallazgo el cual a mencionar es que el enfoque sistémico integra las prácticas de los métodos expuestos, es una metodología completa para el análisis y estudio del artefacto electrónico.

Palabras clave: Enfoque sistémico, Función, Ergonomía, Forma, Análisis de objeto, Herramientas

1. Introducción

Los nuevos productos que las empresas ofertan en el mercado por lo general están basados en actualizaciones a productos existentes [1], esto se debe a que la implementación de innovaciones incrementales sea una estrategia adecuada y menos riesgosa en las empresas, ya que los consumidores son más dados a adoptar productos

mejorados que los que son radicalmente nuevos [2]. En consecuencia, ante este panorama, para las empresas se hace necesario aplicar durante el proceso de rediseño de un producto una serie técnicas o metodologías que permitan estudiar y analizar el producto que se desea modificar. Es importante tener en cuenta que estas técnicas son puntos de partida para dar evolución a estos nuevos productos.

Para analizar los productos, es importante tener en cuenta

How to cite: Sánchez-Zambrano, D. F. & Mayorga-Torres, O. El enfoque sistémico como herramienta de análisis de un artefacto electrónico, caso de estudio: “iPod Nano de séptima generación” DYNA 83 (199) pp. 140-147, 2016

tres elementos esenciales en cuanto a su diseño, con los cuales el producto es concebido y definido. Estas características son: la forma, la función y la ergonomía [3], que precisan e integran aspectos geométricos exteriores, interiores y la manera en cómo el objeto, en cuanto a dichas variables, se relaciona o interactúa con el usuario.

Los artefactos electrónicos de consumo, son productos que cumplen con las características mencionadas anteriormente; su integración en el diseño del producto, dan como resultado un objeto que satisface las múltiples necesidades del usuario.

El comportamiento del consumidor está influenciado por diversos factores que demarcan su interés por los productos electrónicos [4] y, dentro de los factores más relevantes para la adquisición de dichos productos, se encuentran los atributos físicos[5]. La configuración de la forma, la función y la ergonomía, dentro del concepto estructural, están asociados directamente con los atributos físicos; los productos van evolucionando de acuerdo a las distintas necesidades generadas por las demandas del consumidor e indiscutiblemente, por los avances tecnológicos propios del sector electrónico.

Por otro lado, los sistemas entran a formar parte fundamental en la implementación de la metodología sistémica [6]; por tanto, el concepto de sistema, definido como el *“conjunto de elementos que se relacionan ordenadamente entre sí contribuyendo con un fin u objetivo”* [7], es utilizado en este estudio de caso, afianzando su desarrollo bajo el enfoque sistémico donde el proceso da como resultado, un diseño conceptual del producto.

De tal manera, se manejan variables que se relacionan con un entorno, especificando a los productos dentro de su diseño; dichas variables llegan a modificar estos objetos electrónicos en los componentes de forma, función y ergonomía. Así mismo, se van creando atributos físicos dentro del producto que satisfacen una diversidad de requerimientos. Es por esto, que la metodología sistémica colabora eficazmente en la generación del concepto de un producto [6].

Es importante recalcar que existen técnicas o métodos para analizar los objetos, y estas son utilizadas para el rediseño de un producto como una importante herramienta para el éxito empresarial [1], a continuación, se mencionan algunas técnicas que permiten hacer un estudio de los productos físicos.

La ingeniería a la inversa es una de las técnicas que se pueden utilizar para analizar y observar los atributos físicos de un producto existente, así extrayendo la información de una manera muy precisa [8], esta información recolectada a partir de piezas, modelos o el producto físico posibilita rediseñar un objeto estableciendo oportunidades de mejora, por lo tanto, se pueden crear nuevos diseños y realizar nuevos desarrollos de productos [9]. La Ingeniería Inversa se basa en la utilización de un escáner que captura las dimensiones, forma y aspectos geométricos del producto; ésta información queda digitalizada en un software dónde se puede acceder para examinar el producto y modificar, adaptar o crear nuevos atributos en el objeto [10]. La ingeniería a la inversa prácticamente va a propiciar el reconocimiento de un producto del cual no se tenía la mayor información técnica,

se puede afirmar que ésta técnica se utiliza para la generación de productos a partir del conocimiento que se adquiere tras comprender los elementos técnicos del diseño en cuanto a forma, función, estructura, ergonomía entre otros.

También se puede reseñar otro método para comprender el funcionamiento de un producto con sus distintos componentes, Lawrence D. Miles dentro de la ingeniería del valor estableció una técnica denominada el análisis funcional [11], éste método parte de entender cuáles son los principios de funcionamiento de un producto, vislumbrando que es lo esencial dentro del producto para que cumpla con el propósito fundamental, de esta manera se concentra en cómo el producto debe cumplir con su fin [12]. Esta herramienta se adentra en todos los mecanismos y acciones necesarias que debe ejecutar el producto en su totalidad para poder satisfacer las necesidades de un usuario, por lo tanto genera la oportunidad de solucionar un problema a partir de la exploración, estudio e inspección que se realiza de cada uno de los componentes que se ven involucrados tanto en la función principal como en las funciones secundarias que se derivan; cuando es analizado el producto con esta técnica se pueden detectar oportunidades de mejora en el sistema de funcionamiento; en este caso se puede generar un diseño más óptimo con respecto al analizado que pueda cumplir la misma función buscando distintos componentes que sean apropiados y capaces de realizar las funciones [13].

Otras técnicas que se pueden utilizar para el rediseño del producto, de acuerdo a lo que se necesite para mejorar o cambiar el producto en ciertos aspectos [14] son las siguientes:

La primera técnica es la de rediseño para la resolución de conflictos, su objetivo primordial es corregir los errores en el producto; esta técnica tiene un método que se reconoce como la matriz de dependencia de diseño (DDM) [15], la cual trata de encontrar las dependencias entre las funciones y los componentes del producto. En este caso la idea es identificar dependencias funcionales de los productos existentes usando la información para crear soluciones en el proceso de rediseño.

La segunda técnica es el rediseño para la reducción de costo, entendiendo que el costo de un producto es un elemento esencial para el éxito de una compañía por el margen de ganancia que puede obtener por la venta de este, en consecuencia, es de vital importancia ya que las decisiones de diseño afectan de manera considerable la calidad y el costo de un producto [16]. Un método para la reducción del costo es el *“modular eco-design method”* para equipos electrónicos y eléctricos, consiste en optimizar el diseño modular adaptándolo a nuevos ambientes, actualizándolo a nuevas tecnologías, entre otros, para lograr cambios más funcionales que físicos [17].

La tercera técnica a mencionar es la de rediseño para una familia de productos, en el cual se describe un método para el rediseño de productos heterogéneos hacia una familia de productos homogéneos, este método consiste en analizar los productos existentes para determinar las necesidades del consumidor realizando un estudio minucioso removiendo las los elementos inútiles, identificando los componentes y saber que funciones cumple, y así agrupándolos por funcionalidad para un desarrollo paralelo [18].

Una cuarta técnica es la de rediseño para la innovación de producto esta toma como base uno o dos referencias de productos y sigue un proceso dónde se tiene en cuenta el mercado objetivo, se identifican las necesidades, se selecciona los productos referencias, se identifican los componentes, se construye una tabla de análisis de los componentes, se extraen los componentes claves, se identifican los conflictos, se aplican principios de diseño y se verifican los resultados obtenidos. De esta manera se establece que los productos que ofrecen mayores conflictos entre las necesidades y los productos existentes generan productos con innovaciones significativas [14].

Estas técnicas sin duda pueden ser utilizadas para estudiar y analizar un diseño preexistente, ingeniería a la inversa permite examinar el producto desde su exterior más que todo en su configuración geométrica, el análisis funcional se concentra en el interior del producto detectando distintas alternativas en componentes para cumplir con su objetivo principal y las técnicas de rediseño se encargan principalmente de detectar conflictos, los cuales estimulan la innovación.

En esta oportunidad, el enfoque sistémico puede brindar un análisis más completo con respecto a los métodos y técnicas anteriores y se utiliza para realizar un estudio del objeto en los aspectos formal, funcional y ergonómico. Teniendo en cuenta una serie de restricciones que provienen del entorno que rodea el diseño del producto. por parte Se muestra la utilización de esta metodología como una técnica de análisis para productos existentes cambiando su principal manejo, sin embargo, estos análisis como los que se han relacionado va a permitir identificar elementos en los tres aspectos que se pueden mejorar dentro del producto.

2. Materiales y métodos

La teoría del enfoque sistémico [19], es una metodología de diseño que aborda el desarrollo de productos industriales aplicando la sistémica en el que recibe una información como requerimientos del cliente [20]; estos requerimientos, en muchos casos, están asociados a las emociones y no exclusivamente a los aspectos físicos del producto. Por lo tanto, se deben tener en cuenta como parte esencial del diseño del producto. Otros elementos adicionales que restringen y delimitan el diseño del producto, en la Fig. 1 se encuentra el entorno que lo rodea [21]. En consecuencia, al momento de ser diseñado, el entorno es un factor determinante en la definición del producto.

El modelo interactúa con las distintas restricciones y realiza una serie de transformaciones para que se precise el producto a nivel conceptual; una fase vital en el proceso del diseño del producto, es el diseño conceptual. Ulrich define que: “El concepto de un producto es una descripción aproximada de la tecnología, principios de trabajo y forma del producto. Es una descripción concisa de la forma en que el producto va a satisfacer las necesidades del cliente” [16]. Adicionalmente, en el modelo se especifica tanto la parte teórica como visual, es decir que, permite describir al producto textualmente y de manera simultánea (también se va expresando de manera gráfica), obteniendo una representación muy clara del objeto o producto.



Figura 1. Entorno del producto
Fuente: Adaptado de [21]

En la Fig. 2, se muestra el modelado de diseño con sus múltiples variables y los dos sistemas: el exterior y el sistema de referencia.

Inicialmente, los datos de partida del modelo son los requerimientos del cliente junto con otros tipos de requerimientos tales como: fabricación, proveedores, materiales, embalaje y transporte, ensamble, costos de producción entre otros. Lo anterior, representa el planteamiento de un problema, en donde el diseño final, genera una adecuada solución a éste. Se identifican las variables de entrada que van del sistema exterior al sistema de referencia y también las variables de salida.

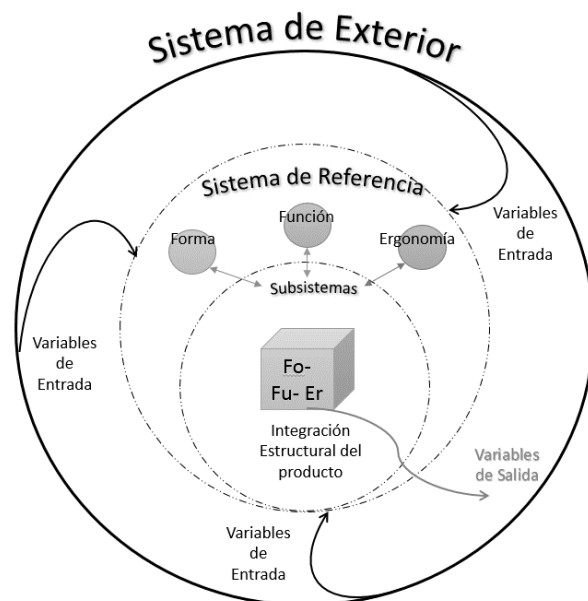


Figura 2. Modelado del diseño
Fuente: Adaptado de [6]

El Sistema Exterior se relaciona con el Sistema de Referencia, con las variables de entrada y las de salida.

Los factores integrantes del diseño son los elementos vitales para la gestión del nuevo producto y estos son los componentes que se encuentran dentro del sistema de referencia.

La forma, es la configuración de las superficies externas del producto que satisface los requerimientos de su parte estética. En este componente, se organizan los materiales por los cuales va a estar compuesto el producto; se denota la integración de las distintas piezas y la manera en la que va obteniendo su morfología.

Ésta puede ser representada por formas geométricas, orgánicas (curvas naturales) y la combinación de las dos, en donde la mayoría de los productos se ubican.

Por otro lado, la función agrega las acciones realizadas a través del producto para la satisfacción de las necesidades del usuario, suministrando aspectos tecnológicos, como los distintos mecanismos bien sean: eléctricos, electrónicos, físicos y mecánicos, que permiten a un producto dar el efecto deseado.

La forma y la función se entrelazan, proporcionando al producto un trabajo óptimo aseverando que no puede existir una función sino se tiene la forma apropiada, esta relación forma-función es transcendental dentro del diseño de cualquier objeto.

Por último, viene la ergonomía. A partir de la definición de la forma y la función, la ergonomía estudia la relación existente entre el objeto, el usuario y el contexto o entorno bajo el cual va a ser utilizado el producto [22]. Teniendo en cuenta aspectos como la morfología, la antropometría, la biomecánica y los sentidos del ser humano, la ergonomía reúne estos aspectos para que el producto se adapte al usuario de la mejor manera y pueda ser utilizado con facilidad.

Los elementos mencionados anteriormente, se establecen como subsistemas dentro del sistema de referencia y afectan todo el diseño del producto, complementándose así para alcanzar la definición conceptual de éste [23].

La metodología expuesta está concentrada en el modelo de diseño concurrente[6] específicamente en la estructuración del problema, el análisis teórico incluyendo las primeras fases hasta la fase informática, el hecho de tomar estos elementos de la metodología es porque esta parte del modelo permite analizar los productos en su esencia, puede tomar el producto existente y examinarlo a profundidad.

El enfoque sistémico del modelado de diseño, nos permite analizar los productos existentes en todas sus dimensiones, conociendo todos los elementos que fueron designados para el desarrollo de cada uno. Se plantea el modelo, como una herramienta de análisis, permitiendo llevar a cabo el estudio de un producto terminado, detectando a su vez, los elementos vitales en su diseño, ya identificada y analizada la composición y la configuración del producto se pueden establecer puntos de referencia para la mejora, modificación o creación de nuevos atributos generando un nuevo diseño que da como resultado una posible evolución del producto que de alguna manera tiene que actualizarse y adaptarse a las distintas tendencias, preferencias de los usuarios y tecnologías emergentes; generando un nuevo modelo. Es así como se realiza un estudio de caso, tomando como referencia

un artefacto específico: el reproductor de música *iPod de 7ma generación*. La razón para establecer como unidad de estudio el artefacto electrónico es porque este tipo de producto tiene características que dan un grado de complejidad, por lo tanto, los artefactos cumplen con funciones técnicas y estéticas, están compuestos de partes que se interrelacionan para el cumplimiento de tareas, es el resultado de un proceso de fabricación industrial, todas estas características se acoplan y permiten que la metodología del enfoque sistémico sea apropiada y pertinente para realizar un análisis del producto.

3. Resultados

En la Fig.3 se aprecia el producto seleccionado para realizar este estudio y la aplicación de la metodología, el reproductor de música *iPod Nano de 7ma generación*.

El modelo inicia con los datos de partida, reportando las exigencias del mercado para su diseño, como se aprecia en la Tabla 1.

La información del sistema exterior se deriva en variables de entrada tal cual se observa en la Tabla 2.

Con toda esta información, dada por el sistema exterior al sistema de referencia, nos introducimos específicamente en este último sistema, para así empezar el procesamiento de la información y realizar su transformación, alcanzando las variables de salida.

En el sistema de referencia, se desagrega la información en objetivos formales, funcionales y ergonómicos; por lo tanto, se inicia con los objetivos del subsistema formal como lo muestra la Tabla 3.



Figure 3. iPod Nano 7ma generación.

Fuente: "Apple Inc.," [Online]. Available: <https://www.apple.com/es/ipod-nano/>. [Accessed 7 julio 2015]

Tabla 1.

Datos del sistema exterior.

DATOS DE PARTIDA SISTEMA EXTERIOR
Consumidor: Hombres y Mujeres, Jóvenes, clase media, estilo de vida sofisticado y moderno.
Demandas del consumidor:
- Mejor sonido - Grabar notas de voz - Varias funciones - Portabilidad - Integración de radio - Alta fidelidad - Reproducción de música digital - Disminución en el tamaño - Variedad de colores - Facilidad en el uso - Sonido estéreo - Estilo y estética de moda - Capacidad de memoria - Marca e imagen - Innovación
Otros requerimientos:
- Materias primas - Mano de obra - Producción - Normalización - Ergonomía - Psicología - Facilidad de uso - Costos de producción - Diseño para ensamble

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.

Variables de entrada.

VARIABLES DE ENTRADA
- Normativas sobre sistemas de alimentación eléctrica. - Electrónica y electromagnética. - Proveedores de piezas plásticas, metálicas y electrónicas. - Normativas sobre derechos de autor. - Materiales: electrónicos, plástico.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.

Objetivos subsistema formal.

OBJETIVOS DEL SUBSISTEMA FORMAL
- Proporcionar un tamaño adecuado para el bolsillo. - Tener coherencia con el entorno. - Poseer botones físicos con formas geométricas y botón <i>home</i>. - Poseer pantalla táctil. - Soportar conexiones de audio y energía. - Dar forma que se adecue al entorno. - Adaptar colores y texturas estéticamente.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.

Objetivos subsistema funcional.

OBJETIVOS DEL SUBSISTEMA FUNCIONAL
- Emitir audio estéreo. - Poseer mandos de control para volumen y sintonización. - Reproducir música, videos, fotos digitales. - Poseer conexión inalámbrica. - Poseer radio. - Tener componentes livianos. - Ahorrar energía.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.

Objetivos subsistema ergonómico.

OBJETIVOS DEL SUBSISTEMA ERGONÓMICO
- Poseer botones de fácil uso y de grosor adecuado. - Tener nitidez en el sonido. - Poseer un tamaño adecuado al entorno. - Poseer texturas agradables al tacto. - Adaptar al tamaño de la mano y los dedos. - Utilizar de manera fácil e intuitiva. - Dar buena resolución, iluminación e información adecuada en la pantalla. - Dar un buen ajuste en la cabeza y en las orejas de los auriculares.

Fuente: Elaboración propia.

Estos objetivos se verán reflejados básicamente en los componentes, partes o piezas externas del producto. Posteriormente, se establecen los objetivos del subsistema funcional que se describen en la Tabla 4.

El último objetivo que se plantea es el del sistema ergonómico, los cuales se pueden ver en la Tabla 5.

Los subsistemas contienen tres elementos con los cuales se distribuyen todos los componentes que contiene el producto, estos elementos determinan la disposición geométrica de los componentes del producto, es decir, la organización que tienen las partes del producto tanto a nivel externo, interno y que se relacionan con la ergonomía [16]. Los elementos que constituyen cada sistema son los volúmenes de uso, superficies de uso y los límites de contorno. A continuación, podemos ver una descripción más precisa de estos elementos en la Tabla 6.

La representación gráfica de estos elementos se puede ver en la Fig. 4.

Tabla 6.

Volúmenes, superficies y límites de contorno.

Elemento	Característica
Volúmenes de uso	Espacios tridimensionales que ocupan un lugar en el producto.
Superficies de uso	Áreas planas de uso del producto.
Límites de contorno	Líneas que delimitan el uso del producto.

Fuente: Elaboración propia.

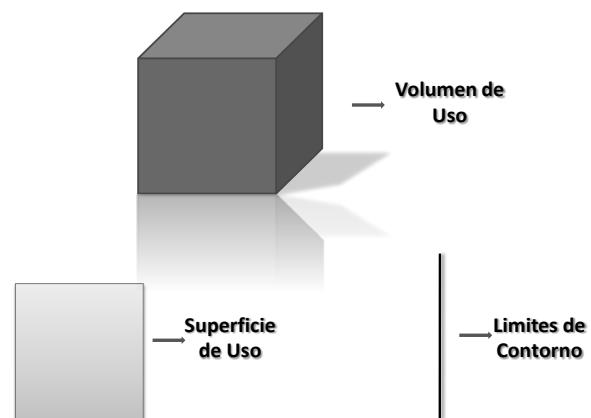


Figura 4. Elementos de los subsistemas.

Fuente: Adaptado de [23]

De esta manera, podemos identificar todos los elementos que componen el iPod, tanto a nivel interno como externo. En consecuencia, la Tabla 7 ejemplifica a nivel funcional el tipo de componentes que tiene el reproductor.

Identificados los componentes internos del producto -los cuales permiten analizar cómo se encuentran dentro del dispositivo-, se observa que, dependiendo la disposición de cada elemento interno, se externaliza el producto en cuanto a su diseño exterior. En la Tabla 8, se especifican los componentes visualizados dentro de éste nivel, en el subsistema formal.

Tabla 7.
Subsistema funcional.

SUBSISTEMA FUNCIONAL
Volúmenes de Uso: • Pantalla líquida • Batería de Li-ion • Placa lógica • Memoria • Antena Bluetooth
Superficies de Uso: • Cables planos unión componentes internos • Soldaduras que adhieren los componentes • Contacto entre el plug y la salida de los auriculares • Contacto entre el plug y el cable de energía
Límites de contorno: • Carcasa con componentes internos • Pantalla LCD con batería • Pantalla con la tarjeta lógica

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8.
Subsistema formal.

SUBSISTEMA FORMAL
Volúmenes de uso: • Carcasa • Tapa protectora • Botón de encendido • Botón de control volumen • Cable de energía • Cable auriculares
Superficies de uso: • Contacto de botón de encendido • Contacto de botón de volumen • Pantalla táctil • Contacto botón <i>home</i>
Límites de contorno • Marco pantalla con carcasa • Pantalla con marco • Botón <i>home</i> marco pantalla • Ranura plug de energía y auriculares con carcasa • Botones encendido y volumen con carcasa

Fuente: Elaboración propia.

Determinando todos los componentes del producto, tanto a nivel interno como a nivel externo en los subsistemas funcional y formal, se debe distinguir cómo afectan estos elementos la parte ergonómica del producto. Por ende, en la Tabla 9, también se identificaron los componentes que se relacionan con el usuario para la utilización del producto.

Tabla 9.
Subsistema Ergonómico.

SUBSISTEMA ERGONÓMICO
Volúmenes de uso: • Dimensión y peso de la carcasa • Botones de encendido y apagado de fácil utilización • Display con buena visualización
Superficies de uso: • Pantalla multi táctil con rápida respuesta • Material parte trasera con textura cómoda y agradable al tacto • Contactos botones encendido y apagado fácil manipulación • Auriculares contacto conector
Límites de contorno: • Distancia Bluetooth • Visualización tamaño iconos

Fuente: Elaboración propia.

Terminado el proceso de identificación de partes y componentes del producto, se procede a hacer una representación gráfica que permitirá observar en detalles cómo se disponen los distintos elementos del producto.

En la Fig. 5 Se verá la representación gráfica de la disposición geométrica a nivel interno del iPod, allí se precisa el contenido de una tarjeta lógica -en la parte inferior-detrás del botón *home*, donde se encuentran distintas ranuras para llevar los diferentes componentes electrónicos, donde se destaca *la memoria*, uno de los componentes que se comparte con otras versiones de *iPod*, integrándolos mediante los circuitos; la totalidad de los componentes van soldados a dicha placa o tarjeta. Ésta última, va conectada a la pila que va en la parte superior -detrás de la pantalla-, la cual está en la parte frontal del dispositivo; la antena Bluetooth que permite conectar el dispositivo de forma inalámbrica a unos altavoces, es otra pieza que está estandarizada por ser común en otras gamas de *iPod* y se posiciona debajo de la pantalla ubicada en la parte frontal a los botones (*home*, encendido, volumen audio) hallados debajo, al lado y encima de la pantalla respectivamente. Tanto los botones *home* cómo de *encendido* son componentes estándar que se usan para el *iPod Touch* 6ª generación. Adicional a ello, se vincula a las conexiones de auriculares y por supuesto, a la entrada de energía del dispositivo, dispuesto en la parte inferior.

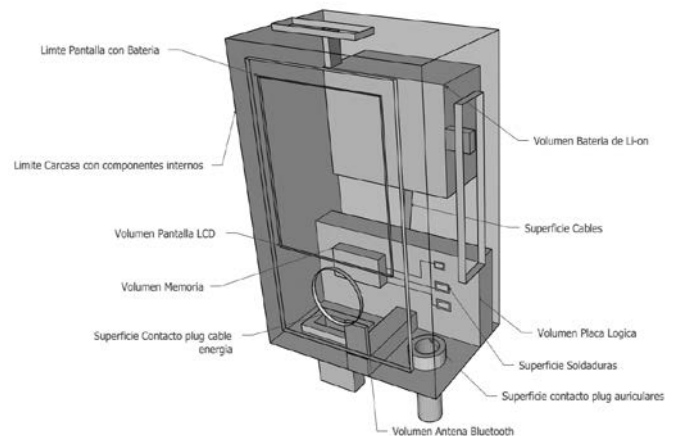


Figura 5. Disposición geométrica interna.

Fuente: Elaboración propia

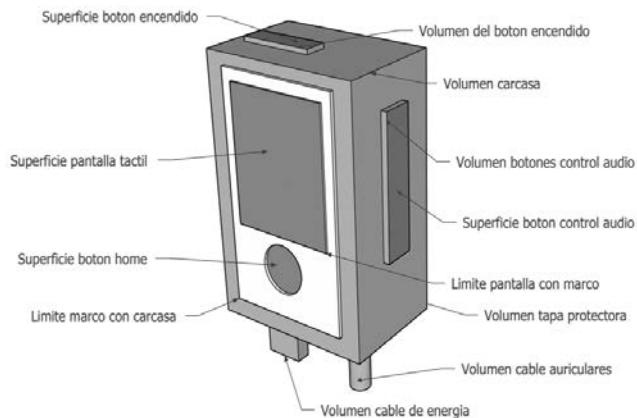


Figura 6. Disposición geométrica externa.
Fuente: Elaboración propia

El esquema gráfico geométrico interno, permite ver y analizar la disposición de los componentes del producto a nivel externo que, evidentemente, depende de cómo se ha configurado en su parte interna. En la Fig. 6 se puede visualizar la organización de los elementos internos y su repercusión directa en la disposición formal del producto. Se observa que la carcasa -como una estructura-, contiene y protege los componentes descritos dentro del subsistema funcional. Es importante tener en cuenta toda la acomodación y estructuración que tiene el producto, en cuanto a todos sus componentes, los cuales afectan su ergonomía. La carcasa que sostiene los componentes internos, es bastante delgada con un grosor de 5 milímetros, fabricada con aluminio anodizado el cual aumenta la protección contra los factores ambientales y, genera una sensación agradable al tacto.

Se puede apreciar la pantalla de tamaño alargado y posición frontal para uso táctil; el botón *home*, que permite el regreso a la pantalla principal del sistema operativo cuando entra en operación el dispositivo, es circular, acomodándose perfectamente al pulgar del usuario. Los otros botones, encendido y *control de volumen*, que se acomodan en la parte de arriba y en la parte lateral del producto pueden ser manipulados con los dedos de una sola mano fácilmente.

La conexión de los auriculares, se encuentran en la parte inferior, dificultando un poco el uso del producto dado que, para conectarlos, el usuario debe dar vuelta al producto causando un doblez en el cable. En cuanto a la ubicación de la conexión de energía, por la parte inferior, es favorable porque de alguna manera el dispositivo no va a estar en uso mientras carga.

La nueva generación de productos como son los reproductores de música portátil, en este caso el iPod, aplica toda su tecnología para el diseño de nuevos productos. La miniaturización de los componentes electrónicos ha hecho que tecnológicamente, se implemente el minimalismo donde se utilizan elementos mínimos y básicos colores puros, así como formas geométricas sencillas. Lo principal en esta generación de iPod es la portabilidad; su diseño está basado en brindar un dispositivo muy compacto y fácil de llevar consigo.

La manipulación del objeto básicamente se realiza en la pantalla luminosa y multitáctil, donde da la información

completa y detallada sobre la utilización. Es definitivamente una interfaz sencilla e intuitiva del reproductor musical.

Es de señalar, que la tendencia a la extrema miniaturización puede llegar a incomodar a los usuarios, aunque si bien es muy bueno para la portabilidad de estos productos, en algún momento, puede ir en contra del manejo fácil, sencillo y cómodo de éstos.

Hoy en día, la gran mayoría de los productos se centran en lo que contiene la pantalla, pues es la que permite configurar y manejar los sistemas operativos de los objetos. Se puede afirmar entonces que la forma de los productos, de alguna manera, pasa a un segundo plano por lo que se empieza a hablar de un diseño interactivo, donde no solamente es importante los factores geométricos del producto sino toda la actividad y el diseño de interfaz, permitiendo un uso con gran facilidad.

4. Discusión y conclusiones

La metodología del enfoque sistémico del diseño se estableció como una herramienta de análisis de productos u objetos existentes, permitiendo evaluar el artefacto electrónico como el iPod. El comienzo de dicha metodología parte de los requerimientos, dados por el cliente, aquí se puede comparar con la técnica de rediseño para la innovación donde las dos primeras etapas a seguir son el establecimiento del mercado objetivo y la identificación de las necesidades, la metodología propuesta presenta similitud en este caso. Sin embargo, la técnica de rediseño para la innovación no analiza los otros factores del entorno que rodea al diseño del iPod; esta es la base para interpretar el diseño porque con estos requerimientos se restringe y se delimita el producto final. Se fue llevando a cabo el análisis de los factores más notables de su diseño en cuanto a su forma, sus funciones y su ergonomía.

La ingeniería a la inversa obtiene información exterior del producto de manera que el enfoque sistémico también puede observar y analizar el exterior del producto, pero adicional se estudiaron como esas partes exteriores del artefacto electrónico pueden afectar la ergonomía y de qué forma se ajusta mejor al usuario. El análisis funcional puede estudiar los medios con los cuales se ejecutan las funciones del producto, no obstante, el enfoque sistémico escudriñó los componentes internos y se evaluó mediante un gráfico como éstos tienen una disposición geométrica adecuada para que pueda funcionar así estableciendo parámetros de interrelación entre las partes internas y externas del artefacto electrónico.

Con respecto a la técnica de rediseño para la reducción de costo la descomposición modular que se practica allí se realiza también con el enfoque sistémico el cual descompuso el iPod, apreciando los distintos materiales en los que fue construido, las partes o piezas del cual estaba compuesto, las formas desde distintos ángulos y, por último, los aspectos de interface con respecto a la utilización del producto por el usuario, para agregar al enfoque sistémico dentro de sus restricciones que impone en el sistema exterior está el costo de producción del producto que delimita los cantidad de componentes en consecuencia se revisó que posibles piezas que podrían suprimirse, pero sin embargo para esta caso no

se encontraron partes a remover.

Al analizar la configuración interna y externa en cuanto a la identificación y disposición geométrica de todos los componentes de artefacto electrónico el enfoque sistémico permitió reconocer las partes que tienen en común con las otras referencias del IPod, justamente algo que admite la técnica de rediseño para una familia de productos.

La metodología del enfoque sistémico, permitió identificar los elementos esenciales del producto desde su interior hasta el exterior, comprendiendo el diseño en aspectos morfológicos, funcionales y ergonómicos. Esta compresión es importante, porque permite establecer qué puntos a favor y en contra contiene el dispositivo.

Uno de los puntos más importantes de esta metodología con respecto a las mencionadas tales como la ingeniería a la inversa, el análisis funcional y las 4 técnicas de rediseño es que el enfoque sistémico logra integrar y suplir cada una de ellas, también es un enfoque complementario en el momento que una empresa desee mejorar los productos existentes.

Es interesante observar cómo esta herramienta puede suponer un punto de partida para el mejoramiento de este producto en futuras versiones. Al analizar cada aspecto, se puede reconocer que el producto es susceptible de mejora en varios aspectos, los cuales podrían abarcar desde lo estético hasta lo ergonómico, incluyendo lo funcional.

La configuración geométrica exterior y estética de los productos va cambiando de acuerdo a las distintas tendencias que van apareciendo dentro del mercado; sin embargo, se ve afectada y se va complementando de acuerdo a los distintos mecanismos que hacen que funcione. Por lo tanto, los diseños de este producto dependen en gran parte, de la evolución tecnológica.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Manuela Beltrán y a la Universidad de la Salle por brindar el espacio y los recursos necesarios para llevar a cabo esta investigación y a los estudiantes de diseño de producto y proceso que con su discusión lograron abrir la posibilidad de usar esta herramienta.

Referencias

- [1] Li, Z.-S., Kou, F., Cheng, X. and Wang, T., Model-based product redesign, *Ijcsns*, 6(1A), pp. 100-108, 2006.
- [2] Maria, A.N.A. and Arango, A., Producto para gesta diseño ®, Un caso de innovación, 28(122), pp. 181-199, 2012.
- [3] Dumas, H. and Mintzberg, A., Managing the form, function, and fit of design, *Des. Manag. J. Former Ser.*, 2(3), pp. 26-31, 1991.
- [4] Colima, C., Ruth, A., Mendoza, R., De Colima, U. y Vega, Z.D., El comportamiento del consumidor en la adquisición de artículos electrónicos, 9(2), pp. 1538-1547, 2014.
- [5] Cardozo, J.J., Caracterización de los sistemas de productos en el marco de la personalización, la variabilidad y la diferenciación. Un estudio con expertos. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 22(2), pp. 278-291, 2014.
- [6] Hernandis-Ortuño, B. and Briede-Westermeyer, J.C., An educational application for a product design and engineering systems using integrated conceptual models, *Ingeniare. Rev. Chil. Ing.*, 17(3), pp. 432-442, 2009. DOI: 10.4067/S0718-33052009000300017

- [7] Cayo, M., et all, Diccionario de la real academia de la lengua española, 2015. [Online]. Available at: <http://lema.rae.es/drae/?val=sistema>.
- [8] Curtis, S.K., Harston, S.P. and Mattson, C.A., The fundamentals of barriers to reverse engineering and their implementation into mechanical components, *Res. Eng. Des.*, 22(4), pp. 245-261, 2011. DOI: 10.1007/s00163-011-0109-6
- [9] López, C.I., Pinillos, J.C. y Moreno, J.C., Comparación de dos métodos de diseño de implantes basados en tecnologías de ingeniería inversa, diseño e ingeniería, *BIOCAD / CAD / CAE, Ingeniería y Competitividad*, 16(1), pp. 61-68, 2014.
- [10] Tips, T., Backing into quality reverse engineering, pp. 44-47, 2013.
- [11] Alcaide, J., Diseño de producto: Métodos y técnicas. Tesis. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, 2001.
- [12] Cross, N., Métodos de diseño: estrategias para el diseño de productos. Ed.Limusa, 2008.
- [13] Wixson, J., Function analysis and decomposition using function analysis system technique, Lockheed-Martin Idaho Technol. Co., 1999.
- [14] Smith, S., Smith, G. and Shen, Y.T., Redesign for product innovation, *Des. Stud.*, 33(2), pp. 160-184, 2012. DOI: 10.1016/j.destud.2011.08.003
- [15] Chen, L., Macwan, A. and Li, S., Model-based rapid redesign using decomposition patterns, *J. Mech. Des.*, 129(3), pp. 283-294, 2007. DOI: 10.1115/1.2406099
- [16] Ulrich K. y Eppinger, S., Diseño y desarrollo de productos, Quinta ed. México, D.F.: Mc Graw Hill, 2013.
- [17] Yang, Q., Yu, S. and Sekhari, A., A modular eco-design method for life cycle engineering based on redesign risk control, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 56(9-12), pp. 1215-1233, 2011. DOI: 10.1007/s00170-011-3246-1
- [18] Salhieh, S.M., A methodology to redesign heterogeneous product portfolios as homogeneous product families, *CAD Comput. Aided Des.*, 39(12), pp. 1065-1074, 2007.
- [19] Carlos, J. and Westermeyer, B., New methods in design education: The systemic methodology and the use of sketch in the conceptual design stage., *Engineering*, 8, pp. 3365-3375, 2009.
- [20] Guerrero-Valenzuela, M., Hernandis-Ortuño, B y Agudo-Vicente, B., Estudio comparativo de las acciones a considerar en el proceso de diseño conceptual desde la ingeniería y el diseño de productos, *Ingeniare. Rev. chil. ing.* 22(3) pp. 398-411, 2014. DOI: 10.4067/S0718-33052014000300010
- [21] Rodríguez, M., Takeda, N. y Magaña, B., Modelo para el diseño competitivo de productos con orientación final al usuario basado en Inteligencia Competitiva y Tecnológica, *Puzzle Revista Hispana de la Inteligencia Competitiva*, 5(21), pp. 16-21, 2006.
- [22] Docente, D.A., A methodological alternative to design products, G.E.D.G. de Estudios, 2008.
- [23] Hernandis-Ortuño, B. and Iribarren-Navarro, E.R., Diseño de nuevos productos : Una perspectiva sistémica. Tesis de grado, Universidad Politécnica de Valencia, España 2000.

D.F. Sánchez-Zambrano, es graduado Ing. Industrial de la Universidad Sergio Arboleda, Colombia, en el año 2004, titulado como MSc. Universitario en Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos en 2007 de la Universidad Politécnica de Valencia, España. Docente Investigador de la Vicerrectoría de Investigaciones programa de Ingeniería Industrial Universidad Manuela Beltrán, Colombia desde el año 2007. Las áreas de interés incluyen: proceso de diseño, desarrollo de productos, Metodologías de Diseño.
ORCID: 0000-0002-6080-2860

O. Mayorga-Torres, es graduado Ing. industrial de la Universidad de la Universidad Distrital, Colombia, en el año 2000, titulado como Esp. en Ingeniería producción de la Universidad Distrital, Colombia, en el año 2004 y MSc. en Ingeniería Industrial de la Universidad Distrital, Colombia en el 2013. Docente investigador de la Universidad de la Salle, Colombia. Las áreas de interés incluyen: Gestión del conocimiento e innovación, proyectos industriales, metodologías de diseño y producción.
ORCID: 0000-0002-2354-3193

Characterization of product design process of a company that provides design services. Proposal based on a process approach

Jimmy Schwabe-Neveu^a, Paulina Fuentes-Stuardo^b & Juan Carlos Briede-Westermeyer^c

^a Gerente de Operaciones, Vigía Austral SpA, Puerto Varas, Chile, jsn@vigiaaustral.cl

^b Investigadora Independiente, Concepción, Chile, paulina.fuentes.st@gmail.com

^c Departamento de Arte y Tecnologías del Diseño, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile, jbriede@ubiobio.cl

Received: February 21th, 2016. Received in revised form: April 11th, 2016. Accepted: May 25th, 2016.

Abstract

This paper presents the product design process of a company that provides design services, from a process approach expressed in a process map. The study proposes a complementary look to current theoretical models representing the design process, which address the functional profile of the discipline from an independent perspective, separated from cross-functional interactions that support its business application. Accordingly, the designed process map represents the totality of the actions in product design, through the incorporation of creative, commercial and productive activities, and the emphasis on the relevance of conceptual and detailed design as operations leading relations between these activities; to promote thus a perspective of design action as a group of activities, resources and cross-functional relationships that encourage collaborative exploration of knowledge.

Keywords: Product design; process approach; process map.

Caracterización del proceso de diseño de productos de una empresa prestadora de servicios de diseño. Propuesta basada en un enfoque de procesos

Resumen

El presente artículo muestra el proceso de diseño de productos de una empresa prestadora de servicios de diseño, desde un enfoque de procesos materializado en un mapa de procesos. El estudio propone una mirada complementaria a los actuales modelos teóricos que representan el proceso de diseño, los cuáles abordan el perfil funcional de la disciplina desde una mirada autónoma, aislada de relaciones interfuncionales que apoyen su aplicación empresarial. En este sentido, el mapa de procesos diseñado representa la globalidad del accionar en el diseño de productos, a través de la incorporación de actividades creativas, comerciales y productivas, y el énfasis en la relevancia del diseño conceptual y de detalle como operaciones que impulsan las vinculaciones entre dichas actividades; para fomentar por consiguiente, una perspectiva de la acción del diseño como un conjunto de actividades, recursos y relaciones interfuncionales que instan la exploración colaborativa de conocimientos.

Palabras clave: Diseño de productos; enfoque de procesos; mapa de procesos.

1. Introducción

La competitividad de los mercados, basada en la segmentación y en la reducción de la vida útil de los productos, pone de manifiesto en las empresas la necesidad de adoptar con

mayor frecuencia y exactitud, un perfil creativo que les permita adaptar y/o modificar continuamente su oferta para diferenciarse de sus competidores y mantener o incrementar su participación en el mercado. Para lograrlo, el diseño de productos configura una alternativa capaz de dirigir los procesos de creatividad y materializar ideas con potencial innovador como una actividad

How to cite: Schwabe-Neveu, J., Fuentes-Stuardo P. & Briede-Westermeyer, J. C. Caracterización del proceso de diseño de productos de una empresa prestadora de servicios de diseño. Propuesta basada en un enfoque de procesos DYNA 83 (199) pp. 148-156, 2016

proyectual que no tan sólo busca concretar las nuevas ideas, sino que también, integrar una multiplicidad de factores [1], de modo tal de lograr un balance entre la creatividad y la rigurosidad de los procesos [2].

En general, el proceso de diseño asume las complejidades del producto, las cuales subyacen a cuestiones creativas, productivas, pero también, de mercado [3], lo que permitiría aproximarlo mediante un proceso de innovación incremental, debidamente posicionado en el contexto organizacional. No obstante, los modelos que actualmente se emplean en la representación del proceso de diseño, carecen de la capacidad para exponer la ejecución integrada del mismo, a través de por ejemplo, la integración de la visión ingenieril y la visión del diseñador [4]. En otras palabras, abordan el perfil funcional de la disciplina del diseño desde una perspectiva autónoma asociada a sus competencias propias y por tanto, aislada de sinergias e interacciones interfuncionales que apoyan su cometido en la empresa.

Bajo dicho contexto el presente artículo pretende caracterizar el proceso de diseño de productos enfocado en los procesos, considerando para ello una aplicación basada en las operaciones pertenecientes a una empresa prestadora de servicios de diseño. Se propone una mirada complementaria a la entregada por los modelos teóricos actuales, mediante la cual se vincule la actividad propiamente operativa del diseño con el quehacer de otras funciones de la organización, a través de un mapa de procesos que grafique una mirada integral de la globalidad que comprende la ejecución del proceso de diseño de productos en la organización, de modo tal de permitir en el futuro, la gestión de las instancias creativas y de los resultados a los que da lugar.

2. El proceso de diseño de productos

El diseño de productos busca, desde el punto de vista del diseño industrial, optimizar la función, el valor y la apariencia de productos y sistemas en beneficio de los fabricantes y de los usuarios [5]. Desde la perspectiva del diseño de ingeniería, se orienta a definir los ajustes y el perfil innovador requeridos por el producto, con el propósito de permitir la integración de nuevos sistemas sujetos a restricciones dinámicas [6]. En ambos sentidos, y según definen Ulrich y Eppinger [7], el proceso que permite obtener dichos resultados, en otras palabras, el proceso de diseño de productos, se refiere a “una serie de actividades que comienzan con la gestación de una idea innovadora y continúan con el desarrollo del concepto en sí mismo”.

Desde el punto de vista del diseño, el proceso de diseño de productos suele atribuirse a la actividad creativa en su esencia cognitiva. Desde el punto de vista de la ingeniería, se relaciona con la gestión de nuevos productos y la naturaleza proyectual a la cual se acoge [7]. En este sentido, el proceso de diseño de productos recoge los elementos que permiten desarrollar un producto desde su origen hasta el final de su vida útil, bajo la conducción de un equipo multidisciplinar [8].

En sí, el proceso de diseño implica enfrentarse al estudio de un problema para dar origen a una solución dotada de los elementos que son requeridos previamente, por lo tanto, el proceso se apoya del análisis y de la síntesis para la creación [4]. Bajo este escenario, el diseño conceptual asume un papel

fundamental, como una etapa propositiva en la que no tan sólo se definen las características del producto, sino que también, entre el 70% y el 80% del costo total de producción [9]. Por lo tanto, el diseño conceptual debe ejecutarse con rigor y cautela, de modo tal de evitar la aparición de errores complejos de remediar a medida que avanza el proceso de diseño. [10]. Desde luego, plasmar ideas de calidad contribuyen al perfil innovador del producto en cuestión [8].

Los modelos comúnmente utilizados para representar el proceso de diseño de productos evidencian la etapa conceptual como una práctica de compleja definición, a diferencia de las acciones que le preceden y le suceden, cuya naturaleza ingenieril les convierte en prácticas estructuradas y accesibles [4]. No obstante, la estrecha relación entre el proceso creativo y el proceso de producción, radica en la actuación de la fase conceptual, en la actuación de las especificaciones y de los objetivos de diseño como insumos de entrada que se interrelacionan para incorporar los requerimientos de los usuarios y otros, de índole obligatoria, según demande el producto y su desarrollo [11]. En este sentido, las interacciones del proceso de diseño de productos se circunscriben a los requerimientos que imponen el mercado, los consumidores y el departamento de producción [12].

Es en este contexto, en el cual prima el accionar creativo, que el proceso de diseño podría aproximarse mediante un enfoque de procesos basado en la innovación, lo que implica orientar elementos de entrada intensivos en conocimiento, secuencias y recursos de naturaleza compleja en cuanto a su origen y criterios de maniobra, medición y progreso; hacia la generación de elementos de salida dotados de un alto grado de novedad o mejoras [13], capaces de responder a las expectativas del cliente.

3. La gestión de procesos

La gestión de procesos es una visión holística que involucra a la empresa y su realidad, percibiéndola como un sistema de procesos interrelacionados orientados a incrementar la satisfacción del cliente [14]. Su importancia radica en la expansión de su contribución desde el ámbito productivo hacia otras áreas de la organización [15], como un enfoque diferenciado de la gestión empresarial tradicional, el cual despliega una visión transversal de la organización, acercándola al cliente y por tanto, enfatizando en la eficiencia de la cadena de valor que permite satisfacer las necesidades de los mismos [16]. Es una mirada organizacional flexible, cuya gestión permite servir de base para la definición e implementación de políticas y estrategias empresariales [17].

En el enfoque de procesos, el proceso se reconoce como el elemento básico [14], como la manera natural bajo la cual se organizan las labores en la organización [16]. Los procesos trascienden la estructura organizacional tradicional, impulsando una cultura en la cual prima la cooperación por sobre la jerarquía [17], orientándose horizontalmente y configurándose como un conjunto de actividades interrelacionadas, alimentadas de elementos de entrada y productoras de resultados asociados a un objetivo que permite crear valor para el cliente [14].

Desde una perspectiva operativa, la ejecución del proceso

es posible a partir de la actuación de personas organizadas bajo una estructura determinada, apoyadas por otros recursos y capacitadas para manipular información [18]. De ahí entonces, se desprende que en un proceso el concepto de inputs se amplía hacia la definición de recursos e interacciones que suministran, o bien, son parte de los elementos de entrada que ingresan a las actividades de transformación.

Lo anterior permite comprender los atributos funcionales de la gestión de procesos. A partir de una estructura procedimental extendida, se reconoce como una disciplina que apoya la identificación, representación, diseño, formalización, control, mejora y el incremento de la productividad de los procesos [18]. Desde una mirada procedimental reducida, se reconoce como una disciplina que da lugar al mapeo de los procesos, a su mejoramiento y a su integración en sistemas mejorados [15]. Por lo tanto, se reconoce necesaria la identificación y la vinculación de los procesos con otros para la consecución de un resultado en común, así como también, su disposición en un contexto en el cual las interacciones fluyan adecuadamente [16].

En este sentido, el mapa de procesos surge como un modelamiento visual que permite comprender el quehacer de la organización, a partir del reconocimiento de procesos específicos que actúan en su contexto: Los procesos estratégicos, los procesos del negocio y los procesos de apoyo [18]. Se trata de una herramienta que grafica un grupo de procesos organizados, por lo tanto, su diseño implica identificar los procesos relevantes para la organización y agruparlos de acuerdo a la naturaleza de sus roles [16], de modo tal de configurar un esquema desde el cual se perciba una mirada holística del conjunto en el contexto organizacional [18].

4. Materiales y Métodos

El objetivo del trabajo expuesto en el presente artículo es caracterizar el proceso de diseño de productos de una empresa prestadora de servicios de diseño, mediante un enfoque de procesos. Para ello, se recurre al mapa de procesos como herramienta desde la cual se grafique una mirada holística del conjunto de procesos que permiten diseñar un producto y por tanto, identifiquen al diseño de productos como un macroproceso que vincula las interacciones dadas por la actividad propiamente operativa de la disciplina y el quehacer de las funciones encargadas de relacionar a la organización con el mercado y con el proceso de producción.

Entonces, y como consecuencia de los requerimientos necesarios para diseñar el mapa de procesos, las acciones ejecutadas en el presente trabajo dicen relación con dos etapas: La identificación de procesos y la agrupación de procesos según su objeto.

Cabe mencionar que la clasificación de procesos a la que da lugar el mapa (procesos estratégicos, procesos operativos y procesos de apoyo) puede ser empleada independientemente del alcance que adopte la organización analizada. Es posible aplicarla a nivel de macro-organización (la organización en su completa magnitud) o micro-

organización (individualización de un ámbito de trabajo de la organización), cuidando de distinguir correctamente el rol y la relevancia de los procesos en el entorno en el cual se situarán [16]. En este sentido, el caso de estudio (proceso de diseño de productos) se expone como un sistema de procesos a nivel de micro-organización, dada su relevancia en la actividad que moviliza a la empresa (el diseño y desarrollo de soluciones innovadoras) y el carácter integrador que le permite articular sus esfuerzos junto a los de otros procesos (comercialización y producción) para contribuir con un resultado en común. Dichos criterios se manifiestan en la declaración de los lineamientos estratégicos de la empresa, su estructura organizacional y la activa intervención de la gerencia general en la ideación de los productos.

4.1. Identificación de procesos

La identificación de procesos se asocia al concepto de síntesis de la visión sistémica. Comprende definir los procesos como una competencia de la organización y a la vez, como una totalidad capaz de cumplir un objetivo de importancia y agregar valor al cliente. Entender un proceso como una competencia de la organización es un ejercicio que requiere ubicarlos en su entorno de actuación y alinear su existencia de acuerdo al quehacer de la organización. En tanto, comprenderlo como una totalidad, implica describirlo como una secuencia completa, desde una mirada que trasciende la estructura organizacional [18], reconociendo por tanto, la existencia de interfuncionalidad en las relaciones de trabajo y de un nivel de coordinación en los participantes, basado en el reconocimiento de la relevancia de su actividad en la organización [13].

Fundado en ello, la identificación de los procesos sugiere en primer lugar, conocer la misión organizacional y en segundo lugar, caracterizar los procesos desde las bases que otorga la misión reconocida. Considerando que el caso de estudio presentado corresponde a una micro-organización (proceso de diseño de productos) inserta en una macro-organización (la empresa) y por tanto, carente de lineamientos estratégicos susceptibles de ser referenciados para identificar los procesos que constituirán el mapa de procesos; se ha procedido a declarar una misión para el caso de estudio y a continuación, a caracterizar los procesos que lo identifican como un macroproceso de la organización.

La declaración de la misión para el caso de estudio (proceso de diseño de productos) comprende la individualización del caso de estudio, a través de la descripción general de la empresa de la cual es parte y de sus funciones propias, previo análisis de datos recopilados desde documentación corporativa y entrevistas realizadas a los departamentos involucrados. Posteriormente, la información resultante se decanta en la descripción de los elementos situacionales derivados de la palabra nemotécnica CATWOE (Customers, Actors, Transformation, Weltanschauung, Owners, Environment Constraints); elementos que permiten realizar una definición raíz del propósito de un sistema de actividades [19] y por tanto, alineados, dan origen a la misión propuesta.

Los elementos situacionales son precisados a partir de las orientaciones dadas por Sgourou et al. [19], Guerrero y Gómez [20] y Šooš et al. [21], las cuales se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1.
Directrices para la definición de los elementos situacionales.

Elemento Situacional	Definición
C: Customers / Clientes	Receptores de los resultados del sistema y por tanto, son quienes se benefician o perjudican con ellos.
A: Actors / Actores	Responsables de ejecutar las actividades pertenecientes al sistema, por tanto, son quienes ejecutan el proceso de transformación.
T: Transformation / Proceso de Transformación	Proceso que describe el funcionamiento del sistema, por tanto, transforma las entradas en salidas o resultados de calidad.
W: Weltanschauung / Visión del Mundo	Perspectiva o necesidad que da origen al sistema.
O: Owners / Propietarios	Dueños del sistema, por tanto, tienen el poder de decisión para ponerlo en marcha o bien, detener su funcionamiento.
E: Environment / Constraints / Restricciones del Entorno	Restricciones ambientales que influyen en el sistema, pero no lo controlan.

Fuente: Adaptado desde [19-21]

Tabla 2.
Diagrama SIPOC aplicado para la caracterización de los procesos.

Suppliers (Proveedores)	Inputs (Entradas)	Process (Procesos)	Outputs (Salidas)	Customers (Clientes)
Proveedores del proceso bajo estudio. Suministran las entradas.	Principales entradas del proceso bajo estudio. Serán transformadas.	Conjunto de operaciones que transforman las entradas en productos o servicios requeridos por los clientes.	Principales salidas del proceso bajo estudio. Producto o servicio requerido por los clientes.	Clientes del proceso bajo estudio. Reciben el producto o servicio.

Fuente: Adaptado desde [22]

La caracterización de los procesos que conforman el mapa de procesos para el caso de estudio (proceso de diseño de productos) comprende la determinación de las interacciones entre las funciones de la empresa participante, teniendo en consideración que su existencia debe alinearse a la misión declarada anteriormente. Para ello, empleando el diagrama SIPOC (Suppliers, Inputs, Process, Outputs, Customers), se define la relación del proceso con su ambiente [22] y en consecuencia, su alcance a partir de la descripción de los principales atributos que lo componen [16]. En base a las directrices de Sabir et al. [22], el diagrama SIPOC para la caracterización de los procesos, fue elaborado como se muestra en la Tabla 2.

4.2. Agrupación de procesos según su objeto

La agrupación de procesos según su objeto [14] implica clasificar los procesos identificados en tres categorías que caracterizan la naturaleza de sus roles: Procesos estratégicos, procesos operativos o del negocio [18] y procesos de apoyo [16]. Una vez agrupados, los procesos se ubican en el espacio para configurar el mapa de procesos.

Los procesos estratégicos se orientan a definir y controlar

las estrategias, políticas y objetivos de la empresa [18, 17]. Los procesos operativos se orientan a realizar las acciones que permiten desarrollar las estrategias y políticas definidas para dar servicio a los clientes [17]. Son también llamados como “procesos del negocio”, al relacionarse principalmente con la misión del negocio y por tanto, con los bienes o servicios ofrecidos por la organización para satisfacer necesidades específicas de los clientes [18]. En tanto, los procesos de apoyo sirven de soporte a los procesos operativos, por lo tanto, su rendimiento afecta el rendimiento de estos últimos [17].

En general, Torres [16] recoge y traduce dicho marco en criterios propuestos para facilitar la categorización de los procesos, algunos de los cuales se muestran en la Tabla 3. La agrupación de los procesos identificados en la etapa anterior se ha ejecutado en base a ello, considerando por lo tanto que si bien, la misión es representada por el conjunto, son los procesos operativos o del negocio los que permitirán visualizarla de manera más directa [18].

5. Resultados

5.1. Identificación de procesos

La empresa a la que pertenece el caso de estudio, es una organización dedicada al desarrollo y fabricación de soluciones plásticas, basadas en el moldeo rotacional, termoformado y soplado, principalmente dirigidas al sector acuícola y agrícola del país. Cuenta con una estructura organizacional funcional, segmentada en cuatro departamentos: Administración, Comercial, Producción y, Diseño y Desarrollo.

La empresa define su misión como “Investigar necesidades y oportunidades para entregar soluciones innovadoras a través de productos plásticos, considerando el diseño y desarrollo como factor clave para marcar una notable diferenciación de sus productos”. En tanto, su visión es “Entregar la más alta excelencia

Tabla 3.
Directrices para la definición de los elementos situacionales.

Criterio	Procesos Estratégicos	Procesos Operativos	Procesos de Apoyo
1	Permite definir y desplegar las estrategias y objetivos de la empresa	Inciden directamente en la satisfacción o insatisfacción de los clientes.	Necesarios para el control y mejora de los sistemas de gestión.
2	Intervienen en la visión de la empresa.	Intervienen en la misión de la empresa.	Se relacionan con asegurar el cumplimiento de estándares.
3	Proporcionan las guías de actuación de la empresa.	Consumen muchos recursos.	No intervienen en la misión ni visión de la empresa.
4	Relacionan la empresa con su entorno.	La optimización de sus procesos es clave para la competitividad de la empresa.	Proporcionan recursos a los procesos operativos.
5	Involucran a personal de primera línea, o de la alta dirección.	Son valorados por los clientes y accionistas.	Generalmente sus clientes son internos.

Fuente: Adaptado desde [16]

y calidad de productos, transformándose en la compañía guía en el desarrollo de productos de alto grado de innovación y eficiencia tanto en Chile como en el mundo”.

En particular, el estudio se ha centrado en caracterizar el proceso de diseño de productos dirigidos al sector acuícola; sector que manifiesta grandes proyecciones económicas, dada la relevancia de la industria del salmón en la canasta exportadora de Chile. Dicho proceso presenta dos versiones, dadas por la variedad natural de las operaciones que lo componen: El diseño de un producto propuesto por un Cliente y el diseño de un producto propuesto por la Gerencia General de la empresa. Si bien, la variedad de las operaciones subyace a la distinción de los agentes que gatillan el proceso de diseño; un elemento común en ambas alternativas dice relación con la necesidad de explorar y crear nuevo conocimiento para adaptar los requerimientos de dichos agentes a los métodos productivos propios de la empresa.

5.1.1. Diseño de un producto propuesto por un Cliente

El proceso de diseño de un producto propuesto por un Cliente tiene como propósito desarrollar el concepto del producto y validar dicho diseño mediante la fabricación de un prototipo del mismo. En él, la relación con el Cliente y con otros departamentos no se reduce sólo a la negociación económica del precio del producto, sino que posibilita la oportunidad de retroalimentación durante las actividades involucradas en el diseño del producto.

En particular, el diseño del producto comienza con una solicitud informal del Cliente, la cual es analizada con el fin de determinar la viabilidad de ser fabricada en plástico, y posteriormente, traducida a las tecnologías propias de la empresa para generar la planificación de los recursos comprendidos tanto en el diseño, como en la fabricación del producto.

Una vez contextualizado el producto, se inicia su diseño conceptual, a través de una metodología de tres fases (Definición de criterios de diseño, Selección, Integración) que permite reunir los elementos esenciales para incrementar la efectividad del proceso de diseño, y cuyos resultados se apoyan en bocetos integrados según la secuencia sistémica de la metodología [23]. En particular, la etapa de diseño conceptual, permite explotar el conocimiento acumulado por la empresa en proyectos anteriores, integrando el diseño de elementos estándares y por tanto, facilitando la resolución de cuestiones esenciales.

Finalmente, se inicia el diseño de detalle del producto, con el propósito de definir las especificaciones de sus atributos (dimensiones, capacidad, espesores, fijaciones, acabados, ángulos de desmoldeo, línea de partición del molde, materiales) y fabricar el prototipo que permitirá la validación del diseño. Por lo tanto, se incluye el diseño y la fabricación del molde que permitirá la fabricación del producto.

5.1.2. Diseño de un producto propuesto por la Gerencia General

El proceso de diseño de un producto propuesto por la Gerencia General busca deliberadamente incrementar la

oferta de la empresa. Tiene como propósito desarrollar el concepto del producto y validar dicho diseño, sin embargo, a diferencia de la versión anterior del proceso, la validación del diseño se consigue a partir de un prototipo o de una maqueta, según las probabilidades de éxito del producto en el mercado. Por lo tanto, es un conjunto de actividades de ejercicio, donde la relación con el solicitante (Gerencia General) y con otros departamentos involucrados, posibilita una oportunidad de retroalimentación que puede finalizar con la fabricación del producto o bien, continuar en el tiempo a partir del mejoramiento de la maqueta del mismo. En vistas de lo anterior, el diseño del producto sigue una secuencia similar a la versión anterior del proceso, no obstante, el diseño de detalle puede concluir con la fabricación del prototipo que permitirá la validación del diseño o bien, con la construcción de una maqueta. El diseño y fabricación del molde se incluye en el caso que se requiera de la fabricación del prototipo.

Esta información, decantada en los elementos situacionales “Customers”, “Actors”, “Transformation”, “Weltanschauung”, “Owners” y “Environment Constraints” se expone en la Tabla 4.

Los seis elementos situacionales constituyen el proceso de diseño de productos como un sistema de actividades, no obstante, al alinear los elementos “Customers”, “Actors”, “Transformation”, “Weltanschauung” y “Owners” en una declaración de misión, constituyen una manifestación del propósito que activa la organización [24], en este caso, el proceso de diseño de productos, como una micro-organización dentro de la macro-organización empresa. El elemento situacional “Environment Constraints” no es considerado en la declaración de misión dado que representa aspectos ajenos al quehacer del proceso bajo análisis.

En este sentido, la misión propuesta para el proceso de diseño de productos de la empresa es “El Departamento de Diseño y Desarrollo de Austral Plastics Chile S.A. provee al Departamento de Producción el diseño de productos de excelencia, basados en un alto grado de calidad e innovación, a través del desarrollo de su diseño conceptual y de detalle”. De acuerdo a ella, la razón de ser del proceso de diseño de

Tabla 4.
Elementos situacionales del proceso de diseño de productos.

Elemento Situacional	Definición
C: Customers / Clientes	El Departamento de Producción de Austral Plastics Chile S.A.
A: Actors / Actores	El Departamento de Diseño y Desarrollo de Austral Plastics Chile S.A.
T: Transformation / Proceso de Transformación	El diseño conceptual y de detalle de productos factibles de ser producidos en plástico.
W: Weltanschauung / Visión del Mundo	Diseñar productos de excelencia, basados en un alto grado de calidad e innovación, capaces de prestar soluciones efectivas para el sector acuícola de Chile y el mundo.
O: Owners / Propietarios	Austral Plastics Chile S.A.
E: Environment / Restricciones del Entorno	- Insuficientes competencias del personal de ventas para asesorar a los clientes respecto de las especificaciones técnicas de los productos. - El control de calidad de los productos se ejecuta bajo parámetros de evaluación desiguales a los parámetros de diseño.

Fuente: Los autores.

productos revela la significancia de la ejecución del diseño conceptual y de detalle para el diseño de productos de excelencia, transformándolos por tanto, en procesos fundamentales, los cuales recogen el inicio y la conclusión de la actividad creativa. Representan el tránsito que gesta una idea hasta el desarrollo de su prototipo, a través de instancias de síntesis cognitiva que involucran procesos de convergencia y divergencia. En base a esto, la definición de los procesos “Diseño y desarrollo de concepto” y “Diseño de detalle y evaluación” se muestra en el diagrama SIPOC que se expone en la Tabla 5.

clientes pertenecientes a cada uno de los procesos descritos, definen las interacciones que ocurren en el proceso de diseño de productos y con ello, la actuación de otros procesos que permiten completar el macroproceso; alineándose a la misión declarada.

El proceso “Diseño y desarrollo de concepto” es un proceso que gatilla las operaciones creativas en el proceso de diseño de productos, por lo tanto, sus entradas y proveedores configuran elementos que capturan las especificaciones. Los orígenes de las entradas, salidas, proveedores y demandadas

por el solicitante del producto. En tanto, sus salidas y clientes constituyen elementos que proveen información para la continuación del desarrollo del producto. De este modo, los elementos pertenecientes a este proceso manifiestan las interacciones entre diseño y mercado, dando lugar a los procesos “Negociación de nuevos productos”, “Planificación de nuevos productos”, “Evaluación de cartera de productos” y “Ventas”, los cuales, en consecuencia, concretan la fase conceptual del proceso de diseño.

En contraparte, el proceso “Diseño de detalle y evaluación” es un proceso que sucede al proceso “Diseño y desarrollo de concepto”, por lo tanto, sus entradas corresponden a las salidas del último proceso mencionado, configurando elementos que permiten la continuidad de las operaciones creativas y su finalización, dando lugar al prototipado. En este sentido, sus entradas y proveedores constituyen elementos que recogen las especificaciones requeridas por el fabricante del producto, en tanto, sus salidas y clientes constituyen elementos que proveen información para la fabricación del producto. En consecuencia, los elementos pertenecientes a este proceso manifiestan las interacciones entre diseño y producción, dando lugar a los procesos “Compra de materiales / piezas”, “Fabricación de prototipo” y “Fabricación de maqueta”, los cuales, en consecuencia, concretan la fase de ingeniería del proceso de diseño.

La definición de los procesos que surgen desde los procesos “Diseño y desarrollo de concepto” y “Diseño de detalle y evaluación”, se despliega en el diagrama SIPOC que se expone en la Tabla 6.

5.2. Agrupación de procesos según su objeto

Los procesos que constituyen el proceso de diseño de productos se clasifican según se muestra en la Tabla 7. Se observa que los procesos “Diseño y desarrollo de concepto” y “Diseño de detalle y evaluación” corresponden a procesos operativos, dada su naturaleza arraigada a la misión declarada para el proceso de diseño de productos. Respectivamente, constituyen procesos que inician y concluyen la actividad creativa y por tanto, en el global, actúan como receptores de los requerimientos de diseño y como proveedores de los resultados de diseño del proceso de diseño de productos hacia su cliente (El Departamento de Producción de la empresa).

Consiguientemente, los procesos “Planificación de nuevos productos” y “Evaluación de cartera de productos” corresponden a procesos estratégicos, dada la incidencia de la Gerencia General como órgano directivo orientador de la planeación estratégica y del control del proceso de diseño de productos, de acuerdo a la actualización de la cartera de productos. En tanto, los procesos “Negociación de nuevos productos”, “Venta”, “Compra de materiales / piezas”, “Fabricación de prototipo” y “Fabricación de maqueta”, corresponden a procesos de apoyo, soportes de las operaciones creativas en cuanto al levantamiento de las especificaciones dadas por clientes externos y la construcción de los ejemplares que servirán de prototipos o maquetas para el proceso de producción.

Tabla 5.
Caracterización de los procesos “Diseño y desarrollo de concepto” y “Diseño de detalle y evaluación”.

Proveedores	Entradas	Procesos	Salidas	Clientes
Diseñador (Departamento de Diseño y Desarrollo).	Brief de diseño.	Diseño y desarrollo de concepto.	Bocetos de investigación & exploración y presentación [23].	Diseñador (Departamento de Diseño y Desarrollo).
Cliente / Gerente General.	Know-how según áreas de dominio.		Bocetos conceptual, render y persuasivo [23].	Encargado Comercial Sector Acuícola (Departamento Comercial).
Encargado Comercial Sector Acuícola (Departamento Comercial).			Brief de diseño actualizado	Cliente / Gerente General.
Diseñador (Departamento de Diseño y Desarrollo).	Bocetos de investigación & exploración y presentación [23].	Diseño de detalle y evaluación.	Planos del producto.	Jefe de Producción (Departamento de Producción).
Jefe de Producción (Departamento de Producción).	Bocetos conceptual, render y persuasivo [23].		Listado de materiales del producto / Listado de piezas del producto.	
Soldadores de Maestría (Departamento de Diseño y Desarrollo).	Brief de diseño actualizado		Molde y Prototipo del producto / Maqueta del producto.	
	Know-how según áreas de dominio.			

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 6.

Caracterización de los procesos adicionales emanados de los procesos “Diseño y desarrollo de concepto” y “Diseño de detalle y evaluación”.

Proveedores	Entradas	Procesos	Salidas	Clientes
Cliente.	Solicitud de pedido.	Negociación de nuevos productos.	Brief de diseño / Informe de inviabilidad.	Diseñador (Departamento de Diseño y Desarrollo) Cliente.
Diseñador (Departamento de Diseño y Desarrollo).	Know-how según áreas de dominio.			
Encargado Comercial Sector Acuícola (Departamento Comercial).				
Jefe de Producción (Departamento de Producción).				
Gerente General.	Solicitud de desarrollo de nuevo producto.	Planificación de nuevos productos.	Brief de diseño / Informe de inviabilidad.	Diseñador (Departamento de Diseño y Desarrollo).
Diseñador (Departamento de Diseño y Desarrollo).	Know-how según áreas de dominio.			Gerente General.
Encargado Comercial Sector Acuícola (Departamento Comercial).				
Jefe de Producción (Departamento de Producción).				
Gerente General.	Carpetas digitales de productos.	Evaluación de cartera de productos.	Carpetas digitales de productos actualizadas.	Gerente General.
Diseñador (Departamento de Diseño y Desarrollo).	Know-how según áreas de dominio.			Diseñador (Departamento de Diseño y Desarrollo).
Encargado Comercial Sector Acuícola (Departamento Comercial).				Encargado Comercial Sector Acuícola (Departamento Comercial).
Jefe de Producción (Departamento de Producción).				Jefe de Producción (Departamento de Producción).
Encargado Comercial Sector Acuícola (Departamento Comercial).	Brief de diseño actualizado.	Venta.	Factura.	Cliente.
	Know-how según áreas de dominio.		Orden de Compra Interna.	Diseñador (Departamento de Diseño y Desarrollo).
Encargado de Adquisiciones (Departamento de Producción).	Listado de materiales del molde / Listado de piezas del molde.	Compra de materiales / piezas.	Materiales del molde / Piezas del molde.	Diseñador (Departamento de Diseño y Desarrollo).
	Orden de compra de materiales del molde / Orden de compra de piezas del molde.			
	Orden de compra de materiales del producto / Orden de compra de piezas del producto.			
	Know-how según áreas de dominio.			
Jefe de Planta (Departamento de Diseño y Desarrollo).	Planos del producto.	Fabricación de prototipo.	Prototipo.	Diseñador (Departamento de Diseño y Desarrollo).
Diseñador (Departamento de Diseño y Desarrollo).	Materiales del producto / Piezas del producto.			
	Molde.			
	Know-how según áreas de dominio.			
Operario (Departamento de Producción).	Planos del producto.	Fabricación de maqueta.	Maqueta.	Diseñador (Departamento de Diseño y Desarrollo).
Diseñador (Departamento de Diseño y Desarrollo).	Polietileno.			
	Know-how según áreas de dominio.			

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 7.
Segmentación de los procesos pertenecientes al proceso de diseño de productos.

Procesos	Criterios	Categorías
Planificación de nuevos productos. Evaluación de cartera de productos.	Permite definir y desplegar las estrategias y objetivos de la empresa. Proporcionan las guías de actuación de la empresa. Relacionan la empresa con su entorno.	Estratégico
Diseño y desarrollo de concepto. Diseño de detalle y evaluación.	Inciden directamente en la satisfacción o insatisfacción de los clientes. Intervienen en la misión de la empresa. Consumen muchos recursos. La optimización de sus procesos es clave para la competitividad de la empresa. Son valorados por los clientes y accionistas.	Operativo
Negociación de nuevos productos. Venta. Compra de materiales / piezas. Fabricación de prototipo. Fabricación de maqueta.	No intervienen en la misión ni visión de la empresa. Proporcionan recursos a los procesos operativos. Generalmente sus clientes son internos.	De Apoyo

Fuente: Elaboración Propia.

Finalmente, la caracterización del proceso de diseño de productos, se expone en el mapa de procesos presentado en la Fig.1, configurando un macroproceso que reúne los procesos agrupados y en consecuencia, establece una visión global de las interacciones entre las actividades creativas, las actividades comerciales y las actividades productivas, representando en su conjunto, el accionar de la empresa al momento de enfrentarse al diseño de productos para la industria manufacturera del sector acuícola.

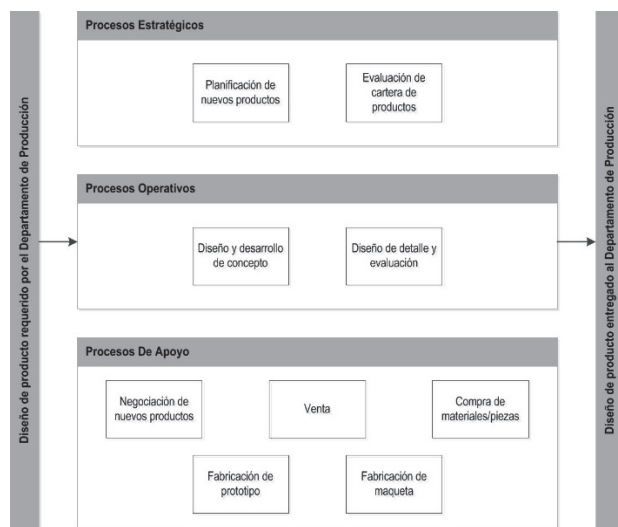


Figura 1. Mapa de procesos para el proceso de diseño de productos.
Fuente: Elaboración Propia.

6. Conclusiones

El trabajo ha presentado el proceso de diseño de productos de una empresa prestadora de servicios de diseño, desde un enfoque de procesos plasmado en un mapa de procesos. En él se grafica el proceso de diseño de productos, como un macroproceso inserto en la organización, el cual manifiesta, mediante la reunión de procesos estratégicos, operativos y de apoyo, una mirada global de las interacciones que ocurren entre la actividad creativa, la actividad comercial y la actividad productiva de la empresa para desarrollar un producto previo a su fabricación.

El encadenamiento metodológico utilizado ha dado lugar a una estrategia que no tan sólo permite el alineamiento de la misión propuesta para el proceso de diseño y los procesos involucrados en él para representar la globalidad del accionar en su conjunto; sino que también, el reconocimiento del diseño conceptual y del diseño de detalle como operaciones claves en el proceso de diseño de productos, las cuales impulsan las vinculaciones entre diseño, mercado y producción. En este sentido, el diseño conceptual del producto actúa en un entorno de procesos en el que prevalecen las interacciones entre diseño y mercado, otorgando un rol clave y activo al agente que solicita el producto, como elemento cuya participación creativa y evaluadora permite alejar el producto de posibles desviaciones que retrasen su fabricación. En tanto, el diseño de detalle actúa en un entorno de procesos en el que las interacciones entre diseño y producción predominan. Desde el punto de vista del método, el diseño de detalle requiere que las aportaciones del área de diseño y del área de producción de la empresa manifiesten coordinación, asegurando el orden y la comunicación de la información, con el propósito de evitar la interrupción del tránsito del proceso de diseño de productos y por consiguiente, del desarrollo del producto.

En esencia, el mapa de procesos ha demostrado la posibilidad de abstraer las operaciones teóricas de un proceso de diseño, y presentarlas desde una perspectiva en la cual no actúan aisladas, sino que orientadas como un conjunto de actividades, recursos y relaciones interfuncionales, dotadas de competencias que instan la activación de un proceso creativo, de innovación y la exploración colaborativa de conocimientos para responder a las demandas de un cliente determinado.

No obstante, la significancia de caracterizar el proceso de diseño de productos mediante un mapa de procesos se extiende más allá del ordenamiento y la visualización de los procesos interrelacionados que permiten realizar el diseño de productos en la empresa. Posibilita comprenderlos e iniciar su gestión y mejoramiento continuo, por lo tanto, se torna fundamental desplegarlos, detallar sus componentes e insertarlos en la estrategia de la organización. De este modo, los resultados se perfeccionan y asimismo, se facilita la creación de conocimiento en la organización que tiene que ver con el tratamiento del diseño, su incentivo, la reducción del re-diseño y en particular, la comunicación del diseño al cliente, concientizando respecto de la importancia de elementos como por ejemplo, la ergonomía y la forma en productos que en la actualidad se requieren efectivos sólo en

términos de funcionalidad. De ahí entonces que el impacto mayor de la debida instalación, utilización y actualización de la propuesta dada en el presente trabajo, es su rol como motivador de acciones colaborativas e interfuncionales que permitan crear en el cliente perteneciente a la industria manufacturera tradicional (de pensamiento más funcional que flexible), la necesidad del desarrollo de productos que, en lugar de considerar los elementos necesarios en su diseño para cumplir con un fin determinado, integren los elementos que agreguen valor a dicha funcionalidad.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Comisión Nacional Científica y Tecnológica a través de su proyecto FONDECYT No 11121750

Referencias

- [1] Aguayo, F. y Soltero, V., Metodología del diseño industrial: Un enfoque desde la ingeniería concurrente. Madrid: Ra-Ma, 2002.
- [2] Brattström, A., Löfsten, H. and Richtnér A., Creativity, trust and systematic processes in product development, *Research Policy*, 41(4), pp. 743-755, 2012. DOI: 10.1016/j.respol.2011.12.003
- [3] Robert, M., El Nuevo Pensamiento Estratégico. Madrid: Mc Graw Hill, 2006.
- [4] Guerrero, M., Hernandis, B. y Agudo, B., Estudio comparativo de las acciones a considerar en el proceso de diseño conceptual desde la ingeniería y el diseño de productos, *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 22(3), pp. 398-411, 2014. DOI: 10.4067/S0718-33052014000300010
- [5] The Industrial Designers Society of America, IDSA. What is industrial design? 2015, [en línea], Disponible en: <http://www.idsa.org/education/what-is-industrial-design>
- [6] Zhong, H., Wachs, J.P. and Nof, S.Y., HUB-CI model for collaborative telerobotics in manufacturing, *Intelligent Manufacturing Systems*, 11(1), pp. 63-68, 2013. DOI: 10.3182/20130522-3-BR-4036.00059
- [7] Ulrich K. and Eppinger, S., Product Design and Development. McGraw-Hill Higher Education; 5 edition. 432 P., 2011.
- [8] Lloveras, J., Creatividad en el diseño conceptual de ingeniería de producto. *Revista Creatividad y Sociedad*, (10), pp. 133-145, 2007.
- [9] Ehrlenspiel, K. and Dylla, N., Experimental investigation of designers thinking methods and design procedures, *Journal of engineering design*, 4(3), pp. 201-202, 1993. DOI: 10.1080/09544829308914782
- [10] Ehrlenspiel, K., Kiewert, A. and Lindemann, U., *Kostengünstig entwickeln und konstruieren: kostenmanagement bei der integrierten produktentwicklung*. Berlin: Springer, 1998.
- [11] León, R., Sistémica aplicada al diseño de productos en Venezuela: El diseño conceptual como parámetro de partida para el diseño de nuevos productos, Tesis de Doctorado, Departamento de Ingeniería Gráfica, Universitat Politècnica de Valencia, Valencia, España, 2009.
- [12] Hernandis, B. and Briede, J., An educational application for a product design and engineering systems using integrated conceptual models, *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 17(3), pp. 432-442, 2009. DOI: 10.4067/S0718-33052009000300017
- [13] Álvarez, J. y Miguel, J., La innovación a través de un enfoque basado en procesos, *DYNA* [en línea]. 82(6), 2007. [fecha de consulta 7 de diciembre de 2015]. Disponible en: <http://www.revistadyna.com/busqueda/la-innovacion-a-traves-de-un-enfoque-basado-en-procesos>
- [14] Sánchez, L. y Blanco, B., La gestión por procesos. Un campo por explorar. *Dirección y Organización* [en línea]. (54), 2014. [fecha de consulta 8 de diciembre de 2015]. Disponible en: <http://www.revistadyo.com/index.php/dyo/article/view/460>
- [15] Benner, M. and Tushman, M., Exploitation, exploration, and process management: The productivity dilemma revisited, *Academy of Management Review*, 28(2), pp. 238-256, 2003. DOI: 10.5465/AMR.2003.9416096
- [16] Torres, C., Orientaciones para implementar una gestión basada en procesos. *Ingeniería Industrial* [en línea]. 35(2), 2014. [fecha de consulta 2 de diciembre de 2015]. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59362014000200005&lng=es&nrm=iso
- [17] Zaratiegui, J.R., La gestión por procesos: Su papel e importancia en la empresa. *Economía Industrial* [en línea]. (330), 1999. [fecha de consulta 7 de diciembre de 2015]. Disponible en: <http://www.minetur.gob.es/es-ES/servicios/Documentacion/Publicaciones/Paginas/detallePublicacionPeriodica.aspx?numRev=330>
- [18] Bravo, J., Gestión de procesos. Alineados con la estrategia. Santiago: Evolución, 2011.
- [19] Sgourou, E., Katsakiori, P., Papaioannou, I., et al., Using soft systems methodology as a systemic approach to safety performance evaluation, *Procedia Engineering*, (45), pp. 185-193, 2012. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.08.141
- [20] Guerrero, M. y Gómez, L., Gestión de riesgos y controles en sistemas de información: del aprendizaje a la transformación organizacional, *Estudios Gerenciales*, 28(125), pp. 87-95, 2012. DOI: 10.1016/S0123-5923(12)70011-6
- [21] Šooš, L., Ferencz, V. and Dugas, J., Innovative management techniques in the field of environmental education. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. (174), pp. 3542-3546, 2015. DOI: 10.1016/j.sbspro.2015.01.1070
- [22] Sabir, B., Touri, B., Bergadi, M., et al., Using the integrated management system and approach SIPOC in higher education for the evaluation and improving the quality of life of students. *The Online Journal of Quality in Higher Education* [en línea]. 2(3), 2015. [fecha de consulta: 15 de diciembre de 2015]. Disponible en: <http://www.tojqih.net/journals/tojqih/articles/v02i03/v02i03-22.pdf>
- [23] Briede, J., Cabello, M. y Hernandis, B., Modelo de abocetado concurrente para el diseño conceptual de productos industriales, *DYNA*, 81(187), pp. 199-208, 2014. DOI: 10.15446/dyna.v81n187.41068
- [24] David, F., Conceptos de administración estratégica. Estado de México: Pearson Education, 2008.

MSc. J. Schwabe-Neveu, se recibe de Diseñador Industrial en el año 2005 de la Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile y MSc. en Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos en 2014, de la Universidad Politécnica de Valencia, España. Su labor profesional se concentra principalmente en el desarrollo de productos tecnológicos para el área marítima. Actualmente se desempeña como jefe de ingeniería y calidad de la empresa Steinsvik Chile S.A, especializada en soluciones para la acuicultura. Paralelamente emprende con la empresa Vigía Austral Spa edicada a la señalización e iluminación.

ORCID: 0000-0002-4767-4390

Ing. P.S. Fuentes-Stuardo, se recibe de Ingeniero Civil Industrial en 2014 y obtiene Diplomado en Emprendimiento y Liderazgo en 2013, ambos de la Universidad del Bío-Bío, Chile. Desde el año 2014 al año 2015 participa como ingeniero asesor del Departamento de Ingeniería Industrial y del Grupo de Investigación en Diseño del Departamento de Arte y Tecnologías del Diseño de la Universidad del Bío-Bío, Chile, apoyando labores de investigación académica y de formulación de proyectos para el fortalecimiento de la competitividad empresarial. Actualmente se desempeña como profesional independiente, colaborando en la formulación de proyectos asociados a temáticas de la ingeniería y el diseño industrial.

ORCID: 0000-0002-7973-0035

Dr. J.C. Briede-Westermeyer, se recibe de Diseñador Industrial mención productos, en 1996 de la Universidad de Valparaíso, Chile, de MSc. en Diseño, Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos en 2005 y de Dr. en Métodos y Técnicas del Diseño Industrial y Gráfico en 2008, ambos de la Universidad Politécnica de Valencia, España. Desde el año 1999 es profesor e investigador del Departamento de Arte y Tecnologías del Diseño de la Universidad del Bío-Bío, Chile. Miembro Comité Académico Madpro. Revisor Becas Conicyt y Proyectos Fondecyt 2015.

Patch antenna with reconfigurable sense of rotation for CubeSat satellite applications

Carlos Arturo Suárez-Fajardo, Diego Rafael Méndez-Marín, Alexander Pineda-Rodríguez & Gustavo Adolfo Puerto-Leguizamón

Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. csuarezf@udistrital.edu.co, drmendezm@correo.udistrital.edu.co, alpinedar@correo.udistrital.edu.co, gapuerto@udistrital.edu.co

Received: August 10th, 2015. Received in revised form: January 25th, 2016. Accepted: July 25th, 2016.

Abstract

A shorted annular ring (SAR) antenna design with circular polarization and reconfigurable sense of rotation improving the axial ratio by means of a 90° hybrid coupler is presented in this paper. The whole structure dimensions are 76mm x 76mm x 3mm, therefore it can be integrated in to one side of a CubeSat 1U satellite. The proposed design shows a wide impedance bandwidth of 33.33 % from 1.9GHz to 2.66GHz frequency band, with reflection coefficient inferior to -10dB and maximal gain of 6.1dBi at a central frequency of 2.35 GHz.

Keywords: Shorted annular ring antenna, CubeSat, Reconfigurable antenna, Circular polarization.

Antena de parche con sentido de giro reconfigurable para aplicaciones en satélites CubeSat

Resumen

En este artículo se presenta el diseño de una antena tipo parche en anillo circular cortocircuitado con polarización circular y sentido de giro reconfigurable, con mejoramiento de la relación axial mediante el uso de un acoplador híbrido de 90°. La estructura total presenta dimensiones de 76 mm x 76 mm x 3 mm, por lo que puede ser integrada en una de las caras de un satélite CubeSat 1U. El diseño propuesto muestra un amplio ancho de banda de impedancia del 33.33 % en el rango de frecuencias de 1.9GHz a 2.66GHz para un coeficiente de reflexión inferior a -10 dB y una ganancia máxima de 6.1dBi a una frecuencia central de 2.35GHz.

Palabras clave: Antena de Anillo Circular Cortocircuitado, CubeSat, Antena Reconfigurable, Polarización Circular.

1. Introducción

Los satélites en estándar CubeSat son sistemas relativamente sencillos de construir a precios bajos, lo cual ha permitido a instituciones educativas de algunos países incursionar en la exploración del espacio exterior. También el sector privado ha sido participe de sus beneficios, ya que gracias a este tipo de satélites, empresas ligadas con el área espacial han ganado experiencia y les ha permitido comprobar el funcionamiento de nuevas tecnologías para el espacio [1]. Es por esta razón que actualmente se han lanzado cerca de 200 misiones CubeSat con diversos objetivos entre los que se

encuentran investigaciones atmosféricas, investigaciones biológicas, predicción de terremotos, telemetría, estudios de la actividad magnética solar y de las tormentas geomagnéticas, estudio de la turbulencia del plasma en la ionósfera, prueba en ambiente espacial de partes y circuitos, por otra parte, los CubeSat se proyectan como candidatos atractivos para la exploración de asteroides y planetas como Marte [2].

Por otra parte, el CubeSat visto como un estándar, proporciona una serie de características físicas básicas, como tamaño, peso y forma, y requisitos de seguridad que deben ser cumplidos por los diseñadores de satélites CubeSat [3]. Estos requisitos imponen limitaciones en los sistemas que componen el satélite y se presentan como un reto para la ingeniería en

How to cite: Suárez-Fajardo, C. A., Méndez-Marín, D. R., Pineda-Rodríguez, A. & Puerto-Leguizamón, G. A. Antena de parche con sentido de giro reconfigurable para aplicaciones en satélites CubeSat DYNA 83 (199) pp. 157-164, 2016

cuanto a su eficiencia, efectividad y practicidad. En este sentido, tal vez uno de los sistemas más críticos es el de las comunicaciones, encargado de enlazar los segmentos terrestre y satelital para poder enviar desde la estación terrena los comandos de control y recibir los datos de telemetría y de carga útil del satélite.

Una parte imprescindible del sistema de comunicaciones es la antena, la cual típicamente funciona en las bandas de VHF/UHF para los satélites CubeSat, haciendo uso de dipolos o monopolos entre otros, sin embargo, este rango de frecuencias sólo permite transmisiones a una tasa de bit baja y generalmente las antenas poseen únicamente polarización lineal, aparte que su tamaño supera con creces las dimensiones del CubeSat, por lo que es necesario implementar un sistema de despliegue de antenas para incorporarlas en el satélite.

Teniendo en cuenta lo anterior, algunos investigadores han decidido explorar en el diseño de radios y antenas que operen a frecuencias superiores a las bandas de VHF/UHF, particularmente en la banda S ($2\text{GHz} - 3\text{GHz}$). En este sentido, en [4] se presenta el diseño de una antena tipo parche con polarización circular basada en dos anillos que actúan uno como elemento excitador y otro como parásito, logrando un ancho de banda de impedancia ($S_{11} < -10\text{ dB}$) de 19.5 %. En [5] se propone una antena tipo parche con geometría rectangular alimentada por un híbrido de 90° , esto permite que la antena presente polarización circular y un ancho de banda de impedancia de 28 %. Por otra parte, en [6] se presenta el diseño de una agrupación de antenas tipo parche para aplicaciones satelitales, compuesta por 36 elementos. La agrupación final presenta un ancho de banda de impedancia de 8.7 %.

Más recientemente, en [7] se propone el diseño de una antena de parche con geometría cuadrada y excitación sobre el eje y, que incluye un parche parásito acoplado capacitivamente y geometría en anillo cuadrado, el cual es ubicado en la periferia del parche radiante y es separado en dos partes de igual longitud. Mediante los tramos de anillo cuadrado se logra reconfigurar la polarización de la antena de lineal a RHCP, LHCP o elíptica. La antena hace uso de un sustrato con constante dieléctrica de $\epsilon_r = 9$ y una tangente de pérdidas $\tan\delta = 0.002$ y el tamaño del plano de masa posee un diámetro de 10Cm, así mismo, la antena presenta en el mejor de los casos una ganancia de 4.9dBi y un ancho de banda de relación axial de 28MHz respecto a 3dB.

En [8] se propone el diseño de un parche cuadrado con polarización circular y doble resonancia en $2.35\text{GHz}/2.73\text{GHz}$ y transparencia del 70%, usando para tal fin un parche de tamaño de $35.75 \times 35.75\text{mm}^2$ con las esquinas truncadas, impreso sobre un plano de masa de $50 \times 40\text{mm}^2$. La transparencia se logra cortando agujeros cuadradas de un tamaño de $4.8 \times 4.8\text{mm}^2$ tanto en el parche como en el sustrato formando una malla. La antena incluye bobinas (serpentin) y condensadores impresos sobre el mismo sustrato para controlar la diferencia en fase de los modos ortogonales del parche. Las ganancias máximas obtenidas son de 4.4/4.8dBi y los anchos de banda de impedancia en las dos resonancias para una magnitud del coeficiente de reflexión inferior a -10dB son de 2.33GHz-2.42GHz y de 2.69GHz a 2.74GHz.

Finalmente, en [9] se presenta el diseño de una antena con polarización circular que hace uso de un parche truncado con geometría en forma de hexágono y un excitador en serpentin. La antena es elaborada sobre 5 capas apiladas de sustrato de 1.57mm de espesor, mediante lo cual se obtiene un ancho de banda de impedancia del 42.3% para pérdidas de retorno de 10dB en el rango de 4.24GHz y 6.76GHz y un ancho de banda de relación axial del 16.8% para una referencia de 3dB, la ganancia máxima obtenida fue de 6.6dBi.

En este artículo se presenta el diseño de una antena con polarización circular y sentido de giro conmutable entre circular a derechas y circular a izquierdas (RHCP-LHCP), mediante el uso de un acoplador híbrido de 90° . La geometría propuesta permite que la antena pueda ser fijada a una de las caras de un pico-satélite, ocupando un espacio máximo de $76\text{mm} \times 76\text{mm} \times 5\text{mm}$, para lo cual se explora la antena tipo parche con geometría en anillo circular, con su radio interior cortocircuitado con el plano de masa. La metodología de diseño parte de una geometría base con dimensiones determinadas mediante modelo, para luego llevar a cabo análisis paramétrico variando tres medidas de la geometría de la antena, a saber: el radio interior, el radio exterior y los radios de alimentación, todo esto con el fin de optimizar parámetros como ganancia, diagrama, relación axial e impedancia de la antena.

Los resultados relacionados en este documento muestran que la antena presenta un ancho de banda de impedancia del 33.4 % para una magnitud del coeficiente de reflexión de $S_{11} < -10\text{ dB}$, en el rango de 1.9GHz a 2.65GHz. La ganancia máxima de la antena es de 6.1dBi a una frecuencia de 2.35GHz y una relación axial de 0.93 dB a la misma frecuencia.

2. Metodología de diseño de la antena

La Fig. 1 muestra la geometría propuesta para la antena en anillo circular cortocircuitado, la cual está compuesta por dos sustratos apilados con espesores y características electromagnéticas diferentes. El primero de los sustratos está destinado para la antena, el cual posee un espesor de $h = 1.524\text{mm}$, una constante dieléctrica de $\epsilon_r = 3$ y una tangente de pérdidas $\tan\delta = 0.0014$.

El segundo sustrato, destinado para el acoplador híbrido de 90° , tiene un espesor de $h = 0.508\text{mm}$, una constante dieléctrica de $\epsilon_r = 2.17$ y una tangente de pérdidas $\tan\delta = 0.0009$.

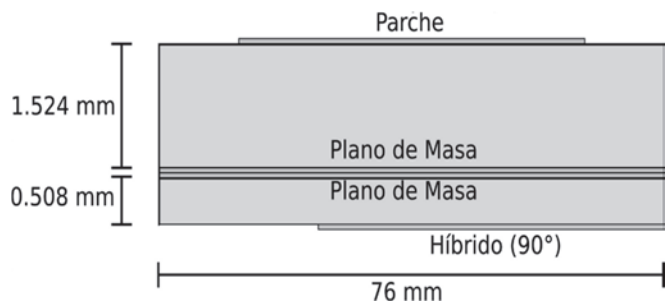


Figura 1. Vista lateral de la antena en anillo circular cortocircuitado.
Fuente: Los Autores.

Como se observa en la Fig. 1, los planos de masa de la antena y del híbrido se unen en un plano común y la excitación de la antena se lleva a cabo mediante dos terminales metálicos que parten de los puertos de salida del híbrido pasando por dos orificios practicados en los sustratos, atravesando los planos de masa tanto de la antena como del híbrido, evitando contacto entre los terminales y los planos de masa. En las secciones siguientes se describe con más detalle el diseño de la antena y del híbrido.

2.1. Diseño inicial de la antena y análisis paramétrico

La literatura especializada reporta diversas estrategias orientadas a reducir el tamaño de antenas de parche con polarización circular, particularmente en [10] se estudian algunas técnicas como el diseño de geometrías especiales, carga de parches mediante ranuras, uso de materiales dieléctricos de alta permitividad, técnicas basadas en metamateriales, alimentación múltiple de la antena, terminales de corto entre planos de masa y radiante y combinación de algunas de las técnicas anteriores. A este respecto, en [11] se propone incluir terminales que unen la superficie de un parche circular con el plano de masa, logrando una reducción del área de la antena de 66 %. Otros trabajos han explorado el efecto que tiene la cantidad de terminales cortocircuitados y la ubicación relativa entre ellos, resultando que es posible ajustar la frecuencia de resonancia con estos terminales [12]. En el caso de una antena de parche en forma de anillo con radio interior a y radio exterior b , algunos trabajos han mostrado que el uso de terminales de corto entre la superficie del parche y el plano de masa en el radio interior a , y la selección apropiada del radio exterior b , minimiza la excitación de ondas de superficie y por lo tanto inhibe la excitación del modo TM_0 causante de las ondas de superficie [13, 14].

En este artículo se explora el diseño de una antena tipo parche con geometría en anillo, que hace uso de un radio interior a y un radio exterior b , como se muestra en la Fig. 2. El tamaño total de la antena y por ende del plano de masa está determinado por el espacio disponible de $76\text{ mm} \times 76\text{ mm}$ en una de las caras de un CubeSat. En el diseño propuesto se practica un agujero de radio a en el centro de la antena y la pared expuesta se cortocircuita totalmente con el plano de masa. La antena se excita mediante los terminales de salida del acoplador híbrido de 90° en dos puntos ubicados sobre un radio p desde el centro del parche y en ángulos de 45° y 135° con respecto al eje horizontal positivo.

Haciendo uso de las ec. (1) - (2) relacionadas en [15], las cuales consideran los efectos de borde, se calcula el radio real exterior b de la antena a una frecuencia de resonancia $f_r = 2.35\text{GHz}$. Así mismo, se selecciona el sustrato de mayor constante dieléctrica disponible para esta investigación con los datos ya mencionados anteriormente, buscando de esta manera reducir el tamaño del radio exterior b , esto considerando el hecho que las dimensiones del plano de masa disponible son de $76\text{ mm} \times 76\text{ mm}$, aspecto que puede influir en el nivel de los lóbulos laterales y por ende en la ganancia máxima de la antena.

$$b = \frac{F}{\left\{1 + \frac{2h}{\pi\epsilon_r F} \left[\ln\left(\frac{\pi F}{2h}\right) + 1.7726 \right] \right\}^{1/2}} \quad (1)$$

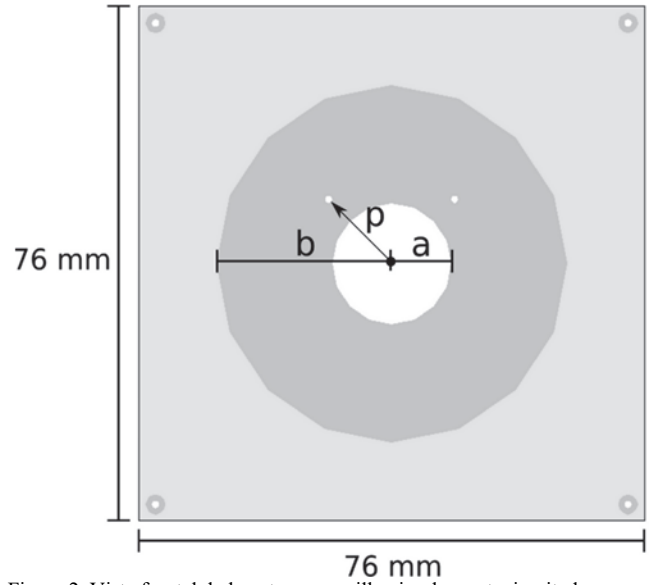


Figura 2. Vista frontal de la antena en anillo circular cortocircuitado. Fuente: Los Autores.

Donde h es el espesor del sustrato, ϵ_r la constante dieléctrica y F se define cómo:

$$F = \frac{8.791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

Por otra parte, el radio exterior equivalente b_e se relaciona en [15] como en la ec. (3), el cual es necesario para determinar el radio de excitación p .

$$b_e = b \left\{ 1 + \frac{2h}{\pi\epsilon_r b} \left[\ln\left(\frac{\pi b}{2h}\right) + 1.7726 \right] \right\}^{1/2} \quad (3)$$

Teniendo en cuenta lo anterior, solucionando la ec. (4) para una impedancia de entrada $R_{in}(p) = 50\Omega$, se determina el radio p de alimentación [15].

$$R_{in}(p) = \frac{1}{G_t} \frac{J_1^2(kp)}{J_1^2(kb_e)} \quad (4)$$

Donde G_t es la conductancia total debido a radiación, conducción y dieléctrico calculada mediante las expresiones relacionadas en [15]. Por otra parte, la expresión en (5) es denominada la ecuación característica para una cavidad con una pared magnética en $r = b_e$, siendo b_e el radio exterior efectivo, y una pared eléctrica en $r = a$, teniendo en cuenta que la prima (') indica la derivada de la función de Bessel respectiva.

$$\frac{J_n(k_1 a)}{Y_n(k_1 a)} = \frac{J'_n(k_1 b_e)}{Y'_n(k_1 b_e)} \quad (5)$$

Haciendo uso de las ec. (1) - (5) se determina una geometría base inicial, la cual se optimizará mediante análisis paramétricos llevados a cabo sobre los tres principales

parámetros geométricos de la antena a saber: el radio interior a , el radio exterior b y el radio de excitación p . La optimización de la antena se llevó a cabo mediante el código comercial de análisis electromagnético "HFSS" [16] y con la metodología usada en [17].

La Fig. 3 muestra las simulaciones de la magnitud del coeficiente de reflexión S_{11} para la antena descrita, variando la longitud del radio exterior b de 26.1mm a 26.4mm y dejando fijas las dimensiones del radio interior $a = 9\text{mm}$ y el radio de excitación $p = 13.4\text{mm}$. Allí se evidencia que un pequeño aumento en el radio exterior b produce una reducción notoria en la frecuencia de resonancia de la antena.

La Fig. 4 muestra las simulaciones de la magnitud del coeficiente de reflexión S_{11} para la antena, variando la longitud del radio interior a de 8.5mm a 9.5mm y dejando fijas las dimensiones del radio exterior $b = 26.3\text{mm}$ y el radio de excitación $p = 13.4\text{mm}$. En este caso se observa que un aumento en la dimensión del radio interior a proporciona un aumento en la frecuencia de resonancia de la antena.

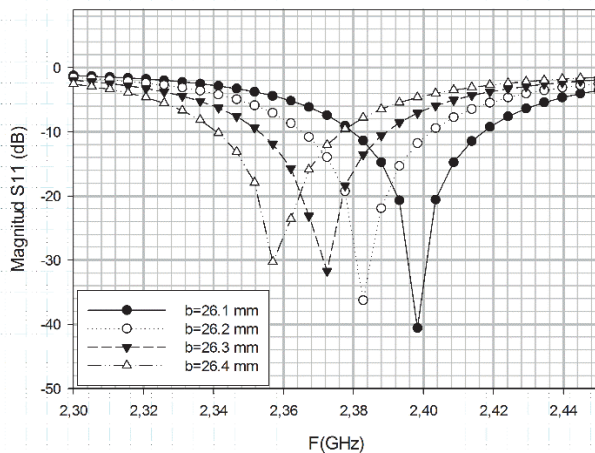


Figura 3. Efecto en la magnitud del coeficiente de reflexión S_{11} para diferentes valores del radio exterior b , con $a=9\text{ mm}$ y $p=13.4\text{ mm}$. Fuente: Los Autores.

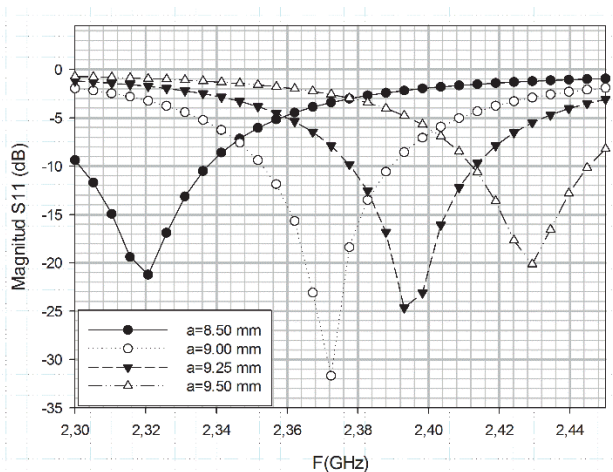


Figura 4. Efecto en la magnitud del coeficiente de reflexión S_{11} para diferentes valores del radio interior a , con $b=26.3\text{ mm}$ y $p=13.4\text{ mm}$. Fuente: Los Autores.

La Fig. 5 muestra las simulaciones de la magnitud del coeficiente de reflexión S_{11} para la antena, variando las dimensiones del radio de excitación p , de $p = 13.2\text{mm}$ a $p = 13.8\text{mm}$, manteniendo constantes las dimensiones de los radios interior $a = 9\text{mm}$ y exterior $b = 26.3\text{mm}$. A diferencia del efecto del cambio en las dimensiones de los radios exterior e interior, el radio de excitación no afecta la frecuencia de resonancia f_r , pero sí la adaptación de la antena, esto debido a que la impedancia de entrada de la antena depende del radio p de excitación.

En lo que hace referencia al efecto que tiene la variación de las dimensiones de los tres parámetros geométricos a , b y p en el comportamiento de la ganancia y la relación axial de la antena, la Fig. 6 muestra las simulaciones del comportamiento de la ganancia de la antena frente al cambio de las dimensiones del radio exterior b . Como se observa en la Fig. 6, la ganancia máxima mantiene un nivel de aproximadamente 6 dBi para cada valor del parámetro b , sin embargo a medida que esta dimensión aumenta, la frecuencia en que ocurre dicho máximo disminuye. Por otra parte, en la medida en que se aumente el valor del radio interior a , la

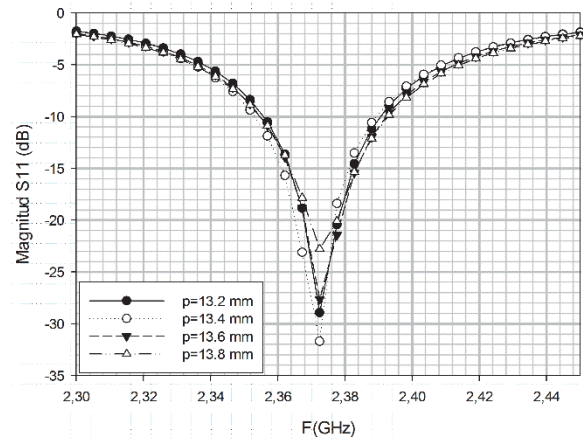


Figura 5. Efecto en la magnitud del coeficiente de reflexión S_{11} para diferentes valores del radio de excitación p , con $a=9\text{ mm}$ y $b=26.3\text{ mm}$. Fuente: Los Autores.

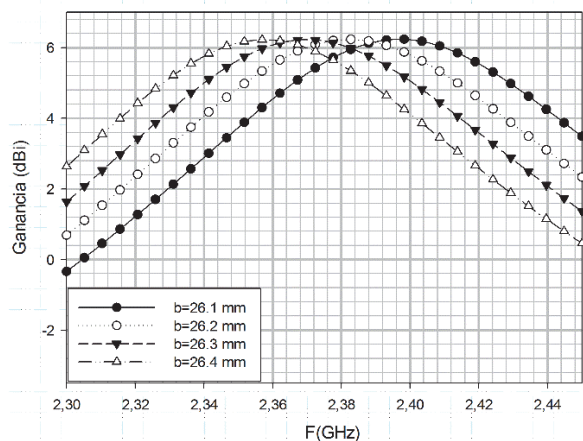


Figura 6. Efecto en la magnitud de la ganancia para diferentes valores del radio exterior b , con $a=9\text{ mm}$ y $p=13.4\text{ mm}$. Fuente: Los Autores.

frecuencia de resonancia aumenta y el valor máximo de ganancia se mantiene en un valor aproximado de 6 dBi , esta vez de una manera menos sensible al caso anterior, por tal motivo no se incluye la figura respectiva.

Por otra parte, en la Fig. 7, se muestra el efecto de la variación del radio interior a sobre la relación axial de la antenna. Cabe resaltar que este parámetro se mantiene en valores inferiores a 1 dB y al igual que en el caso de la ganancia, las variaciones en las dimensiones del radio exterior b poco afectan el comportamiento de la relación axial.

A partir de los resultados de los análisis paramétricos llevados a cabo anteriormente, se seleccionó la geometría de antenna que presentó el mejor comportamiento en las simulaciones de los parámetros de adaptación, ganancia y relación axial a la frecuencia deseada. Las dimensiones finales de ésta son: radio interior $a = 9\text{ mm}$, radio exterior $b = 26.3\text{ mm}$ y radio de excitación $p = 13.4\text{ mm}$.

2.2. Diseño del acoplador híbrido de 90°

La metodología seleccionada para mejorar la relación axial y al mismo tiempo permitir cambiar el sentido de giro de la polarización de la antenna, es la de hacer uso de un acoplador híbrido de 90° , para tal fin, la Fig. 8 muestra la vista superior del dispositivo diseñado para este trabajo.

El diseño inicial del acoplador híbrido de 90° hace uso del modelo presentado en [18] y su posterior optimización se llevó a cabo mediante el código comercial [16]. Como resultado del proceso de optimización, las secciones de línea de transmisión con impedancia característica $Z_0 = 50\ \Omega$ resultaron ser de ancho $W = 1.5374\text{ mm}$ y para las secciones de línea de transmisión con impedancia característica de $Z_0 = 35.35\ \Omega$ se determinó un ancho de $W = 2.5307\text{ mm}$. En la Fig. 9 se muestran los resultados de las simulaciones de los parámetros de dispersión para el híbrido de 90° óptimo.

3. Resultados y discusión

Una vez finalizada la optimización de las geometrías tanto de la antenna como del híbrido de 90° y del conjunto de los dos,

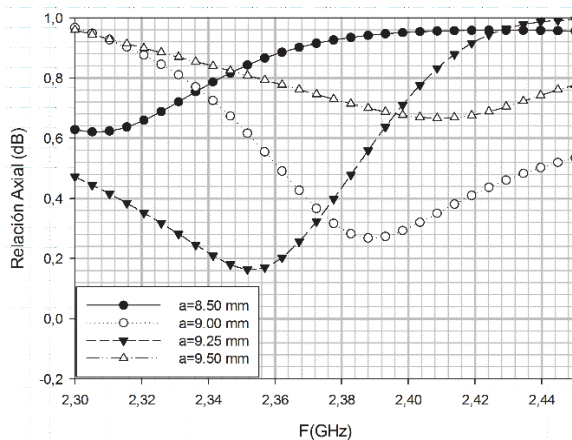


Figura 7. Efecto en la magnitud de la relación axial para diferentes valores del radio interior a , con $b=26.3\text{ mm}$ y $p=13.4\text{ mm}$.

Fuente: Los Autores.

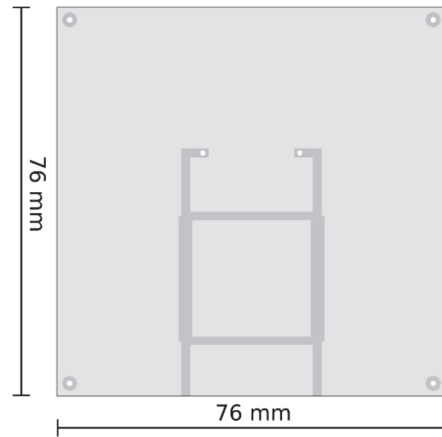


Figura 8. Vista superior del híbrido de 90° con un plano de masa de $76\text{ mm} \times 76\text{ mm}$.

Fuente: Los Autores.

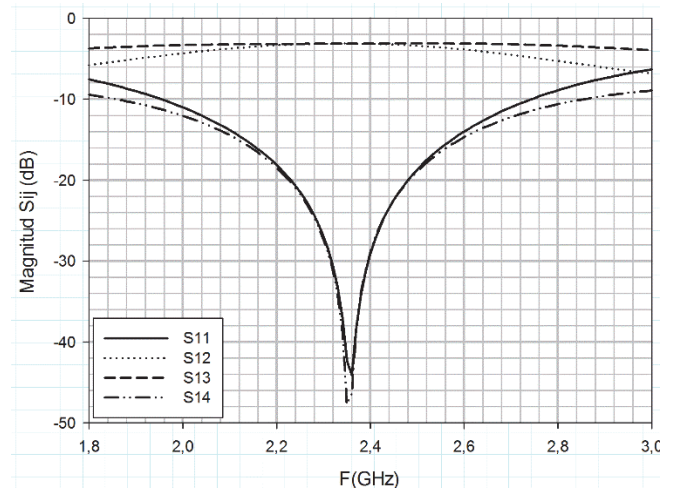


Figura 9. Resultados de las simulaciones de los parámetros de dispersión S_{11} , S_{12} , S_{13} y S_{14} para el híbrido de 90° .

Fuente: Los Autores.

se procedió a fabricar los prototipos de los mismos, para luego integrarlos en una sola unidad, adicionado a este conjunto apilado, conectores SMA a los puertos de entrada del acoplador. La Fig. 10 muestra las fotografías de las caras frontal y posterior de la antenna en anillo circular cortocircuitado ensamblada.

La Fig. 11 muestra los resultados de las medidas y simulaciones de la magnitud del coeficiente de reflexión (S_{11}) para el puerto 1 (lado izquierdo de la antenna vista de frente). Se evidencia que los resultados de las medidas presentan un comportamiento similar a los resultados de las simulaciones, sin embargo, las medidas exhiben una mejor adaptación del puerto respecto a las simulaciones. También se observa que la antenna posee un amplio ancho de banda en el rango de 1.9 GHz a 2.66 GHz para $S_{11} < -10\text{ dB}$, esto representa un ancho de banda de impedancia porcentual del 33.33 %.

La Fig. 12 muestra los resultados de las medidas y simulaciones de la magnitud del coeficiente de reflexión (S_{22}) para el puerto 2. De igual manera, las medidas y simulaciones presentan un comportamiento similar. Por otra parte, se observa

que la antena posee un ancho de banda amplio, comprendido en el rango de frecuencias aproximado de 1.9GHz a 2.64GHz para $S_{22} < -10\text{ dB}$, lo cual representa un ancho de banda de impedancia porcentual del 32.59 %, cuyo resultado es similar al obtenido en el puerto 1.

Por otra parte, en la Fig. 13 se muestran los resultados de las medidas frente a las simulaciones para el parámetro de acoplamiento entre los puertos 1 y 2 (S_{12}). En esta figura se aprecia que la frecuencia de resonancia es de aproximadamente 2.35GHz , valor que coincide con el esperado en el diseño realizado. Es importante aclarar que el parámetro de dispersión S_{21} es prácticamente idéntico al parámetro S_{12} por lo tanto no se incluye en este documento.

Cabe aclarar que el sentido de giro deseado se determina mediante la selección del puerto de entrada, es decir: si se desea obtener una polarización RHCP, se debe excitar el puerto ubicado al lado izquierdo de la antena vista de frente (ver Fig. 10), mientras que el puerto restante se termina con una carga de $50\ \Omega$ y viceversa si se desea una polarización LHCP.

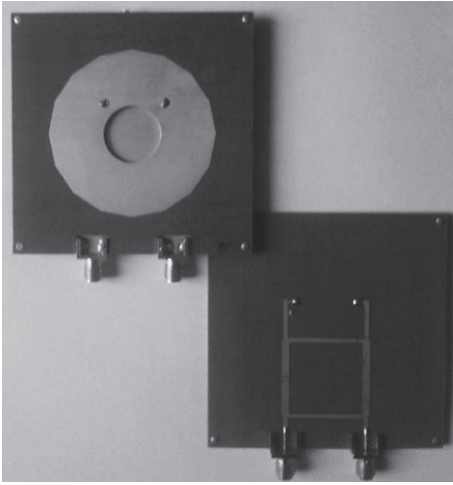


Figura 10. Fotografía de las vistas frontal y posterior de la antena de anillo circular cortocircuitada donde se observa la antena y el híbrido.
Fuente: Los Autores.

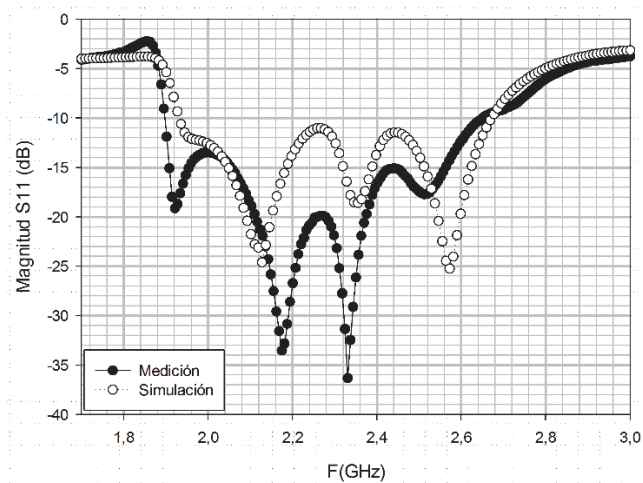


Figura 11. Resultados de las medidas comparadas con las simulaciones para la magnitud del coeficiente de reflexión del puerto 1 (S_{11}).
Fuente: Los Autores.

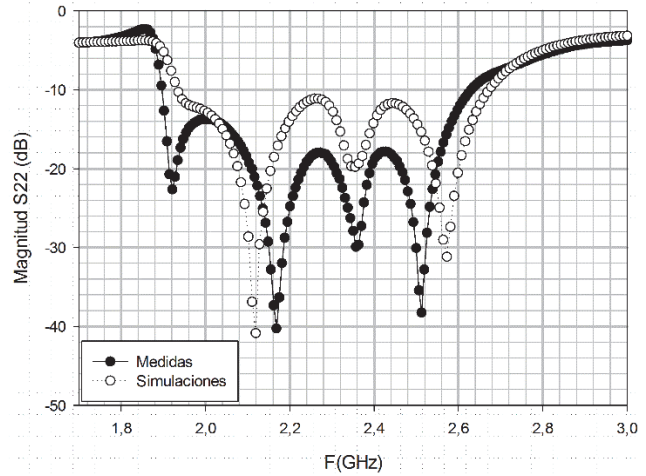


Figura 12. Resultados de las medidas comparadas con las simulaciones de la magnitud del coeficiente de reflexión S_{22} del puerto 2.
Fuente: Los Autores.

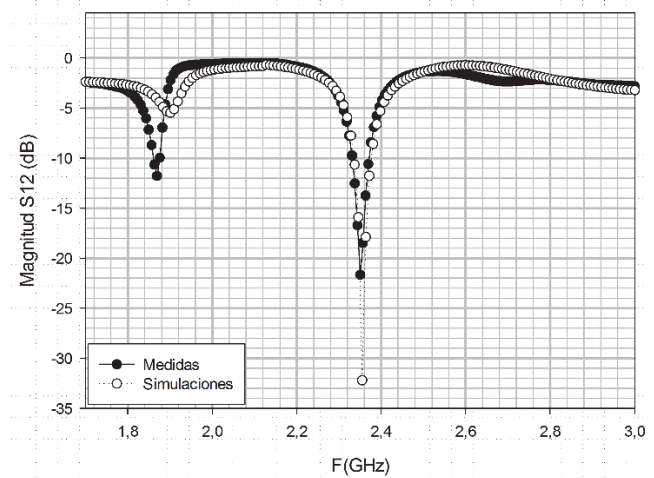


Figura 13. Resultados de las medidas comparadas con las simulaciones de la magnitud del parámetro de acoplamiento entre los puertos 1 y 2 (S_{12}).
Fuente: Los Autores.

En cuanto a la ganancia de la antena, en la Fig. 14 se presenta el resultado de las medidas frente a las simulaciones para este parámetro. En la gráfica se observa que al igual que en los otros parámetros, se obtiene un comportamiento similar entre las dos curvas, por otra parte, el nivel máximo de ganancia es de 6.1 dBi a la frecuencia de 2.35GHz .

La Fig. 15 muestra los resultados de las simulaciones comparados con las medidas para los diagramas de radiación en el plano XY a la frecuencia central de 2.35GHz . En esta figura se nota que la antena presenta un diagrama de radiación directivo, con algunas diferencias entre los valores esperados en las simulaciones frente a los valores medidos, lo cual se explica por los errores en la medida debidos a los mecanismos de soporte y a la cámara anecoica utilizados para este proceso.

Finalmente, la Fig. 16 muestra los resultados de las medidas de los diagramas de radiación Copolar y Crosspolar en el plano XY, para una frecuencia de 2.35GHz .

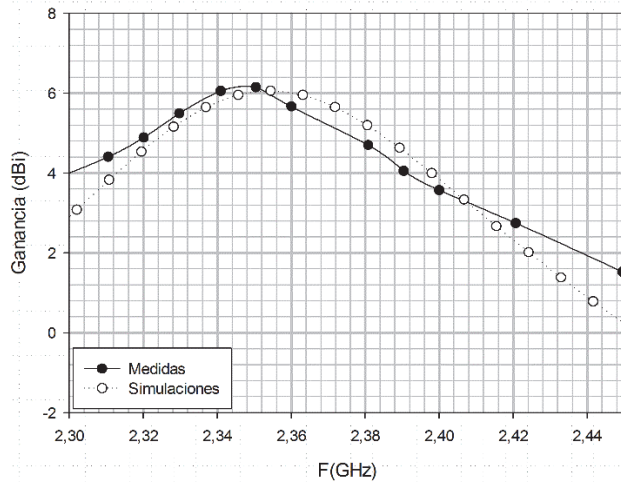


Figura 14. Resultados de las medidas comparadas con las simulaciones para la ganancia de la antena en la dirección $\theta = 0$ y $\phi = 0$.
Fuente: Los Autores.

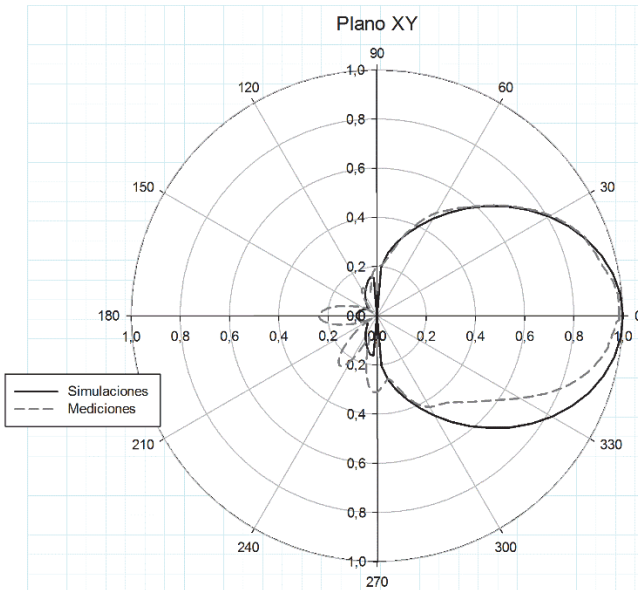


Figura 15. Resultados de las medidas comparados con las simulaciones de los diagramas de radiación normalizados para el corte en el plano XY.
Fuente: Los Autores.

4. Conclusiones

En este artículo se presentan los resultados del diseño de una antena de parche con geometría en anillo circular cortocircuitado para ser adosada en el espacio disponible ($76 \text{ mm} \times 76 \text{ mm}$) de una de las caras de un satélite CubeSat 1U. A pesar de las limitaciones de espacio, el diseño propuesto logra una ganancia máxima de 6.1 dBi a la frecuencia central de 2.35 GHz . La relación axial obtenida fue de 0.93 dB a la misma frecuencia, hecho que se atribuye al uso de un acoplador híbrido de 90° que alimenta la antena en dos puntos, el cual permite de igual manera el cambio en el sentido de giro de RHCP a LHCP y viceversa. Así mismo, los resultados de las medidas del ancho de banda de

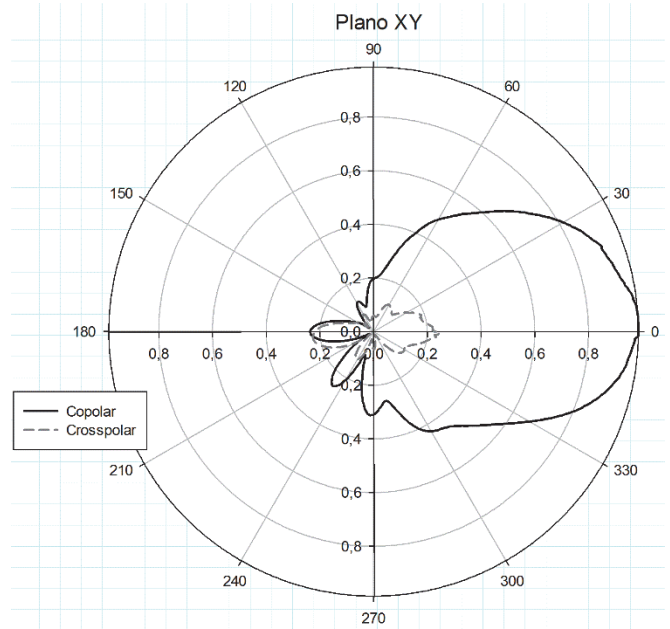


Figura 16. Resultados de las medidas de los diagramas de radiación Copolar y Crosspolar en el plano XY.
Fuente: Los Autores.

impedancia son del 33.4 % para una magnitud del coeficiente de reflexión de $S_{11} < -10 \text{ dB}$, en el rango de 1.9 GHz a 2.65 GHz . Por último, los resultados de las medidas comparadas con las simulaciones son similares, sin embargo se aprecia una pequeña diferencia en las medidas del diagrama de radiación, debidos a las limitaciones de la cámara anecoica disponible para tal fin.

Agradecimientos

Los autores agradecemos al Departamento Administrativo de Ciencia Tecnología e Innovación COLCIENCIAS y a la Universidad Distrital Francisco José de Caldas por la financiación de este proyecto en el marco del programa de Jóvenes investigadores 2014.

Referencias

- [1] Arnold S.S., Nuzzaci, R. and Gordon-Ross, A., Energy budgeting for cubesats with an integrated FPGA, Proceeding of IEEE Aerospace Conference, pp. 1-14, 2012. DOI: 10.1109/AERO.2012.6187240
- [2] Yu, X. and Zhou J., CubeSat : A candidate for the asteroid exploration in the future, Proceeding of International conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale (3M-NANO), pp. 261-265, 2014. DOI: 10.1109/3M-NANO.2014.7057349
- [3] Puig-Suari, J. and Turner, C., Development of the standard cubesat deployer and a cubesat class PicoSatellite, Proceeding of IEEE Aerospace Conference, pp. 347-353, 2001. DOI: 10.1109/AERO.2001.931726
- [4] Zhang, Y., Li, J., Gao, S., Wei, G. and Xu, J., Broadband circularly polarized patch antenna for small satellites applications, Proceeding of International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP), pp. 1-3, 2012. DOI: 10.1109/CSNDSP.2012.6292641
- [5] Kumar-Sharma, A., Singh, R. and Mittal, A., Wide band dual circularly polarized aperture coupled microstrip patch antenna with bow tie shaped apertures, Proceeding of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, pp. 3749-3752, 2004. DOI: 10.1109/APS.2004.1330162

- [6] Zomchek, G. and Laxpati, S., S-band phased patch array design for satellite applications, *Proceeding of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, pp. 338-342, 2005. DOI: 10.1109/APS.2005.1551319
- [7] Byun, G. and Choo, H., Antenna polarization adjustment for microstrip patch antennas using parasitic elements, *IEEE Electronics Letters*, 51(14), pp. 1046-1048, 2015. DOI: 10.1049/el.2015.0611
- [8] Ryan, C.G.M. and Eleftheriades, G.V., Single- and Dual-Band transparent circularly polarized patch antennas with metamaterial loading, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 14, pp. 470-473, 2015. DOI: 10.1109/LAWP.2014.2368115
- [9] Quan, W.L., Hang, W., Xiu, Y.Z. and Hau, W.L., Printed Meandering probe-fed circularly polarized patch antenna with wide bandwidth, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 13, pp. 409-414, 2014. DOI: 10.1109/LAWP.2014.2314141.
- [10] Gao, S., Luo, Q. and Zhu, F., Circularly polarized antennas, Chichester, England: John Wiley & Sons, 2014.
- [11] Waterhouse, R., Small microstrip patch antenna, *Electronics Letters*, 31(8), pp. 604-605, 1995. DOI: 10.1049/el:19950426
- [12] Sanad, M., Effect of the shorting posts on short circuit microstrip antennas, *Proceeding of Antennas and Propagation Society International Symposium (AP-S)*, pp. 794-797, 1994. DOI: 10.1109/APS.1994.407972
- [13] Jackson, D.R., Williams, J.T., Bhattacharyya, A.K., Smith, R.L., Buchheit, S.J. and Long S.A., Microstrip patch designs that do not excite surface waves, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 41(8), pp. 1026-1037, 1993. DOI: 10.1109/8.244643
- [14] Basilio, L.I., Williams, J.T., Jackson, D.R., and Khayat, M.A., A comparative study of a new GPS reduced-surface-wave antenna, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 4, pp. 233-236, 2005. DOI: 10.1109/LAWP.2005.851105
- [15] Balanis, C.A., *Antenna Theory: Analysis and Design*. New York: Wiley Interscience, 2005.
- [16] ANSYS, *Ansoft High Frequency Structure Simulator v15 User's Guide*, ANSYS Inc. United States, 2015.
- [17] Suárez-Fajardo, C.A., Rodríguez-León, R.A. and Antonino-Daviú, E., Wideband PIFA antenna for higher LTE band applications, *DYNA*, 82(189), pp. 84-89, 2015. DOI: 10.15446/dyna.v82n189.42103.
- [18] Pozar, D.M., *Microwave Engineering*. New York: John Wiley & Sons, 2012.

C.A. Suárez-Fajardo, es Ing. Electrónico y Licenciado en Matemáticas. En el año 2002 se integra al grupo de radiación electromagnética (GRE) de la Universidad Politécnica de Valencia España y en el año 2006 obtiene su título de Dr. en Telecomunicaciones por la misma universidad. Actualmente ocupa el cargo de Profesor Titular en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Es autor de más de 45 artículos en revistas indexadas y en congresos internacionales. Es par evaluador de proyectos de Colciencias y de revistas como: *Revista Ingeniería Universidad de Antioquia*, *Revista Ingeniería de la Universidad Javeriana*, *Revista Ingeniería y Desarrollo de la Universidad del Norte*, *revista Chilena de Ingeniería (Ingeniare)*, *Journal of Antennas and Propagation (IJAP)* y revista *DYNA Universidad Nacional*. Sus intereses de investigación incluyen elementos radiantes y agrupaciones, desarrollo de elementos y circuitos de microondas, subsistemas para aplicaciones en satélites de reducido tamaño. ORCID ID: 0000-0002-1460-5831

D.R. Méndez, es estudiante de la Universidad Distrital Francisco José de caldas en Bogotá, Colombia, donde está cerca de conseguir su pregrado en Ingeniería Electrónica. En 2014 él se unió al Laboratorio de Ingeniería de Microondas, Electromagnetismo y Radiación (LIMER) como ejecutor del proyecto titulado “desarrollo de un módulo de despliegue de antena con polarización circular reconfigurable para la banda s” con el que está desarrollando su trabajo de final de carrera. Actualmente está participando en un Proyecto de investigación en convenio con la Universidad Distrital y Colciencias como joven investigador. Sus intereses en la investigación incluyen diseño y optimización de antenas. ORCID ID: 0000-0001-9944-1153

A. Pineda, es Tecnólogo en Mecatrónica y es estudiante de la Universidad Distrital Francisco José de caldas en Bogotá, Colombia, donde está cerca de

conseguir su pregrado en Ingeniería Electrónica. En 2014 se unió al Laboratorio de Ingeniería de Microondas, Electromagnetismo y Radiación (LIMER) como ejecutor del proyecto titulado “desarrollo de un módulo de despliegue de antena con polarización circular reconfigurable para la banda s” con el que está desarrollando su trabajo de final de carrera. Actualmente está trabajando en la Empresa de Telecomunicaciones de Bogotá ETB como coordinador en el manejo de equipos e instrumentos de medición. Sus intereses en la investigación incluyen diseño y optimización de antenas. ORCID ID: 0000-0002-0696-2134

G.A. Puerto-Leguizamón, es Ing. de Telecomunicaciones. En 2003 se vinculó al Grupo de Comunicaciones Ópticas y Cuánticas de la Universidad Politécnica de Valencia, España. Dr. en Telecomunicaciones en 2008 e investigador posdoctoral en el Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia de la misma universidad hasta 2011. Desde 2012 es Profesor Asistente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. A la fecha ha publicado más de 45 artículos en revistas y congresos internacionales en el campo de redes ópticas, es par evaluador de Colciencias y de las revistas *IEEE Journal on Lightwave Technologies*, *IEEE Photonic Technology Letters* y *Optics Express*. Sus intereses de investigación incluyen sistemas de radio sobre fibra, networking óptico y redes de acceso ópticas. ORCID ID: 0000-0002-6420-9693



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería
Eléctrica e Ingeniería de Control

Oferta de Posgrados

Maestría en Ingeniería - Ingeniería Eléctrica

Mayor información:

E-mail: ingelcontro_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 52 64

RWA: Optical Networks with Heuristics Algorithms

Arturo Benito Rodríguez-García ^a, Leonardo Juan Ramírez-López ^b & Jaime César Espinoza-Oyarzún ^a

^a Faculty of Technology, Universidad de Santiago de Chile, Chile. arturo.rodriguez@usach.cl, jaime.espinoza@usach.cl

^b Faculty of Engineering, Universidad Militar de Nueva Granada, Colombia. leonardo.ramirez@unimilitar.edu.co

Received: October 27th, 2015. Received in revised form: March 20th, 2016. Accepted: July 21th, 2016.

Abstract

The increase in demand for data transport through WDM (Wavelength Division Multiplexing) networks has led to the emerging problems related to finding routes and assigning wavelengths in these networks, which are solved through algorithmic processes. Conventional algorithms only satisfy the conditions of static traffic. However, the heuristic algorithms may be processed in dynamic traffic scenarios. This paper proposes a comprehensive strategy to address DLE (Dynamic Lightpath Establishment), i.e., without dividing the problem, using several heuristic algorithms. The results shown indicate that the heuristic algorithms respond better under stress in dynamic scenarios, but with high network use.

Keywords: Simulated Annealing; Genetic Algorithm; NSFNET; Wavelength; Tabú Search.

RWA: Redes Ópticas con Algoritmos Heurísticos

Resumen

El aumento de la demanda en el transporte de datos a través de las redes ópticas WDM (Wavelength Division Multiplexing) ha llevado a nuevos problemas relacionados con la búsqueda de rutas y la asignación de longitudes de onda en estas redes, estos problemas se resuelven a través de procesos algorítmicos que pueden ser convencionales o heurísticos. Los algoritmos convencionales sólo satisfacen los requerimientos en condiciones de tráfico estático. Sin embargo, los algoritmos heurísticos pueden ser procesados en escenarios de tráfico dinámico. Este documento propone una estrategia global para hacer frente al DLE (Establecimiento de Caminos de Luz dinámicos), es decir, sin dividir el problema, utilizando varios algoritmos heurísticos. Los resultados mostrados indican que los algoritmos heurísticos responden mejor bajo estrés en escenarios dinámicos, pero con un uso de la red alto.

Palabras clave: Simulado; Algoritmo genético; NSFNET; Longitud de onda; Búsqueda Tabú.

1. Introduction

Data transport networks have enabled the development of diverse technology, reaching photonic networks. The latter, operated through SDH/SONET, allow up to 2.5 Gbps for wavelength and at greater longitudes, WDM (Wavelength Division Multiplexing) appears.

One of the most important networks that uses these methodologies is NSFNET (National Science Foundation Network). The most important problems in these networks is the RWA (Routing Wavelength Assignment) solution, with continuity constraints of wavelength and reusing wavelength, the latter not having been studied because the offer of the service is higher than the demand and reusing the wavelength

does not substantially improve the current solutions [1].

In photonic networks, switching becomes relevant compared to routing, which for now is relegated to providing access to transport networks. For this reason, switching has prevailed, due to its control simplicity and response speed [2]. In the future, IP layer continuity seems weak because access technology will evolve toward optic connectivity [22]. In transport, traffic is evolving rapidly from static to dynamic. This implies a change in the solution universes, transforming from an optimizable one, with conventional algorithms to a non-optimizable one with heuristic algorithms [3].

Therefore, the current research is directed toward dynamic traffic studies, where the RWA problem is present, with wavelength reuse [4,5]. The latter carries a reconnection

time increase, so it is not widely used. To route the information, a path and a wavelength is necessary in each link of the lightpath. In literature there are two strategies. The first divides the problem in two parts (path search and wavelength assigning) and the second solves the problem in only one algorithm process, that is, comprehensively (without separating the problem). Of course, this has advantages such as obtaining more paths, but not necessarily available wavelengths, and the second obtains paths and wavelengths but at higher computer costs. The algorithms studied in this article work under conditions of restricted wavelength continuity (CCW). This guarantees that in each link of the selected route uses the same wavelength, but it has the disadvantage of reducing the universe of possible solutions and with low connection establishing time [4,5]. In general, this problem has been solved by subdividing the problem in two parts. The first solves the path based on minimizing a pre-established condition such as cost, retardation, etc. The second solves the wavelength assigning problem through algorithms like First Fit (FF), Next Fit (NF), among others [4-6]. There are other proposals that solve the problem comprehensively, achieving good results under conditions of stress [7-9]. The article compares the results of different heuristics through simulation and makes visible better dynamic traffic conditions for optical networks.

2. The optical network problem

The increase in demand continues its path toward accelerating connection requests, driving the quest for paths and related wavelengths that are increasingly faster and more numerous to strengthen transport of optical networks. The routes are made up of one or more links between OXC (Optical Cross Connect) of the network; wavelengths are luminous signals that pass through links at different frequencies. Fig. 1 shows part of an optical network where OXC are differentiated as A, B, C and D are connected with optical fiber links that support both wavelengths (λ_0 and λ_1).

Depending on the OXC technology, these may commute fibers, wavelengths, wavelength bands, TDM time channels.

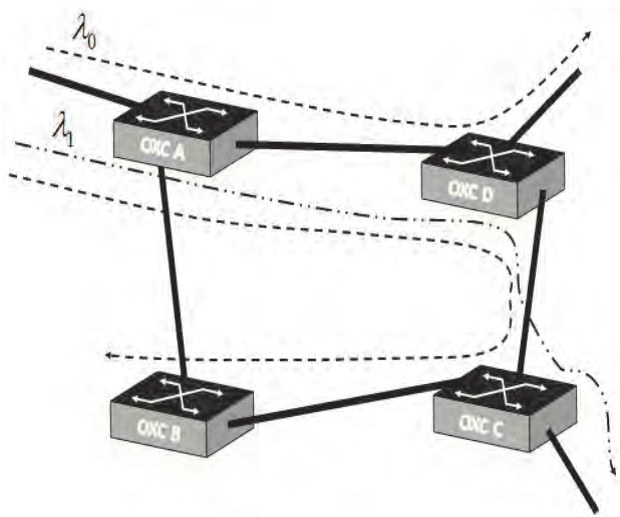


Figure 1. Example of Containment in Optical Networks.
Source: Own

For this case, wavelengths will be commuted. Optical fiber routes are made up of optical links that are directed toward light rays (data) through the same wavelength according to CCW, the pair (R, λ) , is called lightpath (LP) [10], where R is the set of conforming links and λ is the wavelength used in the route.

However, the possibility of finding available LP is exhausted when the demand outstrips the availability. This is when the request is blocked. Routing systems have been developed reusing wavelength, where the change in λ is allowed, however, studies have not shown meaningful changes in the performance of the routing [11].

Fig. 1 shows 4 OXC that are part of a greater system, the established routes (LP) with their respective wavelength (scripted) are $(A-D, \lambda_0)$ and $(A-D-C, \lambda_1)$. It is observed that a service request reaches node A toward node B. Node A has a path $A-D-C-B$, therefore a wavelength must be assigned, however, it is observed that link A-D does not have available wavelength, so another wavelength must be used, or a different route must be found. This problem is called containment.

3. Modeling demand

The network has current traffic, future demand or request that determines the static and dynamic simulation scenario, the RWA problem is called SLE (Static Lightpath Establishment) if the traffic is static and DLE (Dynamic Lightpath Establishment) if the traffic is dynamic [5]. Traffic is dynamic when average requested connection time (t_c) is lower than the average of received service requests (t_{LL}).

The scenario is not optimizable (NP-Complete), therefore heuristic algorithms are used and of which most offer solutions that are not necessarily optimum. Computer complexity is an important element of this problem, because when it is subdivided, it able to be reduced. On the other hand, multiple paths that obtain heuristic algorithms are of great support, when the problem of containment is presented, and this way, avoiding executing a new algorithm process. The characteristics of the demand variables are similar to those used in the works [3-5].

3.1. Network demand

The edge nodes (Edge OXC) receive requests (with Poisson distribution, however different probability scenarios could be studied). These requests carry 3 parameters to be satisfied, or else the request must be blocked.

$$d_i^s = (r_o, r_d, n_c, t_c) \quad (1)$$

Where:

- d_i^s Is the vector that represents the i - number of demand
Reaches the s -number edge node.
- r_o Identification number of the origin node of the
Incoming demand.
- r_d Identification number of the destination node of the
Incoming demand.

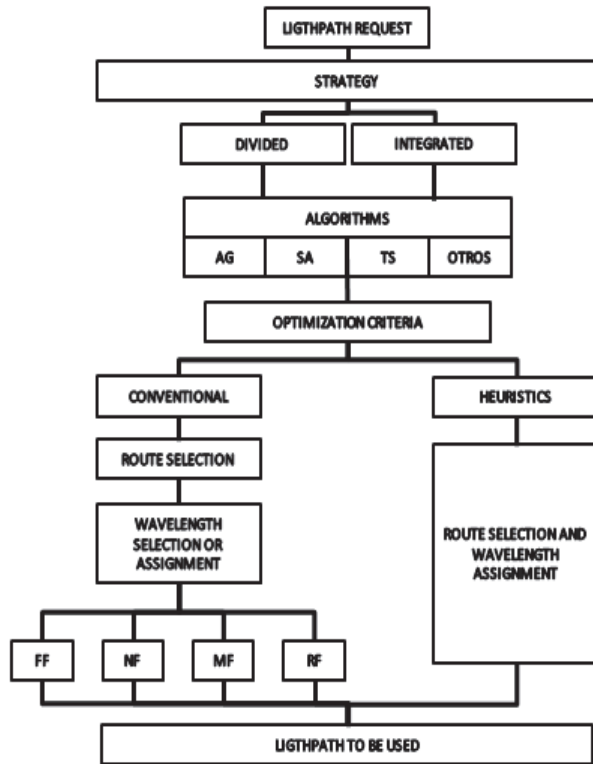


Figure 2. RWA-CCW Solution Strategies.
Source: Own

n_C Number of connections requested towards r_D .

t_C Connection time requested for the pair (r_O, r_D) .

The problem is to establish paths and wavelengths, observing the indicators used in the works [3]-[5], as least probability of request blockage and network use.

4. Heuristics used

The problem is to establish paths and wavelengths, observing the indicators used in the works [3-5], as least probability of request blockage and network use. The research is based on DLE, the same that has been tested under different strategies and heuristics to satisfy the demand of an optical network and has used optimization criteria and algorithms described in [3,7].

Fig. 2 shows a classification of the strategies found in literature, to solve the problems of SLE and DLE, such as: Ant [12-14], Genetic [3,7], Tabú Search [1,15-19] and Simulated Annealing [8], all work with the strategy of dividing the problem in 2 parts, except, [3,7,8] that do it comprehensively that is, without dividing the problem and solving it in only one algorithm process. Also, other heuristic algorithms are found, one of which is mimetic algorithm Snake One, based on the displacement of cost in the matrix and its similarity with snake movement [23].

The diagram of Fig. 3 also shows the processes found in literature to solve the RWA problem. As observed, it will use the division strategy until it is completely solved, using different criteria and holistic algorithms to obtain a path and

a wavelength. It should be noted that in optical networks, optimization is not necessarily sought, but a path that works without generating an important increase in the probability of blockage without increasing network usage. Table 1, shows the studied heuristic algorithms.

4.1. Genetic Algorithm (GA)

In this algorithm, the nodes are arranged in a vector of N elements, where N is the number of Nodes in the Network. This vector represents the Chromosome and each element represents the genes. For example, the optical network with 6 nodes, labeled from 0 to 5.

One chromosome filled randomly could be (3,2,0,2,3,5), where the first and the last element represent the origin and destination of the sought path. A set of chromosomes form a two-dimensional matrix, with the objective of finding the solution vector named population. The population is subjected to change that come from exchanging genes of adjacent chromosomes and each time the cost of the path is evaluated and ordered from lowest to highest costing path.

Then, a threshold of population mortality is established, where the most apt chromosomes prevail, that is, the ones that generate the least cost. As the algorithm is repeated, the chromosomes will reproduce within the lowest costing paths.

This way, in some cases the resulting route is the absolute minimum and in most cases it is the local minimum. More information regarding algorithms may be found in [3,6-8,24]. In Fig. 3 and Fig. 4 the reproduction process of the genetic algorithm may be observed.

4.2. Simulated Annealing (SA) Algorithm

This algorithm uses the molecular behavior of bodies as they slowly cool, reaching a molecular order that generally improves its physical properties. Fig. 5 this behavior.

In this case the body is treated as a very active gas element obeying general laws within its volume.

Fig. 6 shows a matrix that is considered as a material with its heat energy distributed by layers, with the coldest in the center and the hottest toward the ends, N represents the number of nodes of the network, m the number of elements of the population matrix and j the position of the layer in rotation.

Table 1.
Heuristic Used.

Algorithm	Operating Principle
Genetics	Reproduction
Simulated Annealing	Cooling Materials
Tabu Search	Punishing and not repeating errors

Source: Adapted from [3,7,8]

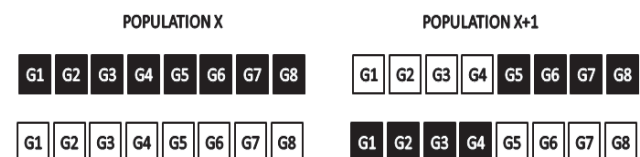


Figure 3. Reproduction of Generation X to X+1.
Source: [3]

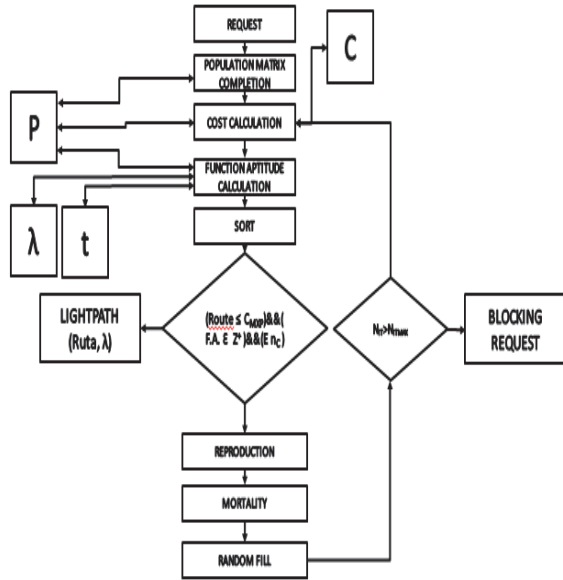


Figure 4. GA Flow Chart.
Source: [3]

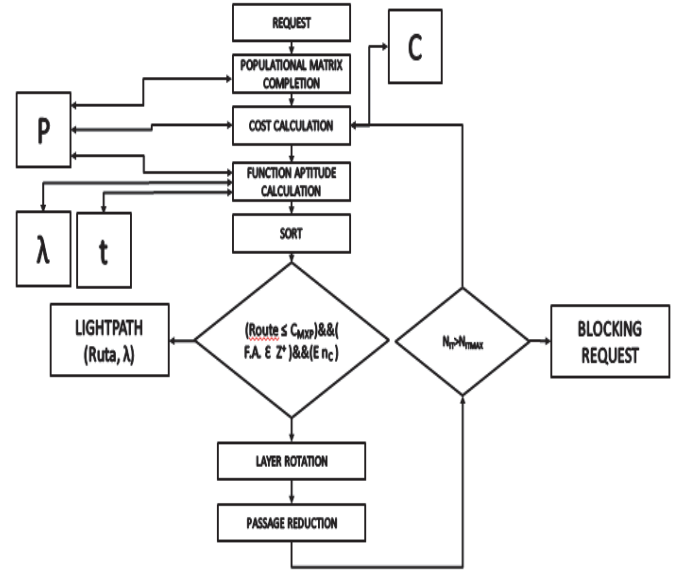


Figure 7. SA Flow Chart.
Source: [7-8]

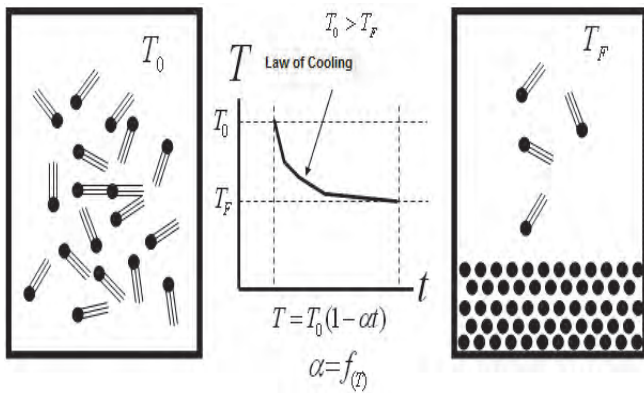


Figure 5. Function principle of simulated annealing.
Source: [8]

This way, the layers will move at different speeds due to heat transfer. The costs of the routes are calculated at all times, obtaining a final route that is not necessarily the absolute minimum. More information of generic algorithms may be seen in [8,9].

4.3. Tabú Search (TS) Algorithm

The TS algorithm was developed by Dr. Fred Glover (1989). It was not until 1990 that the algorithm became popular for the approximate solution of optimization problems. The advantage of the algorithm is that once a possible solution is found it converges quickly. This convergence is because actions that stray from the local solutions are punished, and neighbors with high probabilities of having a solution are preserved. Basically it is sustained that more is learned from errors, generating information so they are not repeated. TS has established new records in searches for the best solution to problems in production planning and programming, resource assigning, network design, portfolio planning, supply chain management, agent based modeling, business process design, provision, automatic learning, data mining, etc. [20,21].

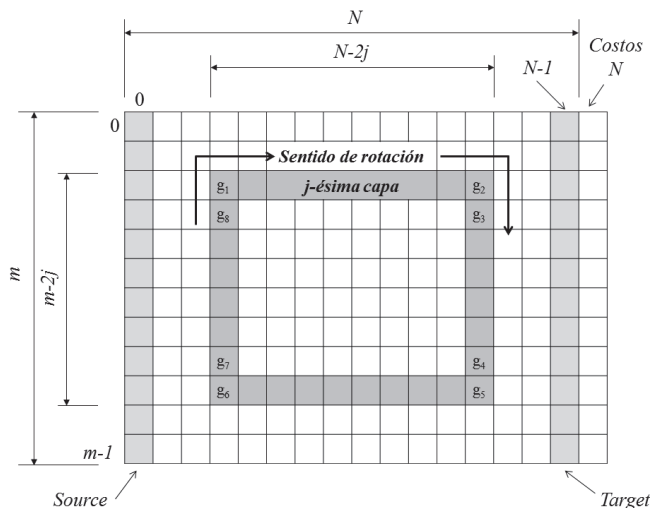


Figure 6. Matrix structure of the initial population.
Source: [8]

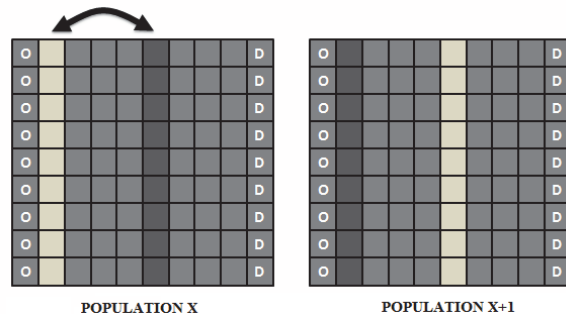


Figure 8. Column exchange for Tabu Search.
Source: [25]

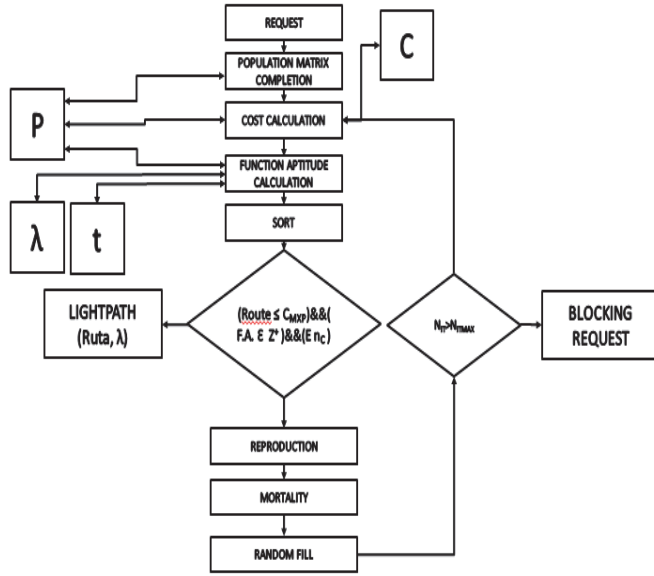


Figure 9. TS Flow Chart.
Source: [25]

Fig. 8 shows the column exchange of the population matrix. This process is registered as beneficial when the aptitude function decreases and as not beneficial when it increases and is therefore punished so it is not repeated.

Figs. 4, 7 and 9 show the flow chart of the used algorithms where the request is blocked after a number of iterations given as threshold, for computer efficiency of the process.

5. Comparison scenario

Once the simulation was conducted it was compared with 4 works [3] and [8] under comprehensive solution conditions and [4-5] under conditions of subdivision of the problem.

The NSFNET Network used for the test has 14 nodes and 21 optical fiber links (see Fig. 10). The parameters used were similar to those presented in [5]. Probability comparisons of



Figure 10. NSFNET Network used.
Source: [3,7,8]

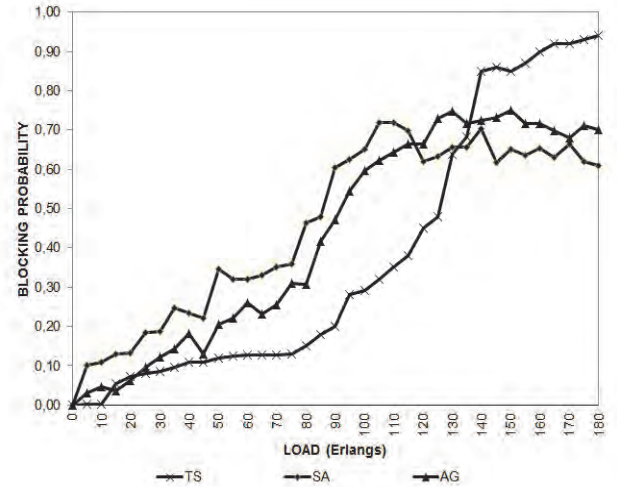


Figure 11. Probability Comparison of Blocking in NSFNET.
Source: Own

blockage and network use were conducted, varying the charge in the interval $[0,180]$ with increases of 10 Erlangs. The number of connections made during the simulation in [4,5] of this work were 10^8 connection requests.

6. Results

In the comparison of heuristics with indicators such as the blocking probability and network use, it is observed that the studied algorithms tend to improve blocking probability in high load dynamic traffic, especially over 100 Erlangs, as observed in figs. 11 and 12. However, the network use resulted higher and this is a problem for network availability. Fig. 12 shows the blocking probability (BP) and it is observed that TS has a low BP up to 120 Erlangs, outperforming the rest of the algorithms. This is mainly because TS finds LP passing through a neighborhood of solutions that is lower than the rest of the algorithms, but over 120 Erlangs, TS is not the best, determined for high loads of incoming traffic TS does not perform better than the rest of the algorithms.

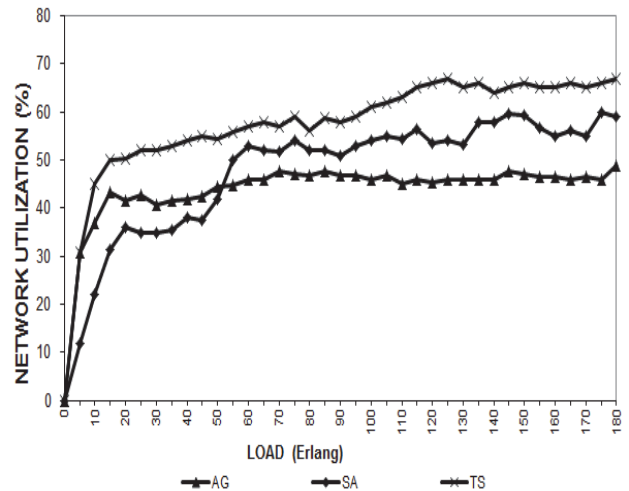


Figure 12. Comparison of Network Utilization in NSFNET.
Source: Own

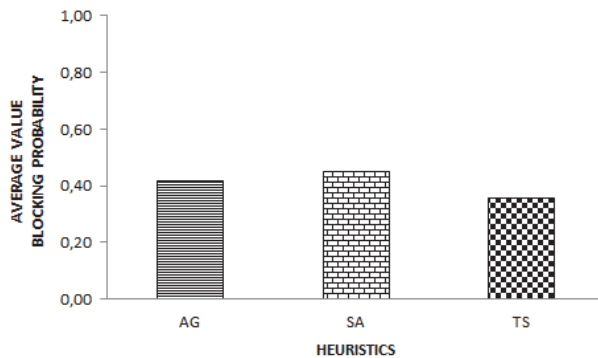


Figure 13. Probability average Comparison of Blocking in NSFNET.
Source: Own

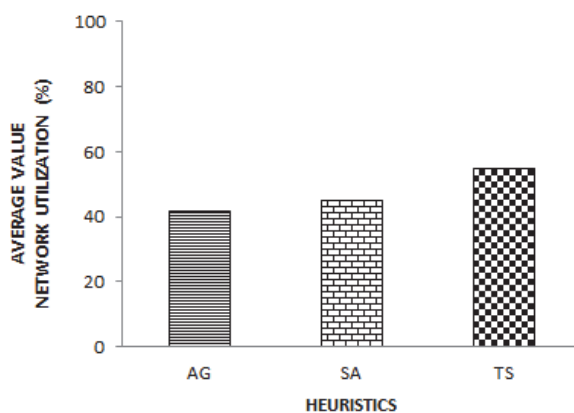


Figure 14. Comparison of average Network Utilization in NSFNET.
Source: Own

It is important to mention that the studies shown were conducted with 8 wavelengths and reaching 180 Erlangs.

Fig. 12 shows the characteristics of the algorithms compared to the network usage (NU). The TS algorithm is not the best one and quickly uses many network resources.

The other algorithms have a much lower NU, which leads to the reflection on the routes obtained by the TS algorithm has many more jumps compared to the other algorithms, which consequently results in higher network usage.

Fig. 13 shows the average values of the blocking probability to facilitate its comparison, observing that the Tabú Search (TS) heuristics performs the best.

Fig. 14 shows the average network use value, observing that the evolutionary heuristics (GA) use network resources the least. In Fig. 13 and Fig. 14, the Blocking Probability and the Network Utilization are inversely proportional; while one increases, the other decreases. That is to say, if the blocking probability improves, this is done at the cost of elevating the network utilization, and vice-versa.

7. Conclusions

It is established that heuristic algorithms tend to use more network resources, increasing the NU (Network Utilization)

indicator, but in high load dynamic traffic scenarios their behavior is stable resulting in relatively low blocking probability. This observation leads to modifying the comprehensive strategy, to improve the NU and BP (Blocking Probability) indicators simultaneously. This new solution strategy is called Localized Integral Strategy (LIS). The results of this new strategy may be observed in future publications with a new heuristic proposal called SNAKE and GEAR, proposed by both New Technology Research Group (GINT, its acronym for its name in Spanish, Grupo de Investigación de Nuevas Tecnologías) of the Faculty of Technology of Universidad de Santiago de Chile, and Telemedicine Research Group (TIGUM, its acronym for its name in Spanish, Grupo de Investigación en Telemedicina) of the Faculty of Engineering of Universidad Militar Nueva Granada of Bogotá, Colombia.

It is established that heuristic algorithms tend to use more network resources, increasing the NU (Network Utilization) indicator, but in high load dynamic traffic scenarios their behavior is stable resulting in a relatively low BP (Blocking Probability) indicator. Both indicators have an inversely proportional behavior, i.e., if one increases, the other decreases. This observation leads to the need to modify the comprehensive strategy, to simultaneously improve the NU and BP indicators.

This new solution strategy is called Localized Integral Strategy (LIS) or Estrategia Integral Localizada (EIL). The results of this new strategy will be seen in upcoming publications, together with other heuristic proposals called Snake One, Snake Two and Snake Three.

Acknowledgements

Special appreciation is expressed to the DICYT Program of Universidad de Santiago de Chile – USACH (Project DICYT N° 061572RG), for its important support in research and development, and particularly to the New Technologies Research Group (GINT-DTI-USACH).

References

- [1] Charbonneau, N. and Vokkarane, V., Tabu search meta-heuristic for static multicast routing and wavelength assignment over wavelength-routed optical WDM networks, Proceedings of Communications (ICC), 2010 IEEE International Conference on, 2010, pp. 1-5. DOI: 10.1109/ICC.2010.5502241
- [2] Al-Momin, M. and Cosmas, J., The impact of content oriented routing on openflow burst switched optical networks, Proceedings of Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA), 2013 27th International Conference on, 2013, pp. 965 -970. DOI: 10.1109/WAINA.2013.139
- [3] Rodríguez, A. y Saavedra, F., Enrutamiento y asignación de longitudes de onda en redes WDM: Solución simultánea basada en algoritmos genéticos, Proceedings of XVI Congreso Internacional de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Sistemas (IEEE INTERCON2009), 2009.
- [4] Chu, X., Li, B. and Zhang Z., A Dynamic RWA algorithm in a wavelength-routed all-optical network with wavelength converters, Proceedings of INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications. IEEE Societies, 3, pp. 1795-1804. 2003, DOI: 10.1109/INFCOM.2003.1209202

- [5] Zang, H. and Jue, J., Dynamic lightpath establishment in wavelength-routed WDM networks, *IEEE Communications Magazine*, 39(1), pp. 100-108, 2001. DOI: 10.1109/35.948897
- [6] Barpanda, R., Turuk, A., Sahoo, B. and Majhi, B., Genetic algorithm techniques to solve routing and wavelength assignment problem in wavelength division multiplexing all-optical network, *Proceedings of Communication Systems and Networks (COMSNETS)*, 2011 Third International Conference on, 2011, pp. 1-8. DOI: 10.1109/COMSNETS.2011.5716507
- [7] Rodríguez, A. y Saavedra, F., Solución simultánea del enrutamiento y asignación de longitud de onda en redes WDM con algoritmos genéticos. *Proceedings of IEEE COLCOM*, pp. 91-94, 2008.
- [8] Rodríguez, A., Saavedra, F. y Ramírez, L., Simulated annealing, una propuesta de solución al problema RWA en redes fotónicas, *Proceedings of XVIII Congreso Internacional De Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Sistemas Y Ramas Afines (IEEE InterconUNI)*, 2011.
- [9] Guenduez, H. and Kadir, H., A well-arranged simulated annealing approach for the location-routing problem with time windows, *Proceedings of System Sciences (HICSS)*, 2013 46th Hawaii International Conference on, pp. 1144-1153, 2013. DOI: 10.1109/HICSS.2013.69
- [10] Kuri, J., Puech, N., Gagnaire, M., Dotaro, E. and Douville, R., Routing and wavelength assignment of scheduled lightpath demands, *IEEE Journal On Selected Areas in Communications*, 21(1), pp. 1231-1240, 2003. DOI: 10.1109/JSAC.2003.816622
- [11] Yi-Jen, C., Tsu-Hsiu, W. and Jui-Pin, W., High-speed semiconductor all-optical conversion device based on field-driven quantum well, *Proceedings of Advanced Infocomm Technology (ICAIT)*, 2013 6th International Conference on, pp. 147-148, 2013. DOI: 10.1109/ICAIT.2013.6621538
- [12] Bhaskaran, K., Triay, J. and Vokkarane, V., Dynamic anycast routing and wavelength assignment in WDM networks using ant colony optimization (ACO), *Proceedings of Communications (ICC)*, 2011 IEEE International Conference on, pp. 1-6, 2011. DOI: 10.1109/icc.2011.5962826
- [13] Ramesh, T., Amrutha, N., Madhu, A., Saumya, K. and Vaya, P., A proactive and self-regulated ant-based RWA protocol for all-optical WDM networks, *Proceedings of Process Automation, Control and Computing (PACC)*, 2011 International Conference on, pp. 1-5, 2011. DOI: 10.1109/PACC.2011.5978978
- [14] Zeng, P. and Yu, H., An ant-based routing algorithm to achieve the lifetime bound for target tracking sensor networks, *Proceedings of Communications*, 2006. ICC '06. IEEE International Conference on, 8, pp. 3444-3449, 2006. DOI: 10.1109/ICC.2006.255605
- [15] Skorin-Kapov, N., Heuristic algorithms for the routing and wavelength assignment of scheduled lightpath demands in optical networks, *Selected Areas in Communications*, *IEEE Journal*, 24(1), pp. 2-15, 2006. DOI: 10.1109/JSAC.2006.1677251
- [16] O'Brien, D., Chatelain, B., Gagnon, F. and Tremblay, C., A dual metaheuristic solution to the Min-RWA problem, *Proceedings of Optical Fiber communication/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*, pp. 1-3, 2008. DOI: 10.1109/OFC.2008.4528114
- [17] Dzungang, C., Galinier, P. and Pierre, S., A tabu search heuristic for the routing and wavelength assignment problem in optical networks, *IEEE Communications Letters*, 9(1), pp. 426-428, 2005. DOI: 10.1109/LCOMM.2005.05011
- [18] Khyda, D., Chamberland, S. and Pierre, S., Improvement of routing and wavelength assignment in WDM networks using tabu search, *Proceedings of Electrical and Computer Engineering Canadian Conference on (IEEE CCECE)*, 2, pp. 765-768, 2003. DOI: 10.1109/CCECE.2003.1226007
- [19] Ying, W., Tee, C. and Meng, L., A tabu search algorithm for static routing and wavelength assignment problem, *IEEE Communications Letters*, 9(1), pp. 841-843, 2005. DOI: 10.1109/LCOMM.2005.1506721
- [20] Glover, F., Tabu search, Part I, *ORSA Journal on Computing*, 1(3), pp.190-206, 1989.
- [21] Glover, F., Tabu Search, Part II, *ORSA Journal on Computing*, 2(1), pp. 4-32. 1990.
- [22] Rodríguez, A., Ramírez, L., Espinoza, J. Ampuero, L. y Ramírez, C., Enrutamiento y asignación de longitud de onda: Algoritmos heurísticos bajo tráfico dinámico en redes WDM, *Proceedings of XXI Congreso Internacional de Ingeniería Electrónica, Eléctrica y Computación (INTERCON2014)*, pp. 265-270, 2014.
- [23] Montoya, J., Solano, E. and Durán, C., Memetic algorithm to minimize costs of activities in RCPSP, *Dyna*, 79(179), pp. 86-95, 2012.
- [24] Navarro, R., Puris, A. y Bello, R., Desempeño de algunas meta-heurísticas en problemas continuos analizados según la posición del óptimo en el espacio de búsqueda, *Dyna* 80(180), pp. 60-66, 2013.
- [25] Rodríguez, A., Ramírez L, Rivera L. and Gutierrez A., Routing wavelength assignment: A solution with tabu search in dynamic traffic. In: *Ingeniare. Rev. Chil. Ing.*, 22(4), pp. 495-503, 2014. DOI: 10.4067/S0718-33052014000400005

A.B. Rodríguez-García, Received a BSC. degree in Mechanical-Electrical Engineering in 2000, a MSc. degree in Telecommunications in 2003, and a PhD. in Engineering Sciences in 2007, the first of the Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Peru and the rest of the Universidad de Santiago de Chile, Santiago, Chile. From 2000 to 2003, he worked as an academic at several state universities in Peru and Chile, from 2004 he has worked at Universidad de Santiago de Chile as a researcher in the area of telecommunications, specializing in fiber optic networks. Academic and research group director of new technologies at the Faculty of Technology of Universidad de Santiago de Chile. His research interests include simulation modeling photonic network devices; luminous routing heuristics and optimization of optical networks using metaheuristics.
ORCID: 0000-0002-8383-6561

L.J. Ramírez-López, Received his BSC. degree in Electronic Engineering from University Antonio Nariño in 1997. In 2002, he received the Electronic Instrumentation Specialist award. In 2006 he obtained a MSc. degree in Engineering Systems at the National University of Colombia. PhD of Mogi das Cruzes of Sao Paulo, Brazil. Director of Telemedicine Research Group of New Granada Military University, is co-investigator of the Research Group on Communications and Security Informatics, Faculty of Engineering, Engineering program in Telecommunications of Military University Nueva Granada. Bogotá, Colombia.
ORCID: 0000-0002-6473-5685

J.C. Espinoza-Oyarzún, Received of State Professor of Chemistry, Natural Sciences Merceologia in 1971 from Universidad Técnica del Estado (UTE). MSc. in Education, Curriculum and Evaluation mention 2008 from Universidad de Santiago de Chile (UTE). Specialization Diploma in Plastics in 1980 at Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros, Madrid, Spain. Diploma in Innovation and Technology in the Context of Strategic Management in 1998 from Universidad de Santiago de Chile and Instituto Tecnológico de Monterrey, Mexico. Deputy Dean of the Faculty Teaching Technology, 2010 at Universidad de Chile.
ORCID: 0000-0003-2572-338X

A polynomial chaos expansion approach to the analysis of uncertainty in viscoelastic structural elements

Francisco Evangelista Jr^a & Nelson Afanador-García^b

^a Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil. fejr.unb@gmail.com,

^b Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil. Facultad de Ingeniería, Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña, Colombia. nafanadorg@aluno.unb.br, nafanadorg@ufps.edu.co

Received: October 28th, 2015. Received in revised form: March 20th, 2016. Accepted: August 1st, 2016.

Abstract

The uncertainty propagation in mechanical systems through model calculations was analyzed in this article by stochastic polynomial series of standardized random variables called Polynomial Chaos Expansion. This paper aimed to simulate the propagation of uncertainty in more complex mechanical models such viscoelastic structures which involves time dependent parameters characterization of materials, interconversion of mathematical functions through Laplace transform, and resolution of the constitutive equation through convolution integrals. The application of multi-dimensional Hermite polynomials series allowed the prediction of the randomness of the output vector. In this work it was demonstrated that a polynomial chaos expansion accurately estimated the spread of uncertainty of the random variables. The results showed that the material parameters not only affects the coefficient of variation of the displacements, but also dictates the type and spread of the tails of the probability density function for the structural output.

Keywords: Stochastic analysis; Polynomial chaos expansions; Viscoelasticity; relaxation modulus.

Un enfoque de polinomio de expansión de caos al análisis de la incerteza en elementos estructurales visco elásticos

Resumen

La propagación de la incerteza en sistemas mecánicos a través de modelos de cálculo fue analizado en este artículo por series de polinomios estocásticos de variables aleatorias estandarizadas llamados Polinomios de expansión de caos. Este artículo tuvo como objetivo simular la propagación de la incerteza en modelos mecánicos más complejos tales como estructuras visco elásticas el cual implica caracterización de parámetros dependientes del tiempo de materiales, interconversión de funciones matemáticas a través de transformada de Laplace, y resolución de la ecuación constitutiva mediante integrales de convolución. La aplicación de series de polinomios Hermite multidimensionales permitió la predicción de la aleatoriedad del vector de salida. En este trabajo se demostró que un polinomio de expansión de caos estima adecuadamente la propagación de la incerteza de las variables aleatorias. Los resultados mostraron que el parámetro material no solo afecta los coeficientes de variación del desplazamiento, sino también dicta el tipo y propagación de las colas de la función de densidad de probabilidad para la respuesta estructural.

Palabras claves: Análisis estocástico; Polinomios de expansión de caos; Viscoelasticidad; módulo de relajación.

1. Introducción

La determinación de la incertidumbre es fundamental en la modelación de sistemas mecánicos especialmente por su aplicación regular. La incertidumbre puede ser atribuida a, i) aleatoriedad inherente o a la impredecibilidad del sistema

físico, ii) simplificaciones y aproximaciones en la formulación del modelo, iii) un conocimiento parcial de las variables de entrada, debido a la inexactitud o insuficiencia de datos (incertidumbre en los datos). Existen otras clasificaciones de incertidumbre que están fuera del alcance de este trabajo, y que están disponibles en la literatura para el lector interesado [20].

How to cite: Evangelista Jr, F. & Afanador García, N. Un enfoque de polinomio de expansión de caos al análisis de la incerteza en elementos estructurales Visco elásticos DYNA 83 (199) pp. 172-182, 2016

La incertidumbre en los resultados del modelo, esta normalmente centrado en la incertidumbre de los datos y consiste de, i) caracterización de las variables del modelo vía sus funciones de densidad de probabilidad (*fdp*), y ii) la propagación de estas *fdp* a través de la ecuación del modelo para obtener las *fdp* de la variable de salida seleccionada.

Dos enfoques comúnmente utilizados para establecer la propagación de la incertidumbre en los parámetros del modelo son, el método analítico y el método de Monte Carlo. En el método analítico [1,13] la incertidumbre en la salida es representada explícitamente como funciones de incertidumbre en las variables de entrada; son principalmente utilizados en pequeños rangos de incertidumbre en las variables y no pueden ser usados en complejos modelos no lineales. El método de Monte Carlo [10, 16] involucra un número suficientemente grande de corridas del modelo con un muestreo aleatorio de las variables de entrada, estimadas mediante las *fdp* con gran costo computacional y tiempo especialmente para el caso que envuelve un número grande de incertidumbre en los datos. Por lo tanto, hay la necesidad de utilizar otros métodos computacionales más eficientes para la estimación de la incerteza en modelos complejos, que utilicen un número significativamente reducido de soluciones. Estos métodos utilizan técnicas de reducción de varianza tales como importance sampling [29] y simulación de Monte Carlo Markov Chain [11] y han sido propuestos para reducir el número de corridas sin comprometer la precisión.

Otra estrategia que puede ser utilizada como una versión sustituta, aproximada y más barata, son los polinomios Hermite multidimensionales (comúnmente llamados Polinomios de expansión de Caos, PEC) [4,35,27]. El PEC pueden ser clasificados dentro de dos enfoques: formulación intrusiva y no intrusiva; en la formulación intrusiva la incerteza es expresada explícitamente dentro del análisis del sistema que se está investigando (utiliza el Método de Galerkin [30]), en la formulación no intrusiva el PEC son usados para crear superficies de respuesta (llamado método de superficie de respuesta estocástico [18]) sin interferir en el análisis del sistema [7].

La literatura no reporta un estudio sobre el impacto de la incertidumbre asociada con el ajuste de parámetros del material de la función de fluencia y/o módulo de relajación en la respuesta final dependiendo del tiempo. El único artículo encontrado en este tema es el trabajo de [27,23] quien llevó a cabo un estudio paramétrico y destacó la importancia de considerar aspectos meteorológicos en la respuesta viscoelástico. Sin embargo, su trabajo fue basado en simulación de Monte Carlo el cual demandó miles de simulaciones para determinar la variabilidad de la salida, más el número de simulaciones no fue lo suficiente para proporcionar con precisión las funciones de densidad de probabilidad para la respuesta de un proceso estocástico.

El presente trabajo analizó la aleatoriedad de las variables de tres parámetros del modelo sólido (E_∞ , E_1 y ρ_1) en la determinación del módulo de relajación utilizando PEC como una formulación no intrusiva y determinando los coeficientes del polinomio mediante la implementación del método de la colocación probabilística [32,33]. La principal contribución de este trabajo fue la cuantificación de la propagación de la

incerteza de los tres parámetros del modelo sólido sobre la caracterización integral del módulo de relajación y también en la respuesta estructural tal como el desplazamiento en problemas de contorno visco elástico. Esta caracterización probabilística fue alcanzado mediante la determinación de las funciones de densidad acumulativa (*fdc*) y/o funciones de densidad de probabilidad (*fdp*) con las colas bien definidas. Esto permitió una cuantificación completa de la incertidumbre en modelos de materiales más complejos como el visco elástico que envuelve la convolución del módulo de relajación para el cálculo de deflexiones.

2. Materiales y métodos

La propagación en la incertidumbre de los parámetros de entrada del modelo es llevada a cabo mediante: i) las incertidumbres en los parámetros de entrada son expresados en términos de un conjunto de variables aleatorias, ii) la forma del funcional es asumida para la salida seleccionada, iii) los parámetros de la aproximación del funcional son determinísticos. La incertidumbre en las variables aleatorias puede ser analizada desde diferentes métodos de simulación, uno de ellos es el Método de Monte Carlo.

2.1. Método de Monte Carlo

El Método de Monte Carlo (MMC) envuelve un número significativamente grande de simulaciones del modelo analítico o numérico con combinaciones de las variables aleatorias; dada la distribución de probabilidad y los parámetros de la distribución, las variables aleatorias pueden ser obtenidas mediante la implementación del método de transformación inversa [22], véase ec. (1). Para establecer los valores de las variables aleatorias se siguió el siguiente algoritmo: [19]

Dada la expresión $Y = g(X)$ donde g representa el modelo en consideración, X es un vector que representa la incerteza en las variables de entrada y Y representa un vector de salida estimado, así,

- I. Define las distribuciones de probabilidad y los parámetros de la distribución de cada variable aleatoria de entrada.
- II. Genera un valor de muestreo de cada una de las j variables (X_j) aplicando el método de la transformación inversa.
- III. Evalúa la respuesta desde el modelo analítico o numérico usando los valores de X_j .
- IV. Repita los pasos ii) y iii) para generar una distribución de probabilidad de la respuesta. El número de simulaciones (N) es elegido tal que la distribución de salida converja a un valor establecido.

En el presente trabajo, la simulación del modelo estocástico ($E(t)$ y δ) utiliza el método de Monte Carlo como una base de referencia para validar la precisión del enfoque basado en PEC [13,19,22,30].

2.2. Método de superficie de respuesta estocástico

El método de superficie de repuesta estocástico (MSRE) puede ser interpretado como una adición del Método de

superficie de respuesta (determinístico, MSR), donde su principal diferencia son las entradas pues ellas son variables aleatorias. [17]

La Fig. 1 ilustra un diagrama de flujo donde se indican las etapas a seguir en el MSRE [15, 18]. Los 4 grandes pasos del MSRE son:

- I. Representación de la entrada estocástica.
- II. Representación del funcional de salida.
- III. Estimación de los coeficientes desconocidos del polinomio de expansión de caos.
- IV. Estimación de la estadística de salida y análisis de confiabilidad.

2.3. Representación de la entrada estocástica

Las entradas estocásticas deben ser representadas en términos de variables aleatorias estándar (VAE). Las variables aleatorias con distribución de probabilidad normal o gamma son frecuentemente elegidas para representar la incerteza en la entrada debido a la tratabilidad matemática de las funciones de estas variables aleatorias [9,24]. En el presente trabajo, estas variables aleatorias son referidas a variables aleatorias normal estándar distribuidas idéntica e independientes $\{\xi_i\}_{i=1}^n$, donde n es el número de entradas independientes y ξ_i tiene media cero y varianza uno. $\{\xi_i, i = 1, 2, \dots, n\}$ con n resultados del vector aleatorio normal estándar y donde para cada resultado de ξ_i la transformación isoprobabilística produce un vector de variables aleatoria de entrada X_i .

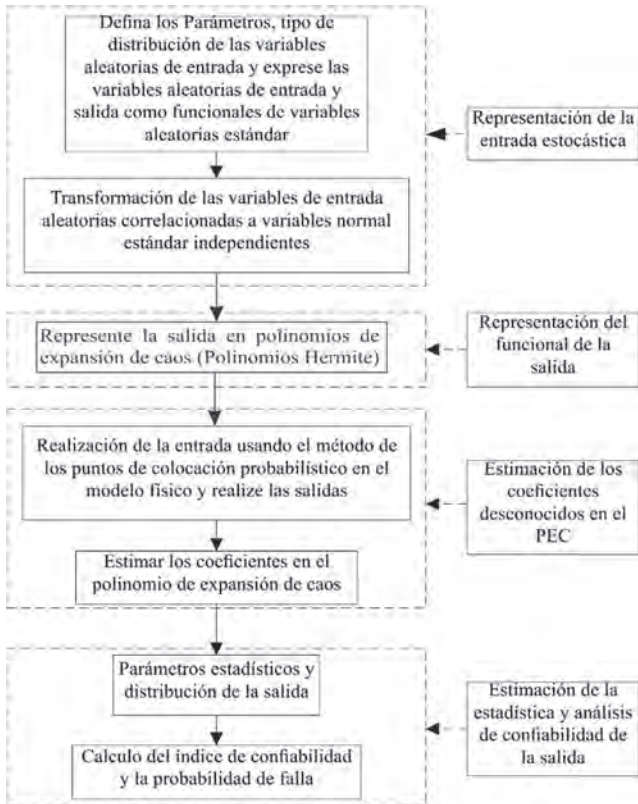


Figura 1 Diagrama de Flujo del Método de superficie de respuesta estocástico. Autores: [15, 17].

$$\xi_i = \Phi^{-1}(F_i(X_i)) \quad (1)$$

Donde Φ es la fdc normal estándar y $\{F_i(X_i), i = 1, 2, \dots, n\}$ son las fdc marginales de X_i s.

Para variables no correlacionadas la incertidumbre en la i -ésima entrada del modelo X_i , es expresada como una función de la i -ésima variable aleatoria normal estándar ξ_i que puede ser determinada mediante transformación directa de la entrada en términos de las VAE o en series aproximadas. Devroye [9] presenta técnicas de transformación y aproximación para un amplio número de variables aleatorias; variables aleatorias no encontradas en la literatura pueden ser aproximadas usando técnicas de expansión de series [33]. La transformación de 12 tipos de distribución frecuentemente usadas, son resumidas en la Tabla 1.

2.4. Representación del funcional de salida

La salida en un modelo mecánico está influenciada por todas las entradas. Una representación del funcional general de la incertidumbre en la salida del modelo debe ser tenida en cuenta en la incertidumbre de todas las entradas. Una aproximación del funcional ampliamente usado, son los polinomios de expansión de caos sobre el conjunto $\{\xi_i\}_{i=1}^n$, dado por:

$$\begin{aligned}
 y &= a_0 + \sum_{i_1=1}^n a_{i_1} \Gamma_1(\xi_{i_1}) \\
 &+ \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=1}^{i_1} a_{i_1 i_2} \Gamma_2(\xi_{i_1}, \xi_{i_2}) \\
 &+ \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=1}^{i_1} \sum_{i_3=1}^{i_2} a_{i_1 i_2 i_3} \Gamma_3(\xi_{i_1}, \xi_{i_2}, \xi_{i_3}) \\
 &+ \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=1}^{i_1} \sum_{i_3=1}^{i_2} \sum_{i_4=1}^{i_3} a_{i_1 i_2 i_3 i_4} \Gamma_4(\xi_{i_1}, \xi_{i_2}, \xi_{i_3}, \xi_{i_4}) \\
 &+ \dots,
 \end{aligned} \quad (2)$$

Donde y es la salida aleatoria del modelo, $a_{i_1, \dots, i_n}$ son constantes determinísticas a ser halladas, n es el número de variables aleatorias usadas para representar la incertidumbre de la entrada del modelo, $(\xi_{i_1}, \xi_{i_2}, \dots, \xi_{i_n})$ son variables aleatorias normales estándar independientes y $\Gamma_p(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ son polinomios Hermite multidimensionales de grado p . Los polinomios de caos pueden ser construidos apartir de la función generadora de los polinomios de Hermite de grado p para el orden p está dado por:

$$\begin{aligned}
 \Gamma_p(\xi) &= \Gamma_p(\xi_{i_1}, \xi_{i_2}, \dots, \xi_{i_p}) \\
 &= (-1)^p e^{\frac{1}{2} \xi^T \xi} \frac{\partial^p}{\partial \xi_{i_1} \partial \xi_{i_2} \dots \partial \xi_{i_p}} e^{-\frac{1}{2} \xi^T \xi}
 \end{aligned} \quad (3)$$

Tabla 1.

Transformación de variables aleatorias comunes a variables aleatorias normal estándar.

Tipo de distribución	Función de densidad de probabilidad	Transformación, $x = f(\xi)$
Uniforme	$f(x) = \frac{1}{b-a}$	$x = \Phi(\xi)(b-a) + a$
Normal	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right)$	$x = \mu + \sigma\xi$
Lognormal	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}vx} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x)-\lambda}{v}\right)^2\right)$	$x = \exp(v\xi + \lambda)$
Chi-cuadrado	$f(x) = \frac{1}{2^{\frac{n}{2}}\Gamma(\frac{n}{2})} x^{\frac{n}{2}-1} \exp\left(-\frac{x}{2}\right)$	$x = n\left(\xi\sqrt{\frac{2}{9n}} + 1 - \frac{2}{9n}\right)^3$
Exponencial	$f(x) = \lambda \exp[-\lambda(x-x_0)]$	$x = x_0 - \frac{\ln(1-\Phi(\xi))}{\lambda}$
Frechet	$f(x) = \left(\frac{u}{x}\right)^k \frac{1}{x} \exp\left(-\left(\frac{u}{x}\right)^k\right)$	$x = \frac{u}{\left(-\ln(\Phi(\xi))\right)^{\frac{1}{k}}}$
Gamma	$f(x) = \frac{x^{a-1}}{b^a\Gamma(a)} \exp\left(-\frac{x}{b}\right)$	$x = ab\left(\xi\sqrt{\frac{1}{9a}} + 1 - \frac{1}{9a}\right)^3$
Rayleigh	$f(x) = \frac{(x-x_0)}{a^2} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-x_0}{a}\right)^2\right)$	$x = x_0 + a\sqrt{-2\ln(1-\Phi(\xi))}$
Tipo I máximo	$f(x) = \alpha \exp[-\alpha(x-u)] \exp[\exp(-\alpha(x-u))]$	$x = u - \frac{\ln[-\ln(\Phi(\xi))]}{\alpha}$
Tipo I mínimo	$f(x) = \alpha \exp[\alpha(x-u)] \exp[-\exp(\alpha(x-u))]$	$x = u + \frac{\ln[-\ln(1-\Phi(\xi))]}{\alpha}$
Weibull de tres parámetros	$f(x) = \frac{k(x-x_0)^{k-1}}{(u-x_0)^k} \exp\left(-\left(\frac{x-x_0}{u-x_0}\right)^k\right)$	$x = x_0 + (u-x_0)[- \ln(1-\Phi(\xi))]^{\frac{1}{k}}$
Triangular	$f(x) = \begin{cases} \frac{2(x-a)}{(b-a)(c-a)} & a \leq x \leq c \\ \frac{2(b-x)}{(b-a)(c-a)} & c < x \leq b \\ 0 & \text{otros} \end{cases}$	$x = \begin{cases} \sqrt{(b-a)(c-a)\Phi(\xi)} + a & a \leq x \leq c \\ b - \sqrt{(b-a)(b-c)(1-\Phi(\xi))} & c < x \leq b \end{cases}$

Fuente: Los Autores.

donde ξ es el vector que representa la incertidumbre en la entrada. Los polinomios Hermite definidos sobre $\{\xi_i\}_{i=1}^n$ es ortogonal con respecto al producto interno definido como la esperanza del producto de dos variables aleatorias [13], es decir que, el vector de orden n es ortogonal con el vector de orden $n-1$ y $n+1$.

$$E[\Gamma_p, \Gamma_q] = 0 \quad \text{para} \quad \Gamma_p \neq \Gamma_q \quad (4)$$

Es conocido que el polinomio Hermite multidimensional forma una base ortogonal y los PEC convergen en μ^2 . Si ξ es un vector aleatorio normal estándar, el polinomio Hermite multivariante esta normalizado [4].

En la práctica, los PEC son truncados a un número finito de términos (N) para un PEC de orden p y n número de variables aleatorias de entrada, el número de coeficientes desconocidos es:

$$N = \frac{(n+p)!}{n!p!} \quad (5)$$

2.4.1. Estimación de los coeficientes desconocidos del polinomio de expansión de caos.

El enfoque original en la determinación de los coeficientes de polinomios de expansión de caos truncados fue el enfoque Galerkin [13] utilizado en sistemas intrusivos para la solución de problemas mecánicos. Los métodos de solución para sistemas no intrusivos pueden ser clasificados en:

- Método de la proyección, hace uso directo de las propiedades de la base de PEC [13].

- Método de la colocación estocástica, está basado en la interpolación de Lagrange en el espacio estocástico. [33,36,37].
- Método de la regresión, soluciona para polinomios de alto grado la inestabilidad que se presenta en el método de la colocación [17], y recientemente mejorado a través de la estimación del error y la adaptabilidad [3,5,6].

El método de la colocación estocástica (MCE o probabilística) tiene la ventaja que desacopla la evaluación de la respuesta determinística y el análisis estocástico; análisis realizado en los puntos de colocación de más alta probabilidad y seleccionados tal que haya simetría respecto al origen. Por razones de inestabilidad del método para polinomios de alto orden fue utilizado el método de la regresión o método de la colocación basado en la regresión propuesto por Isukapalli [18] frecuentemente usado para estimar los coeficientes desconocidos del polinomio de expansión de caos, para mayores detalles el lector puede consultar las referencias [18,31].

En el método de la colocación basado en regresión el número de puntos seleccionados deberá ser dos veces el número de coeficientes desconocidos a ser estimados en el polinomio Hermite a fin de obtener un estimador robusto del coeficiente desconocido [18] enfoque usado en los Polinomios de expansión de caos en elementos viscoelásticos analizado en la sección 3.

Cuando N es un conjunto de puntos de colocación seleccionados, la salida $\mathbf{y} = [y_1, y_2, y_3, \dots, y_4]^T$ en cada conjunto de puntos de colocación puede ser obtenida. Reescribiendo en forma matricial,

$$\mathbf{ZC} = \mathbf{y} \quad (6)$$

Donde $\mathbf{Z}$ es una matriz en espacio independiente de dimensión $N \times N_a$, donde el polinomio Hermite es evaluado en el conjunto de puntos de colocación seleccionados. $\mathbf{C}$ es el vector de coeficientes desconocidos de dimensión $N_a \times 1$. Entonces la ec. (6) puede ser reescrita y solucionada,

$$\mathbf{Z}^T \mathbf{Z} \mathbf{C} = \mathbf{Z}^T \mathbf{y}, \quad \mathbf{C} = (\mathbf{Z}^T \mathbf{Z})^{-1} \mathbf{Z}^T \mathbf{y} \quad (7)$$

Los PEC es un método espectral [4,13,15,18,24,27] que permite la propagación de la incertidumbre de las variables aleatorias de entrada mediante la construcción de funcionales no lineales dependiente de la solución [13,21] a la variable aleatoria de salida, permitiendo cuantificar la incertidumbre de la salida mediante la *pdf* [32]. La convergencia de la solución aproximada es medida mediante la comparación de los PEC de diferente grado [17] o entre PEC y SMC [21,31], es por todo lo anterior que esta garantizada la precisión de los resultados. La convergencia espectral va a depender de la alta diferenciabilidad de las funciones de Hermite contenidas en cada variable aleatoria normal estándar [36] donde la solución aproximada converge en el error cuadrático medio.

2.4.2. Estimación de la estadística de salida y análisis de confiabilidad.

Determinado los coeficientes del polinomio, es posible evaluar las propiedades estadísticas de la salida, tales como *fdp*, función de distribución acumulativa (*fdc*), varios momentos y correlación entre la entrada y la salida. La probabilidad de falla y su correspondiente índice de confiabilidad puede ser hallada para la función de estado límite definida en el modelo de salida y representada como un polinomio de expansión de caos.

2.5. Viscoelasticidad

Los materiales visco elásticos lineales se caracterizan por tener un comportamiento intermedio entre un sólido elástico lineal y un fluido viscoso (simple o Newtoniano). Un material sólido elástico lineal cumple la ley de Hooke y por tanto, es cierto que los esfuerzos son proporcionales a la deformación (independiente del tiempo) es decir,

$$\sigma = E\epsilon \quad (8)$$

Donde E es la constante de proporcionalidad y puede ser representado por un resorte. Fluidos viscosos simples se caracterizan por tener viscoelasticidad constante a lo largo del tiempo y generalmente son representados por un amortiguador. Un fluido viscoso sigue la ley de Newton por lo tanto al someter un fluido a un esfuerzo de corte τ el cuerpo presenta una tasa de deformación $\dot{\epsilon}$ proporcional a la tensión aplicada. La relación constitutiva de los fluidos Newtonianos es,

$$\tau = \mu \dot{\epsilon} \quad (9)$$

Donde μ representa la viscoelasticidad. Los materiales viscoelásticos tiene la capacidad de almacenar energía deformación como un sólido elástico y disipar esta energía siguiendo la ley de los fluidos viscosos.

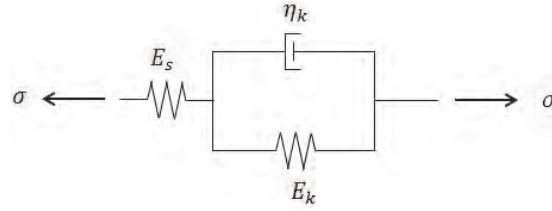


Figura 2 Modelo de Boltzmann para materiales viscoelásticos, Fuente: adaptado de [29]

Realizada una analogía mecánica entre los materiales eléctricos y visco elásticos, donde el módulo de elasticidad es equivalente a la capacitancia del circuito (mide la capacidad de almacenamiento de energía) y la resistencia del circuito es comparable con la viscoelasticidad (mide la capacidad para disipar energía) es usada para visualizar los diferentes modelos visco elásticos que se encuentran en la literatura [12]. El modelo de Boltzmann utilizado en este trabajo e ilustrado en la Fig. 2 considera un elemento de Kelvin y un elemento elástico simple trabajando en serie [8,25] y tiene la siguiente ecuación diferencial característica del sistema:

$$\left(1 + \frac{E_k}{E_s}\right) \sigma + \frac{\eta_k}{E_s} \dot{\sigma} = E_k \epsilon + \eta_k \dot{\epsilon} \quad (10)$$

Aplicando un tensión constante a lo largo del tiempo y considerando las condiciones de contorno $\epsilon(0) = \epsilon_0$ para el tiempo $t > 0$, $\dot{\epsilon}(t) = 0$ y resolviendo la ec. (10) se obtiene;

$$E(t) = \frac{E_s}{E_s E_k} \left(E_k + E_s e^{-\frac{E_s + E_k}{\eta_k} t} \right) \quad (11a)$$

donde $E(t)$ es el módulo de relajación y haciendo

$$E_\infty = \frac{E_s}{E_s + E_k} E_k, E_1 = \frac{E_s^2}{E_s + E_k}, \quad \rho_1 = \frac{\eta_k}{E_s + E_k} \quad (11b)$$

Reemplazando en la ec. (11a) se obtiene;

$$E(t) = E_\infty + E_1 e^{-\frac{t}{\rho_1}} \quad (12)$$

Es posible expresar la función de fluencia $D(t)$ en términos del módulo de relajación $E(t)$ mediante los métodos de interconversión [25, 26], es decir

$$D(t) = \frac{1}{E_\infty + E_1} \left[1 + \frac{E_1}{E_\infty} \left(1 - e^{-\frac{t}{\rho_1}} \right) \right] \quad (13a)$$

donde $D(t)$ es la función de fluencia y haciendo

$$D_0 = \frac{1}{E_\infty + E_1}, \quad D_1 = \frac{E_1}{E_\infty(E_\infty + E_1)}, \quad \tau_1 = \frac{\eta_k}{E_k} = \frac{\rho_1(E_\infty + E_1)}{E_\infty} \quad (13b)$$

Reemplazando en la ec. (13a) se obtiene;

$$D(t) = D_0 + D_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad (14)$$

3. Resultados

3.1. Polinomios de expansión de caos en elementos viscoelásticos: Módulo de relajación

El modelo del módulo de relajación considera variables aleatorias de entrada que siguen una distribución de probabilidad normal para E_∞ , E_1 y ρ_1 distribuidas idéntica e independientemente, debido a la incerteza epistémica de las distribuciones de probabilidad de los datos que surgen de los pocos ensayos de laboratorio. La pdf normal fue asumida para estos valores teniendo en cuenta la entropía estadística que dice, “cuando son conocidos dos parámetros como el promedio, la desviación estándar y se desconoce la distribución, la máxima entropía estadística es alcanzada con la distribución de probabilidad normal” [2,14]. En la Tabla 2 se establecen los parámetros de cada variable.

Las variables aleatorias normales estadísticamente independientes serán expresadas en términos de variables aleatorias normal estándar, es decir $E_\infty \rightarrow \xi_1$, $E_1 \rightarrow \xi_2$ y $\rho_1 \rightarrow \xi_3$.

La aplicación del MSRE para la estimación de la incertidumbre en la determinación del módulo de relajación $E(t)$ puede ser expresado en términos de polinomios de expansión de caos.

El efecto de la incerteza en las variables de entrada sobre el módulo de relajación $E(t)$ es analizado usando el MSRE $\hat{E}(t)$, y los coeficientes del PEC son determinados mediante el método de la colocación basado en la regresión, el cual requirió 20 soluciones de la ec. (12) para estimar los coeficientes determinísticos, es decir, atendiendo el requerimiento del método de la colocación basado en la regresión propuesto por Isukapalli [18]. Una comparación de las *fdp* de $E(t)$ hallado mediante el método de Monte Carlo utilizando la ec. (12) y realizando 1.000.000 simulaciones por variable aleatoria, mientras que $\hat{E}(t)$ utilizando PEC (ec.(2)) fueron necesarias sólo 50.000 simulaciones por variable aleatoria normal estandar para tener una buena estimativa de la *fdp* de $E(t)$ dado que el error fue de $3.5665E-20$ y el coeficiente de determinación $R^2 = 1$, halladas mediante la realización de un programa en el ambiente de programación, es indicado en la Fig. 3 para un $V = 0.1$. La simulación del modelo estocástico del Módulo de Relajación vía Monte Carlo y la simulación realizada vía Polinomios de expansión de caos llegaron al mismo resultado, sólo que PEC requirió el 5 % de los datos utilizados por Monte Carlo. Demostrada la eficiencia del método de la colocación probabilística en la determinación de los coeficientes del PEC lo cual corresponde a lo reportado por la literatura especializada

Tabla 2.

Parámetros de las variables aleatorias de entrada del modelo

Var(s). Aleatorias	Promedio, μ	Coef. de variación., V
E_∞	0.01 dyna/cm^2	0.1, 0.2, 0.3 y 0.4
E_1	1 dyna/cm^2	0.1, 0.2, 0.3 y 0.4
ρ_1	$1.0E+04 \text{ s}$	0.1, 0.2, 0.3 y 0.4

Fuente: Los Autores.

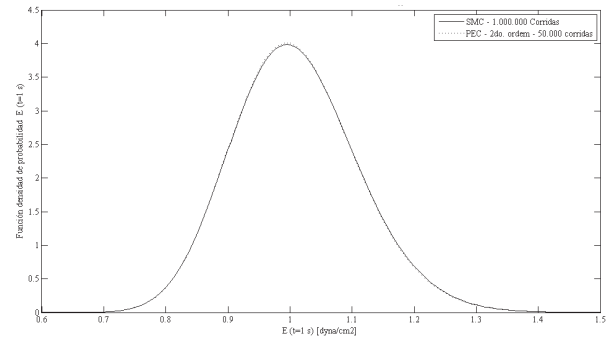


Figura 3 Comparación de la función de densidad de probabilidad de $E(t)$ utilizando SMC y PEC.

Fuente: Los Autores.

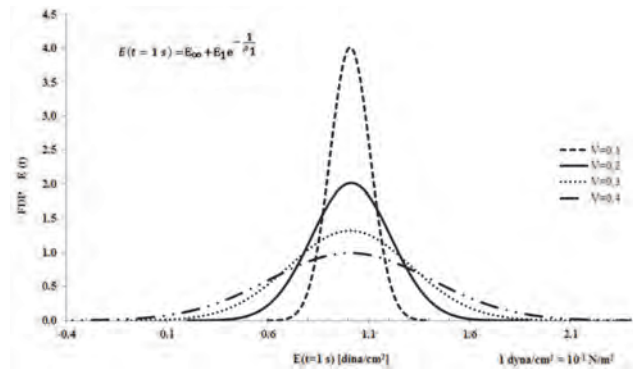


Figura 4 Función de densidad de probabilidad del módulo de relajación, $E(t)$ para $t = 1s$.

Fuente: Los Autores.

como un método robusto que permite determinar los coeficientes mediante una transformación de espacios probabilísticos de la variable original a variable normal estándar [16,17,28,31].

Esta investigación utilizó PEC de grado 2 para la determinación de la incertidumbre del módulo de relajación $E(t)$. Las distribuciones de salida fueron estimadas utilizando el estimador de máxima verosimilitud para establecer la mejor función de densidad de probabilidad que se ajusta a los datos obtenidos de la simulación del modelo. Los resultados indicaron que el PEC de dimensión tres y segundo grado es computacionalmente más eficiente que el Método de Monte Carlo crudo.

Las *fdp* de la salida del modelo para $t=1s$ es determinada utilizando los PEC de dimensión 3 y segundo grado y están dados en la Fig. 4 para todos los coeficientes de variación dados en la Tabla 2, los resultados obtenidos indican que el promedio de $E(t=1s)$ es de 1.01 dynas/cm^2 y su distribución de probabilidad es normal para todos los $V(s)$, mientras que las desviaciones estándar varían de acuerdo al V , es decir que para $V=0.40$ de las variables aleatorias de entrada, la dispersión en la salida encontrada fue de $V=0.3976$.

La *fdp* del modelo estocástico estacionario para $t=3E+4s$ mostrada en la Fig. 6 para todos los coeficientes de variación dados en la Tabla 2, indican que el promedio de $E(t=3.0E+04s)$ varía desde 0.054 hasta 0.021 dynas/cm^2 mientras que las distribuciones de probabilidad son lognormal para $V=0.1$ a 0.4 .

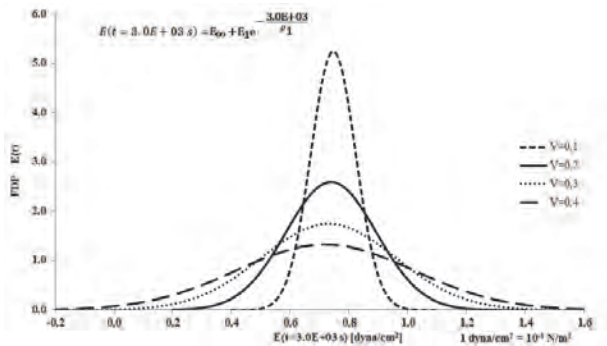


Figura 5 Función de densidad de probabilidad del módulo de relajación, $E(t)$ para $t = 3.0E+03$ s.
Fuente: Los Autores

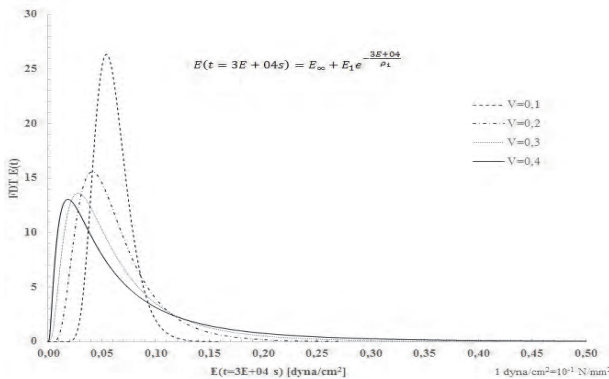


Figura 6 Función de densidad de probabilidad del módulo de relajación, $E(t)$ para $t = 3E+4$ s.
Fuente: Los Autores.

Por último la *fdp* del módulo de relajación para $E(t=1.0E+06$ s) sigue una distribución de probabilidad normal, encontrándose que el valor promedio para todos los V analizados es de 0.01 dyna/cm² y la desviación estándar desde 0.001 a 0.0038 para V igual 0.1 a 0.4 respectivamente. Las *fdp* del modelo de salida son dadas en la Fig. 7. El módulo de relajación $E(t)$ presenta una variación en el tiempo importante, no es constante y por el contrario puede tener alta variación especialmente cuando t está cerca de los $3.0E+04$ s generando con esto grandes variaciones entre los coeficientes de variación de las variables de entrada y la variable de salida $E(t)$.

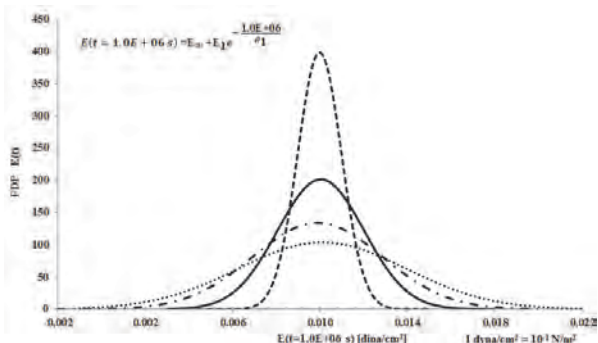


Figura 7 Función de densidad de probabilidad del módulo de relajación, $E(t)$ para $t = 1.0E+06$ s.
Fuente: Los Autores.

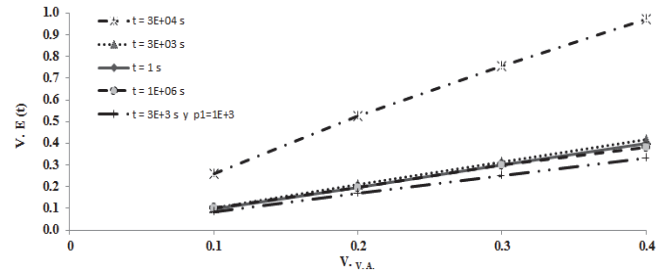


Figura 8 Relación entre la variación de las variables estocásticas de entrada y $E(t)$.
Fuente: Los Autores

Tabla 3.

Parámetros de las variables determinísticas de entrada del modelo.

Var(s). Determinísticas	Promedio, μ	Coef. de variación., V
w	50 KN/m	---
L	6.00 m	---
b	0.25 m	---
h	0.35 m	---

1 m = 10² cm

Fuente: Los Autores.

Existe una relación lineal entre los coeficientes de variación de las variables de entrada y el coeficiente de variación del módulo de relajación, para un tiempo t igual a 1 s, $3.0E+03$ s y $1.0E+06$ s; la variación en la variable aleatoria de salida es aproximadamente la misma a la observada en las variables aleatorias de entrada ($V = 0.1, 0.2, 0.3$ y 0.4), véase Fig. 8. Excepto para $t=3.0E+03$ s y fijando en el promedio $\rho_1 = 1.0E+04$ s, la relación entre los coeficientes de variación de las variables aleatorias de entrada y salida disminuye, tanto que para una $V = 0.4$ de las variables aleatorias de entrada se obtiene una variación igual a 0.33 para la variable estocástica de salida $E(t)$. Existe mayor variabilidad en el módulo de relajación $E(t)$ para el tiempo t igual a $3.0E+04$ s y está es 2.5 veces los coeficientes de variación de las variables aleatorias de entrada, dada la alta complejidad del modelo toda vez que el tiempo es exponente y define una zona de variación no lineal de $E(t)$.

3.2. Polinomios de expansión de caos en elementos viscoelásticos: Deflexión en el tiempo en viga biapoyada

El modelo de deflexión considera variables determinísticas para geometría, carga y sus valores se indican en la Tabla 3.

El módulo de relajación $E(t)$ incide en el cálculo de la deflexión, y puede pasar fácilmente del 1.06% de la deflexión estimada elástica en el centro de la luz de una viga biapoyada para un tiempo $t=1$ s y considerando la variable E_∞ de forma determinística (valor promedio Tabla 2), al 100 % de la deflexión estimada para el caso elástico con $t=1.0E+06$ s, e idénticas consideraciones para las variables de entrada $E_\infty \rightarrow \xi_1$, $E_1 \rightarrow \xi_2$ y $\rho_1 \rightarrow \xi_3$, los resultados se indican en la Fig. 9 y representa el desplazamiento normalizado respecto al centro del vano.

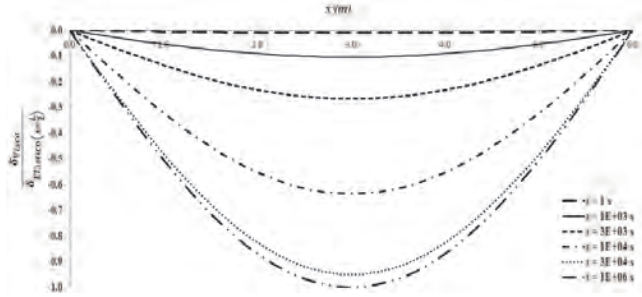


Figura 9 Desplazamiento normalizado respecto al centro del vano de una viga biapoyada para diferentes tiempos, t .
Fuente: Los Autores.

Ahora bien, teniendo en cuenta la incertidumbre en las variables de entrada E_∞ , E_1 y ρ_1 y considerando las demás variables determinísticas (ver Tablas 2 y 3) para el cálculo de la deflexión en el centro de una viga biapoyada y teniendo la función de fluencia expresado en la ec. (12) la deflexión en la viga biapoyada es determinada mediante la ec. (15).

$$\delta = \frac{5wl^4}{384I} \left\{ \frac{1}{E_\infty + E_1} \left[1 + \frac{E_1}{E_\infty} (1 - e^{-t/\rho_1}) \right] \right\} \quad (15)$$

Para llevar a cabo el presente trabajo de investigación se desarrolló un algoritmo en ambiente de programación MatLab versión R2013a que determina el polinomio Hermite y sus coeficientes para una variación V , así pues para $V=0.1$ la ec. (15) puede ser expresada en términos de variables aleatorias normales estándar, es decir en función de polinomios Hermite.

La deflexión normalizada en el centro de la luz de una viga biapoyada para cualquier coeficiente de variación sigue una distribución de probabilidad lognormal producto de la simulación del PEC. Para $t=1$ s el promedio en la deflexión normalizada es de 0.0105 y desviación estándar de 0.0010 con $V=0.1$ y puede aumentar hasta 0.0134 de promedio y 0.0055 de desviación estándar para $V=0.4$, véase Fig. 10, es decir, alcanza un incremento en el promedio de la deflexión normalizada del 21.55%, mientras que el percentil 50 no presenta cambio significativo producto de la simulación de PEC. La deflexión esperada que más se repite es del 1.06% de la deflexión máxima elástica en el centro de la luz (véase Fig. 9, 10), pero puede alcanzar hasta el 1.4% de la deflexión máxima elástica.

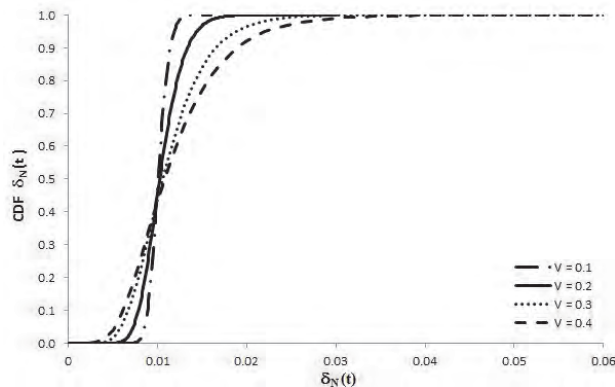


Figura 10 Función cumula densidad de probabilidad de la deflexión normalizada, δ_N para $t = 1$ s y $V=0.1$ a 0.4.
Fuente: Los Autores.

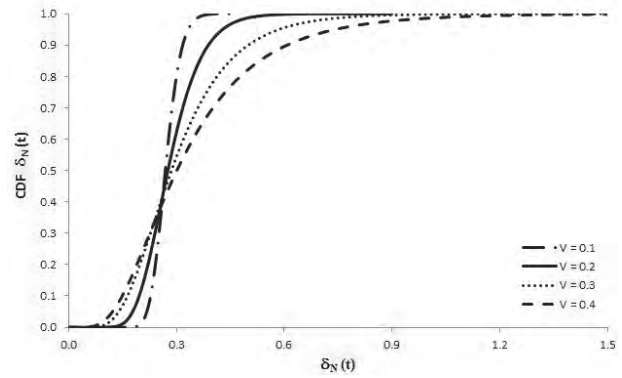


Figura 11 Función cumula densidad de probabilidad de la deflexión normalizada, δ_N para $t = 3.0E+03$ s y $V=0.1$ a 0.4.
Fuente: Los Autores.

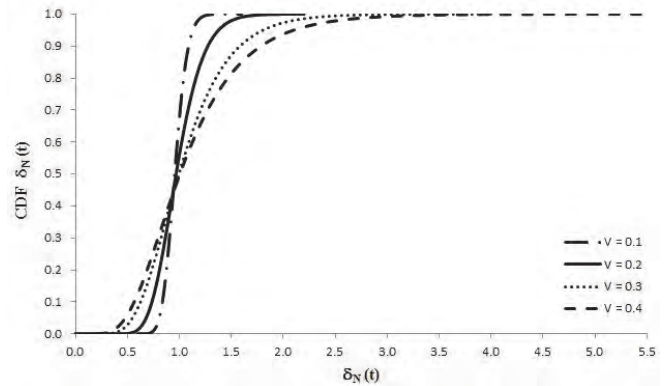


Figura 12 Función cumula densidad de probabilidad de la deflexión normalizada, δ_N para $t = 3.0E+04$ s y $V=0.1$ a 0.4.
Fuente: Los Autores.

El aumento en el tiempo t a $3.0E03$ s genera una disminución en el módulo de relajación produciendo un aumento en la deflexión estimada; por ejemplo el promedio de la deflexión normalizada aumenta de 0.2868 para $V=0.1$ a 0.3960 para $V=0.4$, es decir hay un incremento en la deflexión normalizada del 27.56%, véase Fig. 11. La moda de las deflexiones normalizadas δ_N varía 0.259 para $V=0.1$ a 0.200 para $V=0.4$, representando un decremento en la deflexión δ_N del 18.92%, es decir que a mayor variación en las variables de entrada el valor que más se repite disminuye hasta llegar a 18.92 % de la deflexión máxima elástica esperada, pero puede tener deflexiones aún mayores si V aumenta.

Para $t=3.0E+04$ s la función de fluencia $D(t) = \frac{1}{E_\infty + E_1} \left[1 + \frac{E_1}{E_\infty} (1 - e^{-t/\tau_1}) \right]$ aumenta, mudando rápidamente los promedios de la deflexión normalizada, véase Figs. 11, 12. El aumento en el promedio de las deflexiones estimadas desde $t=3.0E+03$ s a $3.0E+04$ s con $V=0.4$ de las variables aleatoria de entrada es del 68.51%, un aumento algo similar se presenta al estudiar la varianza de la deflexión normalizada (variable estocástica de salida, δ_N) para $t=3.0E+04$ s y $V=0.1$, es del 0.00124 mientras que para $V=0.4$ es de 0.0430 presentándose un incremento del 97.1 %.

La distribución de las deflexiones normalizadas para $t=1.0E+06$ s siguen una distribución de probabilidad lognormal para $V=0.1$ hasta 0.4 , con promedios de la deflexión que varían desde 1.057 hasta 1.336 respectivamente, con un incremento del 20.86% . El parámetro estadístico que sufrió mayor variación fue la varianza de $E(t)$, pues para $V=0.1$ fue de 0.0105 y para $V=0.4$ fue de 0.301 véase Fig. 13, es decir obtuvo un aumento en la dispersión de las deflexiones esperadas del 96.50% .

La variación V en las variables aleatorias de entrada (E_∞ , E_1 y ρ_1) para los tiempos $t=1, 3.0E+03, 3.0E+04, 1.0E+06$ s y fijando $t=3E+03$ y $\rho_1=1E+04$ produce diferentes variaciones en la deflexión normalizada respecto a la deflexión en el centro de una viga sometida a carga uniformemente distribuida (determinística). Esta variación en la salida puede llegar a ser grande como se indica en la Fig. 14, por ejemplo para $t=3.0E+03$ s y $V=0.4$ la variación de δ_N puede llegar a ser del 0.6 con distribución de probabilidad lognormal. La variación de la deflexión normalizada tiene un comportamiento no lineal y puede ajustarse a una distribución parabólica (de segundo orden) para todos los tiempos t .

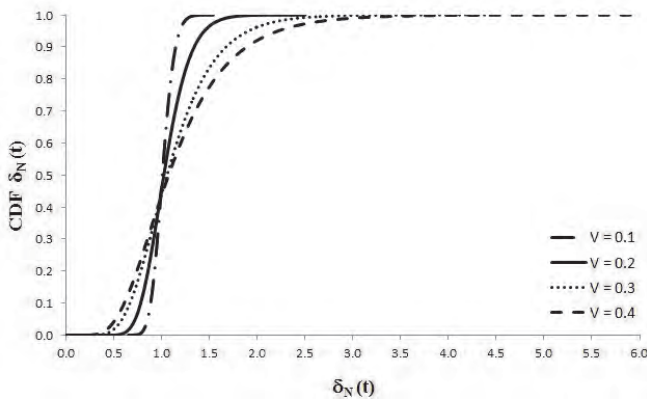


Figura 13 Función cumulativa de densidad de probabilidad de la deflexión normalizada, δ_N para $t = 1.0E+06$ s y $V=0.1$ a 0.4 .
Fuente: Los Autores.

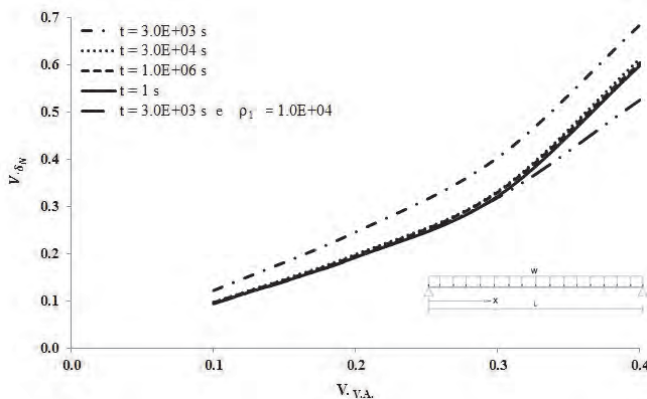


Figura 14 Relación entre la variación de las variables aleatorias de entrada (con $V=0.1, 0.2, 0.3$ y 0.4) y la variación de la respuesta δ_N , respecto al centro del vano para $t=1, 3.0E+03, 3.0E+04, 1.0E+06$ s y fijando $t=3.0E+03$ y $\rho_1=1.0E+04$.
Fuente: Los Autores.

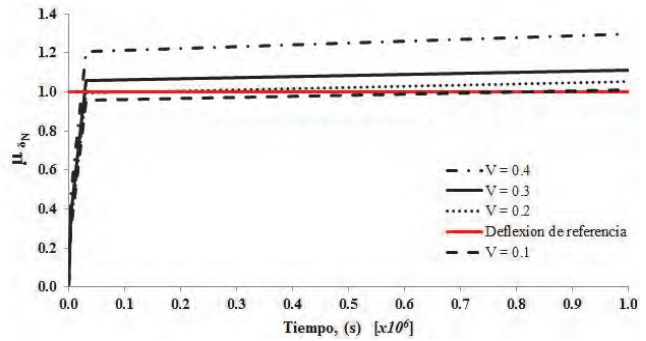


Figura 15 Comportamiento de la deflexión normalizada en el tiempo para diferente variación de las variables aleatorias de entrada ($V=0.1, 0.2, 0.3$ y 0.4) y la variación del promedio de δ_N , respecto al centro del vano para $t=1, 3.0E+03, 3.0E+04$ y $1.0E+06$ s.
Fuente: Los Autores.

Esta investigación estableció que para variaciones $V = 0.3$ y 0.4 en $t = 3.0E+04$ s la deflexión normalizada es mayor a la deflexión elástica esperada y para $t = 1.0E+06$ s la deflexión puede ir desde 1.01 hasta 1.30 veces la deflexión elástica esperada para $V = 0.1$ a 0.4 respectivamente, véase Fig. 15. Si consideramos todas las variables que intervienen en el proceso estacionario estocástico, definido por la ec. (15) con márgenes de variación similares a los anteriormente expuestos, estos valores de deflexión normalizada incrementan aún más.

4. Discusión

Se presenta alta variación en los valores de deflexión máximos probables, pues ellos pueden variar desde 3.5% hasta 350% de la deflexión máxima elástica para $t=1$ s hasta $1E+6$ s respectivamente; para los $t=3.0E+04$ s y $1.0E+06$ s los valores de deflexión máximos probables no aumentan, más si su probabilidad, contrario a lo observado para $t=1$ s y $t=3.0E+03$ s.

No existe una relación directamente proporcional entre la variación en las variables de entrada y la variación en la variable de salida (δ_N), es decir para coeficientes de variación mayor a 20% se esperan una dispersión en la variable estocástica de salida aun mayor llegando a ser hasta del 60% para $V=0.4$ con $t=3.0E+04$ s y $1.0E+06$ s véase Fig. 14, mientras que para otros tiempos la relación entre V de las variables aleatorias de entrada y las variable estocástica de salida es directamente proporcional y similar.

Es decir que para un tiempo t igual $3.0E+04$ s se tiene la mayor variabilidad en el módulo de relajación y esta a su vez genera una alta variación en la deflexión para cualquier $0 \leq x \leq L$. La variación en la deflexión puede representar un peligro para las construcciones civiles que no tengan un buen control de calidad en materiales, mano de obra y equipamiento, pues ello puede incrementar hasta en un 60% las deflexiones previstas por el diseñador, véase Fig. 14.

5. Conclusiones

Este artículo demostró la eficiencia y precisión de PEC acoplado con técnicas de superficie de respuesta para simular

variables estocásticas con pocas rodadas para determinar la respuesta estructural de las propiedades de los materiales a través de la modelación numérica/matemática visco elástico. Esta característica fue crucial para problemas visco elásticos, ya que la propagación de la incertidumbre de los parámetros ajustados de los datos de laboratorio se propaga a través de la interconversión de la representación matemática visco elástico ($E(t)$ a $D(t)$) y modelación numérica de las ecuaciones constitutivas las cuales consisten de convolución matemática sobre el tiempo. Aunque este trabajo se centró en solo el modelo sólido de tres parámetros para materiales visco elásticos mecánicos, se demostró que la variabilidad en los ajustes experimentales impacta en la interconversión del módulo de relajación ($E(t)$) después de la transformación de Laplace y causa la propagación relevante de la incerteza a través de la modelación.

Los resultados también mostraron que la variabilidad en el módulo de relajación, $E(t)$ no es único en el tiempo, pero depende del tiempo t_i en el cual el módulo de relajación es evaluado ($E(t = t_i)$). El coeficiente de variación para $E(t)$ incrementa para la parte de descenso intermedia de la curva $E(t)$ más que para el tiempo t_i inicial y final.

El máximo incremento en la varianza de la deflexión normalizada esperada para una viga biapoyada con carga uniformemente distribuida se presenta en $t=3.0E+03$ s, cuando todas las tres variables aleatorias (E_∞ , E_1 y ρ_1) son relevantes en la determinación de $E(t)$, más que en los últimos tiempos (es decir $t=1.0E+06$ s) cuando solamente E_∞ es relevante para la relajación visco elástico. La variación en el módulo de relajación $E(t)$ puede generar deflexiones importantes no previstas cuando se aplican cargas a temprana edad (pudiendo ser consideradas probabilísticas, utilizando integral de convolución), estas deflexiones pueden ser evaluadas si se consideran materiales visco elásticos y aún más si se consideran todas las variables aleatorias. Técnicas como Polinomios de expansión de caos disminuye el costo computacional con poca o ninguna pérdida de precisión y pueden ser aplicados en cualquier sistema mecánico.

Agradecimientos

Los autores agradecemos a la Facultad de Tecnología de la Universidad de Brasilia, Brasil; al Programa de Posgraduación en Estructuras y Construcción Civil por todo el apoyo recibido y la Coordinación de mejoramiento de personal de nivel superior-CAPEs.

Referencias

- [1] Adomian, G., Applied Stochastic Processes, New York, Academic Press, 1980.
- [2] Bendat J.S. and Piersol A.G., Random data analysis and measurement procedures, Wiley, 2nd Edition, New Jersey, USA, 2008.
- [3] Blatman, G., Adaptive sparse polynomial chaos expansions for uncertainty propagation and sensitivity analysis. Ph.D. Thesis, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, Aubière, France, 2009.
- [4] Blatman, G. and Sudret B., Sparse polynomial chaos expansions and adaptive stochastic finite elements using a regression approach Comptes Rendus Mécanique, 336(6), pp. 518-523, 2008. DOI: 10.1016/j.crme.2008.02.013
- [5] Blatman, G. and Sudret, B., An adaptive algorithm to build up sparse polynomial chaos expansions for stochastic finite element analysis.

- Probabilistic Engineering Mechanics, 25(2), pp. 183-197, 2010. DOI: 10.1016/j.proengmech.2009.10.003
- [6] Blatman, G. and Sudret, B., Adaptive sparse polynomial chaos expansion based on least angle regression, Journal Computational Physics, 230(6), pp. 2345-2367, 2011. DOI: 10.1016/j.jcp.2010.12.021
- [7] Choi, S-K., Grandhi, R.V. and Canfield R.A., Reliability-based structural design. London: Springer, 2007. DOI: 10.1007/978-1-84628-445-8
- [8] Christensen, R.M., Theory of viscoelasticity: An introduction, New York, Courier Corporation, 1982.
- [9] Devroye, L., Non-Uniform Random Variate Generation, New York, Springer-Verlag, 1986.
- [10] Doll, J.D. and Freeman D.L., Randomly exact methods. Science, 234(4782), pp. 1356-1360, 1986.
- [11] Faming, L., Liu, C. and Carroll, R.J., Advanced markov chain monte carlo methods, United Kingdom John Wiley & Sons Ltd., 2010.
- [12] Ferry, J.D., Viscoelastic properties of polymers, New York, Wiley, 1980.
- [13] Ghanem, R.G. and Spanos, P.D., Stochastic finite elements: A spectral approach, New York, Springer-Verlag, 1999.
- [14] Harr M.E., Reliability-based design in civil engineering, Dover Pubns, USA, 1997.
- [15] Huang, S.P., Liang, B. and Phoon, K.K., Geotechnical probabilistic analysis by collocation-based stochastic response surface method, Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, 3(2) pp. 75-86, 2009. DOI:10.1080/17499510802571844
- [16] Iman, R.L. and Conover, W.J., Small sample sensitivity analysis techniques for computer models, with an application to risk assessment. Communications in Statistics-Theory and Methods, 9(17), pp. 1749-1842, 1980.
- [17] Isukapalli, S.S. Roy, A. and Georgopoulou, P.G., Stochastic response surface methods (SRSMs) for uncertainty propagation: Application to environmental and biological systems, Risk Analysis, 18(3) pp. 351-363, 1998.
- [18] Isukapalli, S.S., Uncertainty analysis of transport-transformation models. Ph.D. Thesis, The State University of New Jersey, NJ, USA, 1999.
- [19] Kewlani, G., Crawford, J. and Iagnemma, K., A polynomial chaos approach to the analysis of vehicle dynamics under uncertainty., Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, 50(5) pp. 1-26, 2012. DOI:10.1080/00423114.2011.639897
- [20] Klir, G.J., The many faces of uncertainty, Elsevier Science, 1994.
- [21] Le Maître, O.P. and Knio O.M., Spectral methods for uncertainty quantification: With applications to computational fluid dynamics, Springer, London, UK, 2010.
- [22] Melchers, R.E., Structural reliability analysis and prediction, London, John Wiley and Sons, 1999.
- [23] Neto, A.A.B., and Rosa, E., Parametric uncertainty analysis considering metrological aspects in the structural simulation in viscoelastic materials, LAJSS (Latin American Journal of Solids and Structures), 5(2008), pp. 75-95, 2008.
- [24] Papoulis, A., Probability, random variables, and stochastic processes, New York, McGraw-Hill, 1991.
- [25] Park, S.W. and Schapery R.A., Methods of interconversion between linear viscoelastic material functions. Part I – A numerical method based on Prony series, International Journal of Solids and Structures, 36(11), pp. 1653-1675, 1998. DOI: 10.1016/S0020-7683(98)00055-9
- [26] Park, S.W. and Kim, Y.R., Interconversion between relaxation modulus and creep compliance for viscoelastic solids, Journal of Materials in Civil Engineering 11(1) pp. 76-82, 1999. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(1999)11:1(76), 76-82
- [27] Phoon, K.K. and Huang, S.P., Uncertainty quantification using multi-dimensional hermite polynomials, ASCE, pp. 1-10, 2007. DOI: 10.1061/40914(233)12
- [28] Schapery, R.A., On the characterization of nonlinear viscoelastic materials, Polymer Engineering and Science, 9(4), pp. 295-310, 1969.
- [29] Srinivasan, R., Importance Sampling, New York, Springer-Verlag, 2002.
- [30] Sudret, B. and Der Kiureghian, A., Stochastic finite elements and reliability: A state of the art report. Report UCB/SEMM-2000/08, University of California, Berkeley, USA, 2008.
- [31] Sudret, B., Uncertainty propagation and sensitivity analysis in mechanical models contributions to structural reliability and stochastic spectral methods., Ph.D. Thesis, Université Blaise Pascal – Clermont II, Aubière, France, 2007.

- [32] Tatang, M.A., Direct incorporation of uncertainty in chemical and environmental engineering systems, PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, MA, USA, 1995.
- [33] Tatang, M.A., Pan, W.W., Prinn, R.G. and McRae, G.J., An efficient methods for parametric uncertainty analysis of numerical geophysical model, *Journal Geophysical Research Atmosphere* 102(D18) pp. 21925-21932, 1997. DOI: 10.1029/97JD01654
- [34] Wilhelm, F., *Viscoelasticity*, Second Ed. Revised, Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 1975.
- [35] Xiu, D., Fast numerical methods for stochastic computations: A review, *Communications in Computational. Physics*, 5(2-4), pp. 242-272, 2009.
- [36] Xiu, D., *Numerical methods for stochastic computations*, New Jersey, Princeton University Press, USA, 2010.
- [37] Xiu, D. and Hesthaven, J., High-order collocation methods for differential equations with random inputs, *SIAM, Journal on Scientific Computing*, 27(3), pp. 1118-1139, 2005. DOI:10.1137/040615201

F. Evangelista Jr. received the BSc. Eng. in Civil Engineering in 2003, the MSc degree in Civil Engineering with emphasis in Transportation Infrastructure in 2006, both at the Universidade Federal do Ceará, Brazil. In 2011, he received his PhD degree in Civil Engineering at the University of Illinois at Urbana Champaign, USA. Since 2013, he has been professor at the Graduate Program of Structures and Civil Construction of the Universidade de Brasília.
ORCID: 0000-0002-9353-1083

N. Afanador G. received the BSc. Eng. in Civil Engineering and graduate in mathematics and Physics in 1990, the MSc degree Civil Engineering with emphasis in structures at the Universidad of the Andes Colombia in 2008 and actually, he is studying the PhD degree in Structures at the University of Brasilia. Since 2003 to actually, he work for Francisco of Paula Santander University Ocaña in the department of civil engineering.
ORCID: 0000-0001-5463-2036



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería Civil

Oferta de Posgrados

Especialización en Vías y Transportes
Especialización en Estructuras
Maestría en Ingeniería - Infraestructura y Sistemas
de Transporte
Maestría en Ingeniería – Geotecnia
Doctorado en Ingeniería - Ingeniería Civil

Mayor información:

E-mail: asisacic_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 5172

Construction, development and tests of a low cost, high efficiency stove-boiler for low calorific power biomasses

Reinaldo Delgado-García, Luis Velasco-Roldán, Eduardo Onofa-Cuichán & Estefanía Armas-Figueroa

Departamento de Ciencias de Energía y Mecánica, Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Ecuador. rrdelgado1@espe.edu.ec

Received: November 05th, 2015. Received in revised form: Mayo 20th, 2016. Accepted: July 21th, 2016.

Abstract

According to World Health Organization [1], 3000000 million people cook and heat their houses with open fires and stoves that burn biomass and charcoal, most of them placed in cool climates with very limited vegetal biodiversity and consequently meager energy resources. For this reason, the target of this research has been to give answer to water heating and thermal comfort needs of living places in cool climates, having in account the local limited industrial and technological development. This vertical heater consists of three chambers: a combustion chamber, a heat exchanger and a natural convection biomass drying chamber. Tests show that the overall efficiency of the boiler/stove is around 80%, with values of efficiency in cooking 30% higher than other improved stoves prototypes, reducing the boiling time 68% and saving 34% of fuel. It obtains 150 liters of warm water at temperature over 40 °C by means of heat recovery.

Keywords: stove; boiler; kitchen; energy saving; heat transfer; biomass.

Desarrollo, construcción y pruebas de una cocina-calentador de bajo costo y alta eficiencia energética para biomasa de reducido poder calorífico

Resumen

Según la Organización Mundial de la Salud [1], 3.000.000 millones de personas cocinan y calientan sus hogares con fuegos abiertos y cocinas en los que queman biomasa y carbón vegetal, situándose una buena parte de ellas en climas fríos con muy limitada biodiversidad vegetal y por lo tanto escasos recursos energéticos. Por ello el objetivo de la presente investigación ha sido dar respuesta a la necesidad de calentamiento de agua y el acondicionamiento térmico de viviendas situadas en climas fríos, teniendo en cuenta el limitado desarrollo industrial y tecnológico local. Este calentador vertical se compone de tres cámaras: una cámara de combustión, un intercambiador de calor y una cámara de secado de la biomasa por convección natural. Las pruebas realizadas demuestran que la eficiencia global de la caldera/cocina se sitúa en torno al 80%, presentando valores de eficiencia en la cocción de un 30% mayores a otros prototipos de cocinas mejoradas, disminuyendo el tiempo de ebullición un 68% y ahorrando un 34% de combustible y obteniendo 150 litros de agua caliente a una temperatura superior a 40°C procedente de la recuperación de calor.

Palabras clave: cocina; calentador; ahorro de energía; transferencia de calor; biomasa.

1. Introducción

El presente trabajo se enmarca dentro de la línea de investigación del Grupo de Energías Renovables del Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de las

Fuerzas Armadas, enfocada a la caracterización de variables de sostenibilidad para la planificación y desarrollo de soluciones técnicas y constructivas sostenibles, conscientes de la realidad climática, tecnológica, industrial y social en la que se implantan.

How to cite: Delgado-García, R., Velasco-Roldán, L., Onofa-Cuichán, E. & Armas-Figueroa, E. Desarrollo, construcción y pruebas de una cocina-calentador de bajo costo y alta eficiencia energética para biomasa de reducido poder calorífico DYNA 83 (199) pp. 183-190, 2

El estudio del estado del arte nos muestra que la mayor parte de las investigaciones relacionadas con calderas domésticas se refieren a productos industrializados para la producción en masa. Estas calientan aire o agua. Las investigaciones se centran en la obtención de altas eficiencias en el funcionamiento del quemador para la reducción del consumo de los llamados pellets: pequeñas porciones de biomasa prensada procedente del reciclado de residuos vegetales [2]. En el tema de las cocinas eficientes las investigaciones se centran en la reducción del consumo de leña, la limitación del costo y la reducción de los contaminantes vertidos al interior de la vivienda o a la atmósfera. No se han encontrado investigaciones científicas remarcables en el estudio referido a sistemas polivalentes (cocción, calentamiento de agua y calefacción) con un bajo costo de construcción.

Las calderas que utilizan pellets para la combustión surgen en 1989 como una alternativa a las chimeneas de tiro abierto, buscando desarrollar un tipo de estufa que pueda utilizar residuos de biomasa y reducir las emisiones de CO₂ en relación a estufas que utilizan combustible fósil. Gracias al apoyo de un ventilador, estos aparatos aseguran una buena mezcla de gases, aire y llama y producen una combustión completa que reduce al mínimo los gases de combustión y las cenizas. La cantidad de calor emitido es controlado mediante la cantidad de biomasa quemada. La eficiencia de dichas estufas se sitúa entre el 56 y el 68% [3,4].

Dentro del ámbito de las cocinas económicas existen múltiples estudios realizados con el objetivo de mejorar la eficiencia de las tradicionales cocinas de fogones abiertos, con eficiencia próxima al 10%, (Aristazabal Hernandez, 2014) con el objetivo de reducir el consumo de leña en países en vías de desarrollo [5].

Entre los modelos desarrollados se encuentran la estufa Hyderabad Chula Deen, creada en la década de los 50, la estufa Patsari, desarrollada en los años 90 [6] en torno a la cual existen pruebas de cocción controlada [7]. De las investigaciones se deduce que la estufa Patsar presenta claras ventajas con respecto a las cocinas tradicionales, con una reducción del consumo de energía de entre un 19 y un 67% y un ahorro de combustible del 44%. [3]

Otro tipo de cocina mejorada es la denominada “tipo plancha”, que consigue, con la modificación de la cámara de combustión, que la eficiencia térmica global aumente un 12% con respecto a la estufa de fuego abierto o la estufa Lorena [6]. Esta plantea un concepto interesante de eficiencia energética basado en la acumulación de energía en la masa de tierra y arena que envuelve la cámara de combustión, fomentando la transferencia de energía por convección y radiación a la envolvente de los fogones. Esta energía es paulatinamente liberada al espacio interior. Este concepto de acumulación de energía se considera de capital importancia para la investigación al plantearse la estrategia de aprovechamiento máximo de la energía desprendida en la cámara de cocción como factor clave para el incremento de la eficiencia de la estufa. Esta energía será destinada al calentamiento de agua y al acondicionamiento térmico del espacio interior en el que se ubique la estufa.

En el ámbito de la reducción de elementos contaminantes, existe una gran carencia de estudios pormenorizados

referidos a la problemática en los países en vías de desarrollo. Las normativas estadounidenses y europeas se centran en el control de la calidad del aire basado en los niveles de CO₂ y posible presencia de olores mediante un control estricto de los rangos de ventilación que permitan la mayor eficiencia energética [8]. En la mayor parte del mundo el problema de los fuegos abiertos al interior de la vivienda supone un gravísimo riesgo para la salud de las personas. En este campo se han realizado pruebas técnicas estandarizadas para el seguimiento de estufas mejoradas en la India y México. Se evaluaron los cambios en la calidad del aire interior y el consumo de combustible y se obtuvo una reducción de los niveles de monóxido de carbono entre 30-70 %, mientras las concentraciones de partículas disminuyeron entre 25 % y 65 %, y el consumo de combustible se redujo entre 20 % y 67 % [9]. En estudios realizados en el área subsahariana se analizaron estufas que fueron mejoradas mediante el confinamiento y control de la combustión en quemadores de chapa de acero. En este caso el consumo de leña se redujo entre un 22% y 46% con relación a estufas tradicionales construida con piedras [10].

En los últimos años están evolucionando las estufas denominadas “cohetes” (Rocket) [11], de tiro forzado. Gracias a la quema completa de la biomasa se reducen las emisiones de monóxido de carbono (CO) en 75%, óxido de nitrógeno (N₂O) hasta un 90%, consumo de combustible en un 33% y las emisiones de partículas en suspensión en un 46%, todo ello en comparación con las estufas de combustión abierta.

Una variante de este tipo de caldera, aún no estudiada de forma científica, la denominada *Rocket Mass*, incorpora una variante de gran interés para la investigación: la recuperación de energía procedente de los gases de combustión, que se produce al envolver el conducto de extracción en tierra o ladrillos. El punto débil de esta propuesta es la excesiva pérdida de carga en un circuito de extracción con escaso diferencial de altura entre la entrada de aire a la cámara de combustión y el punto de extracción al exterior. Por este motivo se dotan siempre de detectores de CO₂ y/o ventilación forzada.

El estudio del estado del arte demuestra que, así como existen múltiples investigaciones centradas en el incremento de la eficiencia energética de la combustión mediante el diseño del quemador, no existen investigaciones centradas en la gran cantidad de energía no aprovechada que es evacuada a través del conducto de gases.

Con dicho objetivo, por lo tanto, se diseña un calentador de baja temperatura y presión, que permita la combustión eficiente de biomasa con reducido poder calórico y la máxima recuperación del calor producido en la cámara de combustión y el circuito de extracción de humos.

El fluido acumulador de energía a usar será agua de circulación natural. Este diseño permitirá la acumulación de la energía y proporcionará agua caliente sanitaria y el acondicionamiento térmico de la vivienda, independientemente del momento del día en el que se produzca la cocción. De esta forma se consigue desvincular temporalmente la generación de energía y el consumo de esta. Estas necesidades están determinadas por condicionantes independientes: el uno la alimentación y el otro las pautas higiénicas, los condicionantes climáticos y el patrón de uso de la propia vivienda.

2. Descripción del proyecto

Para lograr el objetivo propuesto el proyecto deberá garantizar obtener las mayores temperaturas en la cámara de combustión y las menores temperaturas de evacuación de gases con un mínimo consumo de biomasa. La estufa proyectada cuenta con 3 partes principales. La cámara de combustión, la cámara de cocción y la cámara de secado

2.1. Cámara de combustión

Se diseña una cámara de combustión de lecho fluidizado circulante [3], la cual se muestra en la Fig. 3, muy adecuado para combustibles con reducido poder calorífico. Esta cámara puede garantizar una eficiencia de combustión de biomasa de 90%, con biomasa de hasta un 60% de humedad, alcanzando temperaturas que oscilan entre los 800°C y 900°C y evitando así la producción de escoria por ceniza. Sobre la misma se ubica la cámara de cocción, como se muestra en la Fig. 2.

En la caldera el suministro de aire primario es generado por efecto chimenea y circula desde la cámara de combustión hasta la parte superior del calentador. Una abertura deslizante permite graduar el “tiro” y con ello la combustión mediante la entrada de aire. La combustión inducida se ha optimizado con un 20% de oxígeno por encima del estrictamente necesario, para de esta forma asegurar una combustión completa sin presencia de partículas no quemadas que puedan generar hollín.

Una portezuela permite la carga de la cámara de combustión con la biomasa.

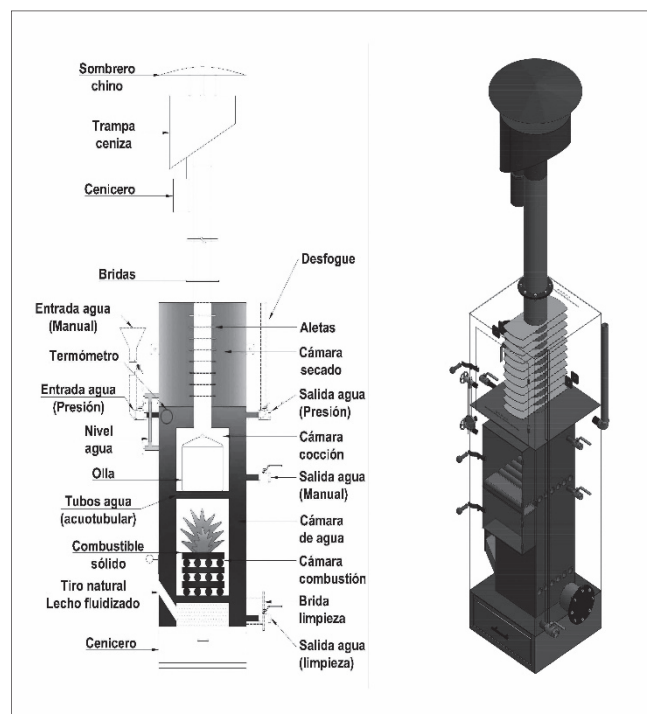


Figura 1
Principios básicos de funcionamiento del calentador
Fuente: autores

Dado que el objetivo es obtener una caldera económica y sin mantenimiento se pretende evitar la necesidad de cualquier tipo de ventilador o bomba. No obstante, la caldera permite la conexión de un circuito de recirculación que disipa el calor en sitios alejados del lugar en el que se sitúa la misma. Para fomentar el movimiento interior del agua por convección natural (termosifón), en la cámara de almacenamiento de agua se diseñó y construyó un calentador eminentemente vertical. El esquema general se muestra en la Fig. 1.

Al ser un calentador de tubos de agua (acuotubular) el fuego incide directamente sobre los conductos de agua, siendo esta el área principal de transferencia de energía y el punto en donde se alcanzan las mayores temperaturas. Con ello se induce el desplazamiento del agua caliente hacia la parte superior de la cámara de almacenamiento de energía.

Teniendo en cuenta que la flama óptima emite un 80% de la energía por radiación, un 10% por convección y un 10% por conducción, el calentador está diseñado para aprovechar la mayor cantidad de calor emitido por la combustión de biomasa. La cámara de combustión pretende transferir de forma eficiente el calor generado a la cámara de agua que la envuelve, por medio del aumento del área de transferencia y recuperando de esta forma la energía de las llamas y los gases. En el diseño final, la cámara de combustión cuenta con una superficie de intercambio de 0,158 m² por conducción, 0,194 m² por convección y 0,518 m² por radiación.

Para realizar el diseño térmico, en primer lugar se calcula la cantidad de calor requerida para calentar los 150 litros de agua, de 10°C a 40°C, por medio de un balance de masa, así como la cantidad de biomasa necesaria para la obtención de dicha cantidad de calor. Se calcula posteriormente la relación aire-combustible ideal para una reacción estequiométrica real, asumiendo que existe una combustión completa, y la masa de aire necesaria para la combustión, utilizando dicha relación aire combustible.

Por otro lado se calcula el porcentaje de gases de combustión en los productos de la reacción estequiométrica real, para determinar qué cantidad de gases genera la combustión y poder dimensionar la cámara de convección y la chimenea. Así mismo se determina el volumen total que ocupan la biomasa y el aire necesarios en el proceso de combustión. De esta forma se obtienen las dimensiones de la cámara de combustión.

2.2. Cámara de cocción

La cámara de cocción se muestra en la Fig. 2. La misma alberga los recipientes con los alimentos para cocinar. Está limitada por los conductos de agua que separan la misma de la cámara de combustión en su parte inferior y limita con la cámara de secado de biomasa en su parte superior. Las 4 caras laterales limitan con la cámara de agua en las que se produce el primero de los sucesivos procesos de recuperación de calor. El volumen de la cámara de convección se determina mediante el volumen de los gases de combustión producidos.



Figura 2 Cámara de cocción
Fuente: Autores



Figura 3 Cámara de combustión

2.3. Cámara de almacenamiento de agua

Las cámaras de cocción y secado se envuelven por una cámara de agua de una capacidad de 150 litros.

Una serie de conductos tubulares de acero con diámetro de una pulgada están conectados a la cámara de almacenamiento de agua y dividen la cámara de cocción y la cámara de combustión. Estos tubos permiten sostener los recipientes para la cocción sobre las llamas. A la vez son los principales inductores de la circulación de agua por convección en el interior de la cámara al recibir directamente sobre ellos las llamas, calentándose rápidamente y calentando a su vez el agua que contienen con lo que se garantiza el flujo convectivo del agua hacia la cámara de almacenamiento.

Conociendo la temperatura del agua caliente obtenida como resultado de la transferencia de calor, se calcula el volumen de la misma, para saber qué cantidad de agua fría (10°C) debe mezclarse con la caliente (80°C), determinando la relación de flujos máscicos de agua caliente y fría, para una temperatura especificada del flujo resultante (agua 40°C).

2.4. Cámara de secado de biomasa

La Fig. 4 muestra la estructura de la cámara de secado. Uno de los principales factores que determinan la capacidad calorífica de una biomasa es su contenido de humedad. En el caso de quemarse madera húmeda, es necesaria cierta cantidad de calor para evaporar el agua contenida en ella, con lo que se ve afectada la combustión. En lugares con climas lluviosos se dificulta el acceso a biomasa seca, por lo que los procesos de combustión son generalmente poco eficientes.

Existen varios factores necesarios para un secado óptimo de la biomasa. En primer lugar, la cantidad de calor y la temperatura son fundamentales para evaporar el contenido de agua en la madera o en cualquier otra biomasa utilizada. Por otra parte, la humedad relativa del aire circulante debe ser baja para poder absorber la humedad contenida en la madera y por último, es necesario un movimiento del aire,

(turbulento) encargado de desplazar tanto el calor como la humedad extraída de la madera. El manejo adecuado de estos tres factores es indispensable para el éxito en el secado de la madera.

Se ha diseñado por ello un segundo proceso de recuperación de calor a través del conducto de extracción de humos, forzando a que éste caliente una cámara de secado de biomasa. El conducto de extracción dispone de unas aletas de acero dimensionadas para obtener la mayor transferencia de calor posible. La cámara de secado presenta unas perforaciones en la cara frontal que facilitan la circulación del aire entre esta y el interior de la vivienda. Este flujo de aire permite la disipación del vapor de agua y la transmisión de calor a la vivienda.

Para la determinación de la longitud efectiva de las aletas anulares de sección transversal uniforme se parte de suponer la aleta infinitamente larga para determinar la distribución de temperatura a lo largo de la misma. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 1.

Se observa que la temperatura de la aleta disminuye muy poco para posiciones más allá de los 10 cm. Buscando la mayor rentabilidad económica del diseño térmico se determinó utilizar 8 aletas de dicha dimensión en el interior de la cámara de secado. Esta disposición aumenta la transferencia de calor entre la chimenea y el fluido que lo rodea en un 72%, de acuerdo con el procedimiento de cálculo descrito por Incropera y Dewitt [11].

2.5. Otros elementos

El diámetro de la chimenea se diseñó para mantener una velocidad de salida del fluido entre 3 y 5 m/s, para la correcta evacuación de los gases. Este valor depende de la diferencia de temperatura entre el aire exterior y la cámara de combustión, por lo que se consideró el promedio de temperatura entre 10 y 20°C para el aire exterior. Se colocó una válvula de guillotina de para regular la entrada de aire necesaria y mantener una correcta combustión. Para determinar la altura de la chimenea se consideró el análisis de flujo de fluidos a régimen estacionario teniendo en cuenta que la caldera opera a la presión atmosférica y con tiro natural.

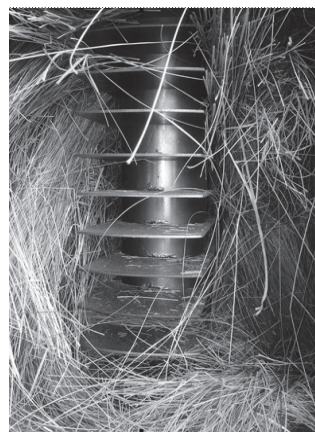


Figura 4. Cámara de secado
Fuente: Autores



Figura 5. Prototipo de estufa
Fuente: Autores

Tabla 1
Distribución de temperatura en la aleta

Longitud aleta (m)	Temperatura aleta (°C)
1.95313E-05	189.81
0.90625E-05	189.63
0.000078125	189.25
0.00015625	188.51
0.0003125	187.03
0.000625	184.12
0.00125	178.42
0.0025	167.59
0.005	147.97
0.01	115.76
0.02	72.14
0.03	46.51
0.04	31.45
0.05	22.60
0.06	17.41
0.07	14.35
0.08	12.56
0.09	11.50
0.10	10.88
0.11	10.52
0.12	10.30

Fuente: autores

Debido al uso doméstico de este calentador por personas sin conocimientos técnicos se instaló una tubería de desfogue que evita alcanzar temperaturas y presiones excesivas que pudieran poner en peligro a los usuarios.

Se dispone de varias entradas y salidas de agua en la parte inferior y superior de la cámara de almacenamiento. Estas tienen por objeto el relleno de la cámara. Además garantizan la posibilidad de una recirculación bombeada del agua hacia radiadores de baja temperatura, de ser conveniente. De esta forma la calefacción de la vivienda no solo puede producirse por la radiación de las chapas perimetrales o la recirculación de aire de la cámara de secado, sino que será posible potenciar la disipación de dicha energía en zonas alejadas de la vivienda. La estructura externa de la cocina calentador se muestra en la Fig. 5.

2.6. Costo

La caldera se construye en una metalmecánica (herrería) dotada de las herramientas básicas de corte y soldado. El costo de mano de obra y materiales ha sido de \$ 907,00 USD. Este costo es evidentemente muy superior al costo de fogones tradicionales o incluso al de los fogones mejorados, ya que estos se hacen normalmente con materiales reciclados o recursos locales. A pesar de ello los resultados obtenidos, así como la posibilidad de un importante incremento en el confort térmico de la familia justifica su mayor costo.

3. Resultados

3.1. Eficiencia energética en el calentamiento de agua

En el gráfico de la Fig. 6 puede observarse el tiempo requerido para el calentamiento del agua mediante el uso de las distintas biomásas.

En cuanto al consumo de biomasa se observa un menor

consumo relativo de esta en el caso de utilizar leña. Se requirieron 2,09 kg de leña con un 4% de humedad relativa, frente a 2,4 kg de pajonal con una humedad relativa del 8%, para el calentamiento de 150 litros de agua entre 18 y 40°C y una temperatura ambiente de 20°C. Pese a dicha diferencia es necesario tener en cuenta que el pajonal es un recurso natural abundante en el páramo andino. El comportamiento de diferentes biomásas se muestra en la Fig. 7.

Para calentar los 150 litros de agua contenidos en la caldera, se necesitan 2.09 kg (4.6 libras) de madera seca (4% humedad). Sin embargo, para calentar la misma cantidad de agua con madera húmeda (25% humedad), se requieren 2.31 kg. (5.09 libras). En la Fig. 7 queda de manifiesto esta situación.

La madera seca alcanza su máxima temperatura en la flama adiabática a los 8 minutos de iniciarse la combustión, a diferencia de la madera húmeda que alcanza su pico máximo en el minuto 12. Esto se debe a que en la madera húmeda primero se evapora la cantidad de agua contenida en la biomasa y luego se combustiona. Este efecto también se aprecia en la cantidad de biomasa necesaria para calentar una cantidad dada de agua al presentar la biomasa diferentes contenidos de humedad.

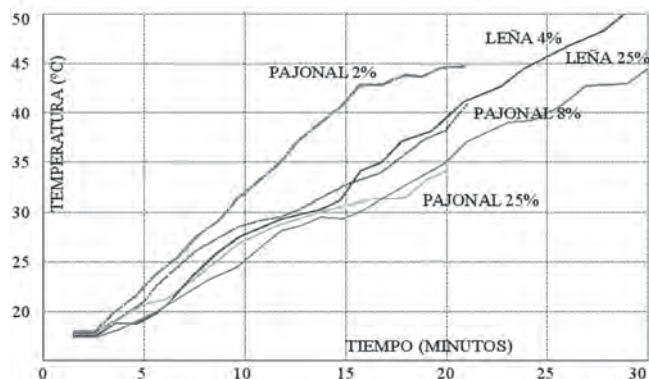


Figura 6. Gráfica del calentamiento de 150 litros de agua con distintas biomásas para distintas humedades relativas de esta

Fuente: autores

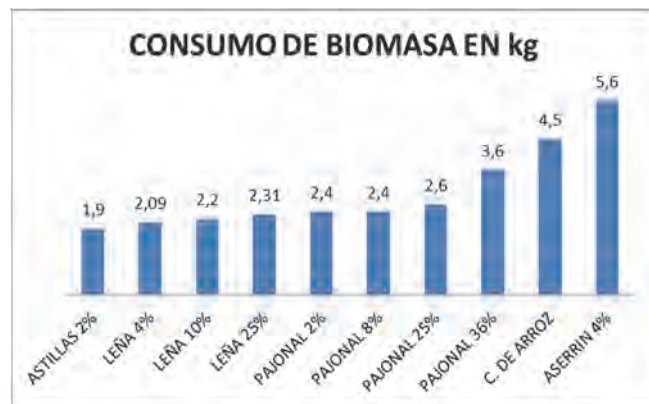


Figura 7. Masa de biomasa requerida (y humedad relativa de esta) para el calentamiento de 150 litros de agua entre 18 y 40°C

Fuente: autores

3.2. Eficiencia energética del sistema de cocción. Prueba de Ebullición de Agua.

La Prueba de Ebullición de Agua (Water Boiling Test, WBT por sus siglas en inglés) es una simulación simple del proceso de cocción con la finalidad de medir cuan eficiente es una estufa para calentar el agua en una olla. EL protocolo determina la cantidad de emisiones producidas durante el proceso, evalúa la eficiencia térmica, el tiempo de ebullición, la tasa de incineración y el consumo específico de combustible (CEC) de la estufa. [7]

La WBT simula, por lo tanto, el proceso de cocción y está conformada por tres ensayos: WBT (frío), en el cual la estufa se enciende al iniciar el día; WBT (caliente), en la que la estufa se encuentra precalentada, y WBT (a fuego lento), en el cual se trata de simular un proceso de cocción tradicional. Los parámetros evaluados por la WBT son el consumo específico de combustible (SCWBT, kg biomasa / litro de agua), que se muestra en la Tabla 2, y la eficiencia térmica (h, %), mostrada en la Tabla 3. La eficiencia térmica es una relación entre la tarea de ebullición y evaporación del agua frente a la energía suministrada por la combustión de la biomasa. [12]

Los resultados de la prueba de ebullición de la caldera/cocina han sido comparados con los resultados del prototipo de cocina mejorada de Javier D. Aristazabal, la Estufa FN, cuyo interesante trabajo ya mejoraba el rendimiento de las estufas tradicionales colombianas [12].

El prototipo de estufa cocina reduce el tiempo de entre un 26 y un 40%

Puede observarse en los gráficos de las Figs. 8 y 9 el importante incremento en la eficiencia energética de la cocción, así como una reducción de tiempo y consumo de biomasa para alcanzar la ebullición del agua

Tabla 2

Resultados de consumo obtenidos en la Prueba de ebullición de agua (WBT).

FASE	TASA DE INCINERACION (g/min)		CONSUMO (g/l)	
	Prototipo caldera	Estufa FN	Prototipo caldera	Estufa FN
FRÍO	185	49	120	199
CALIENTE	220	63	110	149
MODERADO	118	37	265	360

Fuente: autores

Tabla 3

Resultados de eficiencia obtenidos en la Prueba de ebullición del agua (WBT)

FASE	EFICIENCIA (%)		T. EBULLICIÓN (min)	
	Prototipo caldera	Estufa FN	Prototipo caldera	Estufa FN
FRÍO	20	16	13	42
CALIENTE	23	15	10	32
MODERADO	26	8		

Fuente: autores

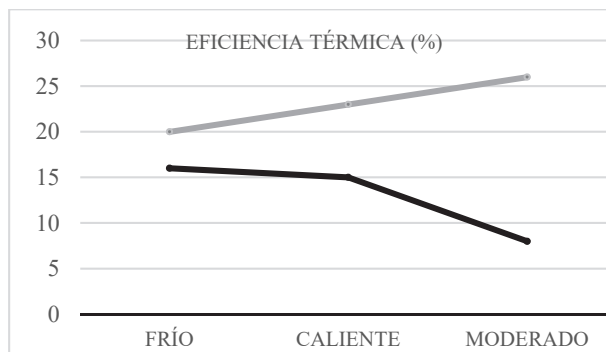


Figura 8. Eficiencia térmica (WBT)

Fuente: autores

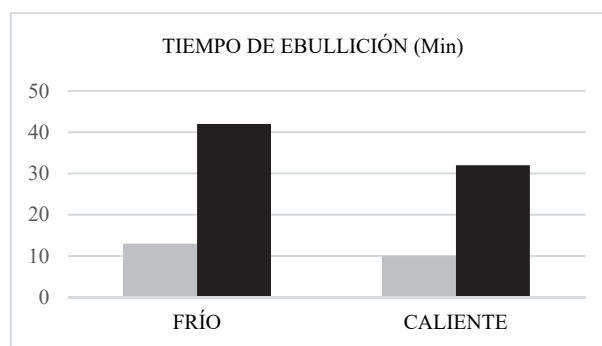


Figura 9. Tiempo de ebullición (WBT)

Fuente: autores

3.3. Prueba de Cocinado Controlado

La Prueba de Cocinado Controlado (Controlled Cooking Test, CCT por sus siglas en inglés) está diseñada para evaluar el desempeño de la estufa mejorada con respecto a las estufas comunes o tradicionales. Las estufas se comparan a medida que realizan una tarea estandarizada de cocción semejante a las condiciones de cocción típicas de la población local. Esta prueba ofrece una amplia gama de indicadores de desempeño energético, tales como el consumo específico de combustible (SCCCT, gramos de biomasa/kg alimento), la energía específica (ECCT, kJ/kg alimento) y el tiempo utilizado en la tarea de cocción (Δt , min). El SCCCT representa la cantidad de combustible requerido por la estufa para producir una unidad de masa de alimentos cocidos [12]

En la Tabla 4 se compara el consumo específico de combustible entre la Caldera cocina y el fogón tradicional. Puede observarse que se obtienen reducciones del consumo de leña del 34%. La caldera ha sido probada en los laboratorios de Energía Mecánica de la Universidad de Fuerzas Armadas en Salgolquí (Ecuador) a 2539 m.s.n.m. y

Tabla 4

Consumo específico de combustible en la Prueba de Cocción Controlada (CCT)

CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTIBLE (SCF)			
Prototipo caldera		Fuego abierto	
Alimentos (Kg)	2.9	Masa alimentos (Kg)	2.9
Leña (g)	2500	Masa leña (g)	3800
SCF	862	SCF	1310

Fuente: autores

con una presión atmosférica de 560 mm Hg. (0.74 atm) Pese a que la Prueba de Ebullición de Agua (WBT) y la Prueba de Cocinado Controlado (CCT) no hacen referencia a la presión atmosférica a la que deben efectuarse, dicha condición afecta evidentemente a la temperatura de ebullición del agua. A la presión atmosférica de Sangolquí el agua hierve en torno a los 92°C y no a los 100°C habituales a nivel del mar. Es por ello que los valores de los resultados comparados de las pruebas deben tener en cuenta dicha circunstancia. La diferencia de entalpías de saturación, para las presiones atmosféricas comparadas es de 34 kJ/kg de agua. Por ello para cualquier biomasa que se consuma en la caldera a nivel del mar debe aumentarse en aproximadamente un 8% la masa total del combustible.

Es importante tener en cuenta que a 2500 m.s.n.m la densidad del aire disminuye en un 26% y por lo tanto el contenido de oxígeno, requiriéndose más aire para una mejor combustión.

3.4. Eficiencia energética global del calentador

No ha podido compararse el rendimiento de la estufa cocina o su capacidad de recuperación de calor de forma precisa con fogones tradicionales al no existir un protocolo de pruebas normado. No obstante resulta evidente que el rendimiento es alto teniendo en cuenta que se obtienen 150 litros de agua a una temperatura superior a 40°C tras la cocción de los alimentos. Se suma por lo tanto la reducción de consumo de biomasa con la obtención de agua caliente sanitaria y calefacción para la vivienda.

4. Ejemplo de aplicación

En el páramo ecuatoriano, al igual que en amplias zonas andinas, existe un gran número de pequeños asentamientos poblacionales dedicados al pastoreo a alturas en las que la dureza del clima impide el crecimiento de vegetación arbórea. Dicha población cuenta con pequeños arbustos como único recurso energético con el que cocinar, calentar agua y acondicionar térmicamente sus viviendas. La escasez de recursos junto con la utilización de sistemas de combustión abierta únicamente alcanza para la cocción de alimentos.

Amplias zonas de alta montaña de la cordillera andina se caracterizan por sus bajas temperaturas y una alta nubosidad. Áreas, por lo tanto, con gran demanda energética para el acondicionamiento térmico de sus viviendas pero carentes de radiación solar que permita el aprovechamiento de cualquier tipo de energía alternativa basada en la captación solar [13].

Dicha circunstancia, aparejada de una escasez de recursos energéticos conlleva importantes problemas de confort térmico interior para sus habitantes [14]. No es habitual en este tipo de viviendas el calentamiento de agua para su utilización en la higiene personal de los habitantes de la vivienda, debido principalmente a la necesidad de destinar el escaso combustible a la cocción de alimentos. El aprovechamiento del calor residual generado por el fuego de las cocinas representa la principal y escasa fuente de calefacción.

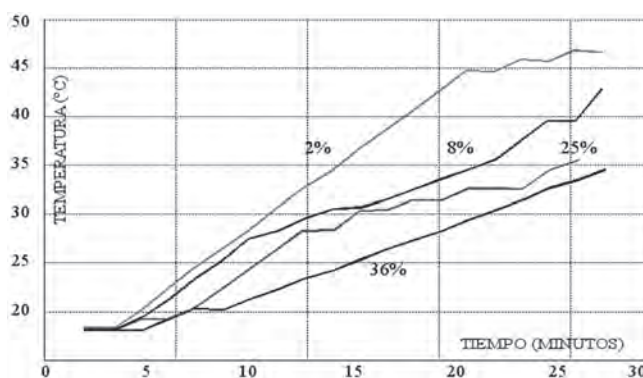


Figura 10. Gráfica del calentamiento de 150 litros de agua con pajonal para distintas humedades relativas de este

Fuente: autores

Esta estrategia sin embargo tiene altos riesgos ya que la mala combustión y la masiva utilización de sistemas abiertos sin extracción de humo generan con frecuencia problemas de salud y contaminación provocados por las sustancias tóxicas con monóxido de carbono o enfermedades respiratorias provocadas por el hollín que genera una combustión incompleta [12].

El único recurso vegetal abundante en la zona es el pajonal, un tipo de paja. Su utilización está limitada debido a su escaso poder calorífico, la cantidad de humo que genera su combustión y su alto contenido de humedad.

En la gráfica de la Fig. 10 se observan los resultados obtenidos en la caldera/cocina utilizando pajonal con distintos contenidos de humedad

Se observa nuevamente que es de vital importancia el secado de la biomasa que se produce en la cámara de secado recuperando la energía de los gases de combustión con el objetivo de incrementar la capacidad calorífica de la biomasa

5. Conclusiones

- La caldera/cocina ahorra un 34% en consumo de combustible en la cocción, comparándola con una cocina a fuego abierto.
- La humedad relativa de la biomasa afecta en gran medida a la eficiencia. Mientras que la eficiencia del aserrín es del 30%, la del pajonal es del 70%. Esta diferencia radica en la cantidad de humedad contenida en la biomasa, la geometría de la misma y la configuración de la cámara de combustión.
- La eficiencia global de la caldera/cocina es del 80%, (Eficiencia tomada a partir de la combustión de 4.6 libras. De madera con una humedad del 4% y de la distribución y pérdidas de su poder calórico durante el tiempo de calentamiento de los 150 litros de agua y la temperatura de los gases de escape) ya que la mayoría de pérdidas originadas en la misma son aprovechadas para generar calefacción y secado de Biomasa.
- El costo de fabricación de la caldera permite ahorrar un 9% si se lo compara con la adquisición de equipos que permitan las mismas aplicaciones (cocción, calefacción, secado de madera y temperado de agua)
- La caldera/estufa es un 30 % más eficiente que la estufa

FN [12] reduciendo el tiempo de ebullición de agua en un 68 %. Por otro lado la tasa de incineración, es decir la velocidad con la que se consume el combustible, es del 70%. Para finalizar, la caldera/cocina permite ahorrar un 34% en combustible.

- El estudio abre gran cantidad de campos para un sistema de calefacción y calentamiento de agua aprovechando la necesidad existente de preparación de alimentos para las clases más desfavorecidas, lo cual podría repercutir en la mejora de hábitat de buena parte de la población que no tiene acceso a combustibles fósiles, ni a suministro eléctrico ni a biomasa de alto poder calorífico.

Agradecimientos

La concepción del proyecto de investigación así como su desarrollo fueron generados gracias al apoyo institucional proporcionado por la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE)

Bibliografía

- [1] Organización Mundial de la Salud. No Title. 2014. Retrieved from <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs292/es/>
- [2] Cespi, D., Passarini, F. and Ciacci, L., Heating systems LCA: Comparison of biomass-based appliances. The International Journal of Life Cycle Assessment, 19(1), pp. 89-99, 2014.
- [3] Purvis, C.R., Kariher, P.H. and Geraghty, A., Low emission and high efficiency residential pellet-fired heaters. In Bioenergy 2000 (Ed.), Low emission and high efficiency residential pellet-fired heaters. Buffalo, 10 P, 2000
- [4] Elías, X., ¿Se considera la biomasa como una alternativa energética?, Econotermia, LXXXI, pp. 46-50, 2006
- [5] Arvind, K.M.P. and Kumar, P.M., Comparative study of effect of different parameters on performance and emission of biomass cook stoves. International Journal of Research in Engineering & Technology, 2(3), pp. 121-126, 2013.
- [6] Jiménez, R.D., Soriano, V.M.B., Fax, T. and Masera, O., De La "Lorena" a La "Patsari". Programa de energía rural, Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada A.C. (GIRA) Michoacán, México, 2004.
- [7] Hoja de toma de datos de WBT, CTT, 2014.
- [8] Fernández, S.Z., Tarrio-Saavedra, J., Naya, S. and López-Beceiro, J., Impact estimates of the actions for the rehabilitation of energy efficiency in residential building, DYNA 81(186), pp. 200-207, 2014.
- [9] Smith, K.R., Dutta, K., Chengappa, C., Gusain, P.P.S., Berrueta, O. M.V., Edwards, R., and Shields, K.N., Monitoring and evaluation of improved biomass cookstove programs for indoor air quality and stove performance: Conclusions from the Household Energy and Health Project. Energy for Sustainable Development, 11(2), pp. 5-18. 2007. DOI: 10.1016/S0973-0826(08)60396-8
- [10] Adkins, E., Tyles, E., Wang, J. Siriri, D. and Modi, V.V., Field testing and survey evaluation of household biomass cookstoves in rural sub-Saharan Africa. Energy for Sustainable Development, 14(3), pp. 172-185, 2010. DOI: 10.1016/j.esd.2010.07.003
- [11] Incropera, F. y Dewitt, P., Fundamentos de Transferencia de Calor, pp 114-123, Ed. Pearson Education, 1999.
- [12] Aristazabal-Hernandez, J., Validación y evaluación comparativa de la eficiencia de una estufa de leña mejorada bajo condiciones controladas y prueba de campo 1. Informador Técnico, 78(1), pp. 12-24, 2014.
- [13] INAMHY. Annual reports 2004/2014. Available at: <http://www.serviciometeorologico.gob.ec>
- [14] Proterra, R.E.D.I. and Proterra, R.I., Técnicas de Construcción con Tierra, 2011.

R. Delgado-García, graduado de Dr. en Ciencias Técnicas en la Facultad de Máquinas Energéticas, Universidad Politécnica Estatal de San Petersburgo, Rusia, en 1987. Desde 1988 hasta 2010 compartió sus actividades entre el sector productivo y la docencia en la Facultad de Energía Nuclear de la Universidad de la Habana. Profesor Principal Titular de la cátedra de Termodinámica en el Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Ecuador.
ORCID: 0000-0002-1244-0877

L. Velasco-Roldán, graduado de Dr. en Arquitectura y Eficiencia Energética en Edificios por la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona en 2005. Asesor técnico del Colegio de Arquitectos de las Islas Baleares. Becario Prometeo de la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia y Tecnología en el año 2014. Investigador Asociado de la Universidad de las Fuerzas Armadas, Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica.
ORCID: 0000-0001-5778-1934

E. Onofa-Cuichánb, graduado de Ing. Mecánica en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE en 2015.
ORCID 0000- 0001- 5916- 776X

E. Armas-Figueroa, graduado de Ing. Mecánica en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE en 2015.
ORCID 0000-0002-7771-8374



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería
Química e Ingeniería de Petróleos

Oferta de Posgrados

Maestría en Ingeniería - Ingeniería Química
Maestría en Ingeniería - Ingeniería de Petróleos
Doctorado en Ingeniería - Sistemas Energéticos

Mayor información:

E-mail: qcaypet_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 5317

Numerical determination of the solubility of vitamin C in various solvents, for selective extraction or for its incorporation in formulations oriented to care, welfare and health of the skin

Carlos Esteban Aristizábal-Alzate^a

^a Facultad de Ingeniería, Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín, Colombia. carlosaristizabal207157@correo.itm.edu.co

Received: December 19th, 2015. Received in revised form: March 13th, 2016. Accepted: July 18th, 2016.

Abstract

Vitamin C has excellent antioxidant properties and its use in topical formulations brings many benefits to the skin. For these reasons and the strong global trend to develop natural products base, the industry uses fruit pulps rich in this component for the development of products for the care and welfare of the skin. This article focuses on determining the Hansen Parameters of this vitamin, which are found by the use of group contribution methods then compare them with the same parameters of solvents or mixtures thereof and so, it could estimate numerically which or what would be the best solvents for extraction of the organic compound of a biomass and/or for incorporation into pharmaceutical, cosmeceutical, cosmetic formulations, among others.

Keywords: Vitamin C; Solvent; Hansen parameters; Group contribution method; Solubility

Determinación numérica de la solubilidad de la vitamina C en diferentes solventes, para la extracción selectiva o para la incorporación en formulaciones orientadas al cuidado, bienestar y salud de la piel

Resumen

La Vitamina C posee excelentes propiedades antioxidantes y su uso en formulaciones de uso tópico trae muchos beneficios para la piel. Por estas razones y la marcada tendencia a nivel mundial de desarrollar productos de base natural, la industria utiliza pulpas de fruta ricas en este componente para la formulación de productos para el cuidado y bienestar de la piel. El presente artículo se enfoca en determinar los Parámetros de Hansen de esta vitamina, los cuales son hallados mediante métodos de contribución de grupos, para luego compararlos con los mismos parámetros de solventes o mezclas de ellos y así, se podrían estimar numéricamente cual o cuales serían los mejores solventes para la extracción de este compuesto orgánico de una biomasa y/o para su incorporación en formulaciones farmacéuticas, cosmeceúticas, cosméticas, entre otras.

Palabras clave: Vitamina C; Solvente; Parámetros de Hansen; Método de Contribución de Grupos; Solubilidad.

1. Introducción

La Vitamina C, enantiómero L del ácido ascórbico o antiescorbútica, cuya estructura molecular puede observarse en la Fig. 1, es un compuesto orgánico con un peso molecular de 176,12 g/mol, que tiene excelentes propiedades antioxidantes [1]

y se encuentra en cantidades apreciables en diferentes frutas, como por ejemplo en la *Psidium gajaba* L (guayaba), con un contenido que oscila entre 78,2 y 268,7 mg de ácido ascórbico por cada 100 g de fruta fresca [2]. Es por esta razón y la marcada tendencia a nivel mundial de desarrollar productos de base natural [3], que en la industria del cuidado y bienestar de la piel,

How to cite: Aristizábal-Alzate, C. E. Determinación numérica de la solubilidad de la vitamina C en diferentes solventes, para la extracción selectiva o para la incorporación en formulaciones orientadas al cuidado, bienestar y salud de la piel. DYNA 83 (199) pp. 191-1

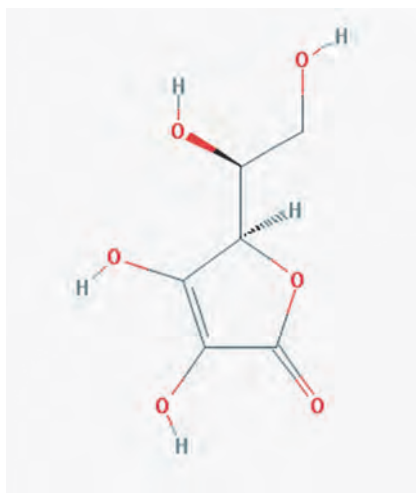


Figura 1. Estructura química de la Vitamina C
Fuente: [7].

se utilizan pulpas de fruta ricas en este componente, como lo son el limón verde, la naranja dulce, la guayaba, la toronja y el pomelo, para la formulación de productos cosméticos, dermocosméticos y cosmocéuticos, cuya funcionalidad permita tener una piel más radiante, sana [4-6] y protegida de los radicales libres, los cuales pueden causar envejecimiento, mutaciones o cáncer [1].

En cuanto a la solubilidad de este compuesto en diferentes solventes, se menciona su solubilidad en el agua. Sin embargo, no se dice de cuanto a pesar de ser un compuesto tan usado en las industrias anteriormente mencionadas. Además, este tipo de propiedades por lo general no son reportadas en la literatura científica, ya que puede ser muy costoso o difícil estimarlas [8-10], lo cual hace que los métodos de estimación numérica de propiedades físico-químicas sean de gran utilidad [9], [10].

Este artículo se enfoca en determinar numéricamente el grado de solubilidad de la Vitamina C en diferentes solventes y en mezclas de ellos, ya que se hace necesario utilizar el solvente correcto a la hora de extraer o de incorporar este compuesto en formulaciones eficaces y seguras para el cuidado, bienestar y salud de la piel [11].

Este análisis partirá del cálculo de algunas propiedades necesarias para determinar los parámetros de Hansen de la Vitamina C por métodos de contribución de grupos, para luego compararlos con los parámetros de Hansen de algunos solventes y mezclas de estos, tales como el metanol, etanol, entre otros, y de esta forma determinar numéricamente cual es el solvente o mezcla de solventes más adecuada para extraer este activo de una biomasa o como vehículo en una formulación cosmética, dermocosmético, entre otras.

2. Metodología

2.1. Método de contribución de grupos

En los métodos de Contribución de Grupos, la propiedad de un componente es una función de los parámetros estructuralmente dependientes, los cuales se determinan a su vez como una función de la frecuencia de los grupos que representan

a las moléculas y sus contribuciones [8,10,12]. El rango de aplicación y la fiabilidad de estos métodos depende de una serie de factores, como por ejemplo; la definición de los grupos utilizados para representar la estructura del componente puro, el modelo para calcular las propiedades, entre otros [8].

Los métodos de representación molecular y la contribución de cada grupo son los presentados por Hukkerikar y col. (2012); Regresión por Etapas y Regresión Simultánea. Sin embargo, se seleccionará Regresión Simultánea, ya que en los análisis y comparación de los dos métodos hechos por esta referencia, se concluye que este presenta una mejora en el rendimiento en comparación con el método de Regresión por Etapas.

Por otro lado, el modelo de predicción de las propiedades que será utilizado, se ilustra en la ec. (1), la cual es presentada también por Hukkerikar y col. (2012) y Marrero y Gani (2001).

$$f(x) = \sum NiCi + w \sum MjDj + z \sum EkOk \quad (1)$$

Donde $f(X)$ es una función de la propiedad X y puede contener parámetros ajustables del modelo adicionales (constantes universales), dependiendo de la propiedad en cuestión. En la ec. (1), Ci es la contribución del grupo de primer orden de tipo- i que se produce Ni veces, Dj es la contribución del grupo de segundo orden del tipo j que ocurre Mj veces y Ek es la contribución del grupo de tercer orden de tipo- k que tiene Ok ocurrencias en un componente. La w y la z toman el valor de 1, si la molécula tiene representación en el segundo orden y tercer orden respectivamente, y de 0 si no lo tienen.

La propiedad que será utilizada para medir el grado de exactitud que tienen el método de regresión y el modelo de predicción de las propiedades, será el Punto de Fusión de la Vitamina C pura, ya que este dato está disponible en varias referencias científicas y bases de datos especializadas disponibles, como por ejemplo en la referencia [7].

La ec. (2) es suministrada por Hukkerikar y col. (2012) y es la que permite calcular numéricamente el Punto de Fusión a partir del resultado de la ec. (1) para esta propiedad.

$$f(x) = \exp \left[\frac{Tm}{Tmo} \right] \quad (2)$$

Donde $f(X)$ es el resultado del modelo de cálculo de propiedades para el Punto de Fusión, Tm es el Punto de Fusión a calcular en K y Tmo es un parámetro que toma el valor de 143,5706 K para este caso.

La ec. (3) sirve para determinar cuantitativamente el error relativo, ER , y el grado de precisión de este método para el cálculo de las propiedades de la Vitamina C, que no se encuentran reportadas en la literatura.

$$ER = \exp \left[\frac{X_{exp} - X_{cal}}{X_{exp}} \right] \quad (3)$$

En donde X es la Temperatura de Fusión de la Vitamina C y los superíndices $exp.$ y $cal.$, son respectivamente la hallada experimentalmente y la calculada con estos métodos numéricos.

Para el cálculo numérico de los parámetros de solubilidad de Hansen, los cuales serán explicados a continuación, se utilizarán las siguientes ecuaciones:

$$\delta_D = \sum NiCi + w \sum MjDj + z \sum EkOk \quad (4)$$

$$\delta_p = \sum NiCi + w \sum MjDj + z \sum EkOk \quad (5)$$

$$\delta_H = \sum NiCi + w \sum MjDj + z \sum EkOk \quad (6)$$

En donde δ_i [MPa^{1/2}] es el Parámetro de Hansen de Dispersión, de Interacciones Polares y de los Enlaces de Hidrogeno respectivamente, y el otro lado de la igualdad es la función presentada en la ec. (1) de la propiedad δ_i , de acuerdo a los valores de contribución de grupos que presente la Vitamina C para este caso. Para determinar numéricamente los Parámetros de Hansen, tan solo es necesario hallar el lado derecho de las ec. (4)-(6), sin la necesidad de otras expresiones matemáticas.

2.2. Parámetros de solubilidad de Hansen (PSH)

Los Parámetros de Solubilidad de Hansen, PSH, han demostrado ser una forma eficaz y práctica para entender asuntos relacionados con la solubilidad, la dispersión, la difusión, la cromatografía, haciendo predicción compatibilidad de polímeros, la resistencia química, la velocidad osmótica, entre otros [1,13]. Desde laboratorios académicos hasta las aplicaciones industriales se han valido de la idea clave que los solutos de cualquier tipo, disolventes, polímeros, etc. pueden ser bien caracterizados por sólo tres subparámetros; interacciones débiles o de dispersión (δ_d), interacciones polares (δ_p) y a los enlaces de hidrógeno (δ_h), los cuales son conocidos como los Parámetros de Hansen. Este modelo propuesto por Van Krevelen [1], se relaciona con el parámetro de Hildebrand mediante la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de estos [1,9,14-16]. Además, este tratamiento permite observar la influencia de los diferentes tipos de interacciones intermoleculares presentes en el proceso de disolución, particularmente sobre las interacciones soluto-solvente [16].

Solutos y solventes con similares PSH tienen afinidad, es decir, cuando hay similitud entre cada uno de los términos correspondientes al compuesto y al disolvente, se producirá la disolución [1,10,14,15]. Para explicar matemáticamente esta afirmación es utilizada la siguiente expresión

$$Ra = \sqrt{4(\delta_{D2} - \delta_{D1})^2 + (\delta_{p2} - \delta_{p1})^2 + (\delta_{H2} - \delta_{H1})^2} \quad (7)$$

Donde Ra [MPa^{1/2}] es la distancia en el espacio tridimensional del parámetro de solubilidad entre el soluto y el solvente, δ_i es el Parámetro de Hansen y el subíndice 1 y 2 denotan al soluto y al solvente respectivamente. Esa distancia debe ser tan pequeña como sea posible ($Ra \sim 0$), si se desea que se de la disolución [14,15,17]. Sin embargo, existe una regla heurística o empírica suministrada por Durkee (2014), la cual dice que hasta un Ra máximo de 8 se daría una buena disolución entre el Solutos y el Solvente.

Cuando se tiene una mezcla de solventes para disolver el soluto, los Parámetros de Hansen de la mezcla se definen mediante la ec. (8).

$$\delta_{mezcla, i} = \left(\sum (v_i * (\delta_i)^2) \right)^{1/2} \quad (8)$$

Donde δ_{mezcla} es el Parámetro i de Hansen de la mezcla, δ es el valor del Parámetro de Hansen del componente i y v es la fracción volumétrica del solvente i en la mezcla.

Aunque los Parámetros de Hansen ayudan determinar teóricamente el grado solubilidad o de afinidad de una sustancia por un solvente, no determinan la solubilidad cuantitativa de estos.

3. Resultados y discusión

3.1. Descripción de la molécula de la Vitamina C

De acuerdo a la metodología planteada por Hukkerikar y col. (2012), las moléculas orgánicas pueden ser caracterizadas por tres ordenes; el primero proporciona una aproximación inicial que se ve mejorada en el segundo nivel y más refinada (si es necesario) en el tercer nivel. El objetivo final de este esquema de estimación multinivel es mejorar la precisión, la fiabilidad y el rango de aplicación de una serie de importantes propiedades de los componentes puros [8,12].

A continuación, en las Tablas 1 y 2 se ilustra la caracterización de los grupos funcionales de primer y segundo orden para la Vitamina C, de acuerdo a la metodología, reglas y datos suministrados por Hukkerikar y col. (2012). También en estas tablas, se presenta la contribución, ocurrencia o número de veces que se repite un grupo de determinado orden (primero, segundo o tercero) en la molécula.

Según esta referencia, se debe establecer una caracterización del Tercer Orden. Sin embargo, en este caso no se hace necesario, ya que la molécula se encuentra completamente descrita con los grupos del Primer y Segundo Orden, mencionados en las tablas anteriores.

3.2. Punto de fusión

Con los valores totales de la contribución de cada orden y grupo, plasmadas en las Tablas 3 y 4, se procedió a calcular el Punto de Fusión con las ec. (2)-(3), se estimó el Porcentaje de Error de este valor con el reportado por la referencia [7]. Estos valores se encuentran ilustrados en la Tabla 5.

Tabla 1.
Caracterización del Primer Orden para la Vitamina C

Número	Grupo	Contribución (Ocurrencia)
2	CH2	1
29	OH	4
169	CH (cyclic)	1
170	C (cyclic)	3
173	C-C(cyclic)	1
179	O (cyclic)	1
180	CO (Cyclic)	1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.
Caracterización del Segundo Orden para la Vitamina C

Número	Grupo	Contribución (Ocurrencia)
16	CHOH	1
21	CHmOHCHnOH	1
78	CHcyclic-CH	1
101	Ccyc-OH	2

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.

Determinación de la Contribución de Grupos del Primer Orden para el Punto de Fusión

Número	Grupo	Contribución (Ocurrencia)	Tm1	Tm1xCont
2	CH ₂	1	0,30	0,30
29	OH	4	3,24	12,97
169	CH (cyclic)	1	-0,13	-0,13
170	C (cyclic)	3	0,13	0,40
173	C--C(cyclic)	1	1,07	1,07
179	O (cyclic)	1	1,35	1,35
180	CO (Cyclic)	1	3,36	3,36
Total			19,31	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.

Determinación de la Contribución de Grupos del Segundo Orden para el Punto de Fusión

Número	Grupo	Contribución (Ocurrencia)	Tm2	Tm2xCont
16	CHOH	1	0,172	0,172
21	CHmOHCHnOH	1	0,022	0,0219
78	CHcyclic-CH	1	-0,355	-0,355
101	Ccyc-OH	2	0,846	1,69
Total			1,53	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.

Punto de Fusión Calculado y Porcentaje de error

Punto de Fusión Real (K)	463,15
Punto de Fusión Calculado (K)	437,61
% Error	5,51%

Fuente: Elaboración propia.

Este resultado da entender que el modelo matemático y la caracterización de la molécula realizada en el presente artículo, se acerca mucho a la realidad, ya que hay una diferencia de tan solo el 5,51% entre el valor del punto de fusión real y el calculado. Por lo tanto, se procederá a hacer uso de esta metodología y la representación del primer y segundo orden de la Vitamina C, para calcular los parámetros de Hansen de esta molécula.

3.3. Parámetros de Hansen

Los parámetros de Hansen son determinados para el primer y segundo orden siguiendo la misma metodología que para el punto de fusión, tal y como se ilustra en las Tablas 6 y 7.

Tabla 6.

Determinación de la Contribución de Grupos del Primer Orden para los Parámetros de Hansen

Núm.	Grupo	Cont. (Ocurr.)	δd	δdxCont	δp	δpxCont	δh	δhxCont
2	CH ₂	1	-	-0,002	-0,17	-0,17	-	-0,22
29	OH	4	8,05	32,20	5,24	20,95	-	47,20
169	CH (cyclic)	1	-3,69	-3,69	-3,21	-3,21	-	-0,52
170	C (cyclic)	3	-	-30,67	-2,62	-7,86	3	-7,90
173	C--C (cyclic)	1	-7,56	-7,56	-7,28	-7,28	-	-17,01
179	O (cyclic)	1	4,10	4,10	3,19	3,19	2,80	2,80
180	CO (Cyclic)	1	3,72	3,72	6,54	6,54	2,77	2,77
Total			-1,90	Total	12,17	27,13		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7.

Determinación de la Contribución de Grupos del Segundo Orden para los Parámetros de Hansen

Núm.	Grupo	Cont. (Ocurr.)	δd	δdxCont	δp	δpxCont	δh	δhxCont
16	CHOH	1	0,04	0,04	0,12	0,12	0,62	0,62
21	CHmOHCHnOH	1	0,17	0,17	-1,95	-1,95	-3,22	-3,22
78	CHcyclic-CH	1	-3,40	-3,40	-2,10	-2,10	-1,53	-1,53
101	Ccyc-OH	2	0,19	0,38	0,88	1,75	-1,62	-3,23
Total			-2,81	Total	-2,18	Total	-4,12	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8.

Parámetros de Hansen Calculados para la Vitamina C

Dispersión (δd)	Polar (δp)	Enlaces de hidrógeno (δh)
-4,71	10,00	23,01

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9.

Determinación Numérica de la Solubilidad de la Vitamina C en Diferentes Solventes Puros

Componente	δd	δp	δh	Ra
Acetona	15,50	10,40	7,00	43,47
Terbutanol	15,20	5,10	14,70	40,96
n-Propanol	16,00	6,80	17,40	41,91
Etanol	15,80	8,80	19,40	41,19
Metanol	15,10	12,30	22,30	39,69
Agua	15,50	16,00	42,30	45,18
Acetato de etilo	15,80	5,30	7,20	44,20
Ácido acético	14,50	8,00	13,50	39,62
Benceno	18,40	0,00	2,00	51,74
Hexano	14,90	0,00	0,00	46,55
D-Limoneno	16,60	0,60	0,00	49,33
Tolueno	18,00	1,40	2,00	50,77
Aceite mineral	14,50	0,00	0,00	45,88

Fuente: Elaboración propia.

Haciendo uso de las ec. (4)-(6), y los datos plasmados en la dos tablas anteriores, son calculados los Parámetros de Hansen, los cuales son presentados en la Tabla 8.

3.4. Solubilidad de la Vitamina C en diferentes solventes puros

A continuación, en la Tabla 9 son presentados algunos solventes utilizados en la industria química en general con sus respectivos Parámetros de Hansen, los cuales son reportados en la referencia [17]. Con ayuda de la ec. (7) se calcula el Ra, el cual determina el grado de afinidad entre cada uno de los solventes presentados en dicha tabla y la Vitamina C, de acuerdo a la explicación ya dada.

Analizando la información de la tabla anterior, se evidencia que los solventes más afines a la Vitamina C son; el ácido acético, metanol, terbutanol, etanol y el n-propanol. Cabe resaltar, que aunque el agua no aparece en estos resultados como un solvente muy afín a la Vitamina C, si se encuentra reportada en la literatura como uno para solubilizar esta vitamina. Es por esta razón, que en el presente estudio se tiene en cuenta el análisis de la afinidad o el grado de solubilidad entre el ácido ascórbico y mezclas de los solventes con mayor afinidad ya seleccionados, y el agua.

3.5. Solubilidad de la Vitamina C en diferentes mezclas de solventes

A continuación, son ilustrados en las Tablas 10-14 el grado de solubilización de la Vitamina C en diferentes mezclas de solventes. Como ya se explicó, este grado está determinado por el valor de Ra, el cual entre más cercano a cero, el solvente o la mezcla de solventes tendrán mayor afinidad por el soluto estudiado, en este caso la Vitamina C.

El respectivo parámetro de Hansen de la mezcla es calculado utilizando la ec. (8). Posteriormente con los δ_i de la mezcla, se hace uso de la ec. (7) para calcular el Ra o el grado de solubilización, o de afinidad que existe entre la mezcla de solventes y la Vitamina C.

Tabla 10.

Solubilidad de la Vitamina C en una mezcla de Ácido Acético y Agua

Fracción Volumétrica del Ácido acético	δd	δp	δh	Ra
0,00	18,10	17,10	16,90	46,57
0,05	17,94	16,76	16,75	46,22
0,10	17,77	16,42	16,59	45,87
0,15	17,61	16,07	16,43	45,52
0,20	17,44	15,71	16,28	45,16
0,25	17,27	15,34	16,12	44,81
0,30	17,10	14,96	15,96	44,46
0,35	16,93	14,58	15,79	44,10
0,40	16,75	14,18	15,63	43,75
0,45	16,58	13,77	15,46	43,40
0,50	16,40	13,35	15,29	43,04
0,55	16,22	12,91	15,12	42,69
0,60	16,04	12,46	14,95	42,33
0,65	15,85	12,00	14,78	41,98
0,70	15,67	11,51	14,60	41,63
0,75	15,48	11,00	14,43	41,28
0,80	15,29	10,47	14,25	40,94
0,85	15,09	9,91	14,06	40,60
0,90	14,90	9,32	13,88	40,27
0,95	14,70	8,68	13,69	39,94
1,00	14,50	8,00	13,50	39,62

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11.

Solubilidad de la Vitamina C en una mezcla de Etanol y Agua

Fracción Volumétrica del Etanol	δd	δp	δh	Ra
0,00	18,10	17,10	16,90	46,57
0,05	17,99	16,78	17,03	46,29
0,10	17,88	16,46	17,17	46,01
0,15	17,77	16,13	17,30	45,74
0,20	17,66	15,79	17,43	45,46
0,25	17,55	15,45	17,56	45,18
0,30	17,44	15,10	17,69	44,91
0,35	17,33	14,74	17,81	44,63
0,40	17,22	14,37	17,94	44,35
0,45	17,10	13,99	18,07	44,08
0,50	16,99	13,60	18,19	43,81
0,55	16,87	13,20	18,32	43,53
0,60	16,76	12,78	18,44	43,26
0,65	16,64	12,36	18,56	42,99
0,70	16,52	11,91	18,69	42,72
0,75	16,41	11,45	18,81	42,46
0,80	16,29	10,97	18,93	42,19
0,85	16,17	10,47	19,05	41,94
0,90	16,04	9,95	19,16	41,68
0,95	15,92	9,39	19,28	41,43
1,00	15,80	8,80	19,40	41,19

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12.

Solubilidad de la Vitamina C en una mezcla de Metanol y Agua

Fracción Volumétrica del Metanol	δd	δp	δh	Ra
0,00	18,10	17,10	16,90	46,57
0,05	17,96	16,89	17,21	46,22
0,10	17,82	16,68	17,52	45,88
0,15	17,68	16,47	17,82	45,54
0,20	17,54	16,25	18,11	45,20
0,25	17,40	16,04	18,40	44,86
0,30	17,26	15,81	18,69	44,52
0,35	17,11	15,59	18,97	44,18
0,40	16,96	15,36	19,24	43,83
0,45	16,82	15,13	19,52	43,49
0,50	16,67	14,90	19,79	43,15
0,55	16,52	14,66	20,05	42,81
0,60	16,37	14,41	20,31	42,46
0,65	16,21	14,17	20,57	42,12
0,70	16,06	13,92	20,83	41,77
0,75	15,90	13,66	21,08	41,43
0,80	15,75	13,40	21,33	41,08
0,85	15,59	13,13	21,58	40,73
0,90	15,43	12,86	21,82	40,39
0,95	15,26	12,58	22,06	40,04
1,00	15,10	12,30	22,30	39,69

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13.

Solubilidad de la Vitamina C en una mezcla de Etanol y Ácido Acético

Fracción Volumétrica del Etanol	δd	δp	δh	Ra
0,00	14,50	8,00	13,50	39,62
0,05	14,57	8,04	13,86	39,67
0,10	14,64	8,08	14,20	39,72
0,15	14,70	8,13	14,54	39,78
0,20	14,77	8,17	14,87	39,84
0,25	14,84	8,21	15,19	39,90
0,30	14,90	8,25	15,51	39,97
0,35	14,97	8,29	15,82	40,04
0,40	15,03	8,33	16,12	40,11
0,45	15,10	8,37	16,42	40,19
0,50	15,16	8,41	16,71	40,27
0,55	15,23	8,45	17,00	40,35
0,60	15,29	8,49	17,28	40,44
0,65	15,36	8,53	17,56	40,52
0,70	15,42	8,57	17,84	40,61
0,75	15,49	8,61	18,11	40,70
0,80	15,55	8,65	18,37	40,80
0,85	15,61	8,69	18,63	40,89
0,90	15,68	8,72	18,89	40,99
0,95	15,74	8,76	19,15	41,09
1,00	15,80	8,80	19,40	41,19

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a los resultados de las Tablas 10-13, se puede inferir que las mezclas de los solventes allí establecidas en cualquier proporción, no solubilizarían la Vitamina C tan bien como los respectivos componentes puros. Por tanto, el uso de cada mezcla como solvente para la extracción o como vehículo en formulaciones cosméticas y farmacéuticas queda descartado.

Se puede evidenciar a través del análisis de la tabla anterior, que una mezcla que comprenda un 0,55 de Ácido Acético y un 0,45 de Metanol en fracción volumétrica, tiene mayor afinidad por la Vitamina C que cualquier solvente puro o mezclas de ellos seleccionados en el presente artículo. Sin embargo, se debe tener en cuenta que para las aplicaciones finales descritas en el presente artículo, el Metanol es considerado tóxico para su uso en productos de uso humano.

Tabla 14.
Solubilidad de la Vitamina C en una mezcla de Ácido Acético y Metanol

Fracción Volumétrica del Ácido acético	δd	δp	δh	Ra
0,00	15,10	12,30	22,30	39,69
0,05	15,07	12,12	21,94	39,63
0,10	15,04	11,94	21,58	39,57
0,15	15,01	11,76	21,21	39,52
0,20	14,98	11,57	20,84	39,47
0,25	14,95	11,38	20,46	39,42
0,30	14,92	11,18	20,07	39,39
0,35	14,89	10,99	19,67	39,35
0,40	14,86	10,79	19,27	39,33
0,45	14,83	10,58	18,86	39,30
0,50	14,80	10,38	18,43	39,29
0,55	14,77	10,16	18,00	39,28
0,60	14,74	9,95	17,56	39,28
0,65	14,71	9,72	17,10	39,29
0,70	14,68	9,50	16,64	39,30
0,75	14,65	9,26	16,16	39,33
0,80	14,62	9,03	15,66	39,36
0,85	14,59	8,78	15,15	39,41
0,90	14,56	8,53	14,62	39,46
0,95	14,53	8,27	14,07	39,54
1,00	14,50	8,00	13,50	39,62

Fuente: Elaboración propia.

Aunque un estudio numérico llevado a cabo por *Park y col. (2010)* arrojó como resultado que los mejores solventes para solubilizar la Vitamina C, son el hidroperóxido de metilo y la Urea-R, el método de contribución de grupos utilizado por los autores no es tan completo y cercano a la realidad como el utilizado en el presente artículo y propuesto por *Hukkerikar y col. (2012)* y *Marrero y Gani (2001)*, ya que *Park y col. (2010)* solo contemplan el aporte del grupo funcional i para hallar el valor numérico de la propiedad j, y no contemplan las interacciones de los diferentes grupos funcionales que componen la molécula de la Vitamina C y como estas afectan el valor de las diferentes propiedades físico-químicas determinadas mediante modelos numéricos.

4. Conclusiones

El cálculo de la solubilidad de la Vitamina C en diferentes solventes y mezclas de ellos son presentados en el presente artículo, gracias al uso de los Parámetros de Hansen de este compuesto orgánico, los cuales fueron determinados con la ayuda de métodos de contribución de grupos. Estos parámetros son calculados numéricamente, por lo que son una mera aproximación de la realidad, así que deben ser usados como una guía a la hora de seleccionar el solvente correcto para extraer esta Vitamina de una biomasa, incorporarla en una formulación cosmética o farmacéutica y/o entre otras aplicaciones relacionadas.

De acuerdo a los resultados ilustrados en el actual estudio, los solventes puros que presentan un mayor grado de afinidad por la Vitamina C o el Ácido Ascórbico, son el Metanol y el Ácido Acético. En cuanto a la mezcla de solventes, se puede decir que esta, en una fracción volumétrica aproximada del 0,55 de Ácido Acético y un 0,45 de metanol, daría un mayor grado de afinidad por la Vitamina C que cualquier solvente o mezcla de ellos aquí seleccionados. Sin embargo, lo que se pretende con el estudio es brindar herramientas que permitan

seleccionar el solvente(s) para extraer este compuesto orgánico y/o incorporarlo en formulaciones orientadas al bienestar, salud y belleza de la piel, por lo tanto, no se recomienda el uso de metanol, ya que su uso se encuentra restringido para estos fines, tal y como se evidencia en el Anexo III/52 del COSING; base de datos de ingredientes utilizados en la industria cosmética de la Comunidad Europea. Como otras alternativas se recomendaría el uso de Ácido Acético y Etanol para tales propósitos.

Un futuro estudio complementario a este, sería el de llevar a cabo pruebas y análisis de laboratorio sobre la solubilidad de la Vitamina C y los solventes o mezclas de ellos con los cuales presento numéricamente mayor afinidad o grado de solubilidad en el presente estudio, para que de esta forma se valide el modelo implementado y pueda en cierta medida extrapolarse a otros solventes novedosos, otras moléculas de naturaleza orgánica compleja, entre otros.

Referencias

- [1] Park, K.A., Lee, H.J. and Hong, I.K., Solubility prediction of bioantioxidants for functional solvent by group contribution method, *J. Ind. Eng. Chem.*, 16(3), pp. 490-495, 2010.
- [2] Rojas-Barquera, D. y Narváez-Cuenca, C.E., Determinación de Vitamina C, compuestos fenólicos totales y actividad antioxidante de frutas de guayaba (*Psidium guajava* L.) cultivadas en Colombia, *Rev. Quim. Nova*, 32(9), pp. 2336-2340, 2009.
- [3] Departamento Nacional de Planeación DNP- DDRS Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, I. y T. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial Ministerio de Comercio, M. de P. Social, M. de R. Exteriores, and D. A. de C. T. e I.- Colciencias, Política para el desarrollo comercial de la biotecnología a partir del uso sostenible de la biodiversidad - CONPES 3697. Bogotá, Colombia, 2011, 36 P.
- [4] Alcalde, M.T., Alimentos usados en formulación cosmética, *Ámbito Farm. Cosmética*, 26(3), pp. 10–109, 2007.
- [5] Bacallao, L.G., Domínguez, D.M.R., Gómez, L.V.G. and Ángel, M.H., Plantas con propiedades antiinflamatorias, *Rev. Cuba. Investig. Biomed.*, 21(3), pp. 214-216, 2002.
- [6] Farris, P.K., Topical vitamin C: A useful agent for treating photoaging and other dermatologic conditions., *Dermatol. Surg.*, 31(7 Pt 2), pp. 814-817; discussion 818, 2005.
- [7] I.B. for C. National, Ascorbic acid., PubChem Compound Database CID=54670067, 2015. [Online]. [Accessed: 01-Oct-2015]. Available at: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/54670067>.
- [8] Hukkerikar, A.S., Sarup, B., Ten Kate, A., Abildskov, J., Sin, G. and Gani, R., Group-contribution + (GC +) based estimation of properties of pure components: Improved property estimation and uncertainty analysis, *Fluid Phase Equilib.*, 321, pp. 25-43, 2012.
- [9] Scilipoti, J., Cismondi, M. and Brignole, E.A., Prediction of physical properties for molecular design of solvents, *Fluid Phase Equilib.*, 362, pp. 74-80, 2014.
- [10] Gutierrez, C., García, M.T., Lucas, A. and Rodriguez, J.F., Una aproximación práctica para el diseño de un proceso de reciclado de polímeros mediante disolución, *AFINIDAD LXVIII*, pp. 181-188, 2011.
- [11] Gani, R., Jiménez-González, C., Ten Kate, A., Craft, P.A., Jones, M., Powell, L., Atherton, J.H. and Cordiner, J.L. Modern approach to solvent selection, *Chem. Eng.*, 113(3), pp. 30-43, 2006.
- [12] Marrero, J. and Gani, R., Group-contribution based estimation of pure component properties, *Fluid Phase Equilibria*, 183–184, pp. 183-208, 2001.
- [13] Hansen, C.M., Hansen Solubility Parameters, *Angewandte Chemie International Edition*, 2001.
- [14] C.M. Hansen, Hansen Solubility Parameters: A User's Handbook, Second Ed. 2007.
- [15] Durkee, J.B., Solubility Scales (Parameters), Chapter 2, in *Cleaning with Solvents*, 2014, pp. 29-55.

- [16] Gantiva, M. and Martínez, F., Método extendido de hildebrand en la predicción de la solubilidad del ketoprofeno en mezclas cosolventes etanol + agua, *Quim. Nova*, 33, pp. 370-376, 2010.
- [17] Durkee, J.B., - Solvent Selection for Specific Tasks, Chapter 3, in *Cleaning with Solvents*, 2014, pp. 57-123.

C.E. Aristizábal-Alzate, recibió el título de Ing. Químico en el año 2012 de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Adicionalmente, inició en el 2016, estudios en la Maestría en Gestión Energética Industrial en el Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín (ITM) y el pregrado en Química en la Universidad de Antioquia. Desde el año 2012 hasta Enero del 2016, trabajó como asesor de pequeños emprendimientos del sector químico y agroindustrial. Además, se desempeñó durante 3 años, como Director de Investigación y Desarrollo de una compañía que se especializa en la extracción de principios activos, metabolitos secundarios y extractos naturales estandarizados, a partir del aprovechamiento sostenible de la biodiversidad vegetal de Colombia.

ORCID: 0000-0002-8970-6389



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería
Química e Ingeniería de Petróleos

Oferta de Posgrados

Maestría en Ingeniería - Ingeniería Química
Maestría en Ingeniería - Ingeniería de Petróleos
Doctorado en Ingeniería - Sistemas Energéticos

Mayor información:

E-mail: qcaypet_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 5317

Gully erosion, land uses, water and soil dynamics: A case study of Nazareno (Minas Gerais, Brazil)

Ligia de Freitas Sampaio ^a Maria Paula Pires de Oliveira ^a Raul Cassaro ^a
Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues ^a Osni José Pejon ^a Joel Barbujani Sígolo ^b & Vinicius Martins Ferreira ^c

^a Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, Brasil. ligia.sampaio@usp.br; mapaula.oliveira@gmail.com; raulcassaro@gmail.com; valguima@usp.br; pejon@sc.usp.br

^b Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, jbsigolo@usp.br

^c Projeto Maria de Barro, Centro Regional Integrado de Desenvolvimento Sustentável, Nazareno, Minas Gerais, Brasil. vocorocas1@yahoo.com.br

Received: December 21th, 2015. Received in revised form: March 20th, 2016. Accepted: July 22th, 2016.

Abstract

Gully erosion is a critical issue worldwide. To correctly understand the association that the environmental data (such as climate, vegetation cover, etc.) has with soil erosion susceptibility and land uses remains a challenge in land management. This paper evaluates land use interactions with macroscopic dynamics and microscopic soil properties in terms of soil's susceptibility to erosion. We examine the reactivation of a stabilized gully in Nazareno (Brazil) by comparing field assessments with laboratory experiments, using two types of soil (well-developed soil and granite-gneiss saprolite). Both of these showed that the macroscopic behavior of soils is connected with microscopic characteristics. Well-developed soil is more erosion resistant than granite-gneiss saprolite, but the surrounding land uses do not respect these differences. These analyses enable us to explain why this and other gullies in the municipality are apparently stabilized, but soil loss continues to occur. This paper demonstrates that urban and rural expansion played a major role in triggering gully and soil losses.

Keywords: soil loss; prevention; gullies; environmental planning.

Erosión, usos del suelo, la dinámica del agua y del suelo: Un estudio de caso de Nazareno (Minas Gerais, Brasil)

Resumen

Erosión es un problema crítico en todo el mundo. Este documento evalúa las interacciones de los usos del suelo con la dinámica macroscópica y propiedades microscópicas del suelo frente a la susceptibilidad su erosión. Examinamos la reactivación de una cárcava recuperada en la ciudad de Nazareno (Brasil), comparando la evaluación de campo con experimentos de laboratorio utilizando dos tipos de suelo (suelo bien desenvuelto y granito-gneiss saprolito). Ambos demostraron que el comportamiento macroscópico de los suelos esta relacionado con las características microscópicas. Suelo bien desenvuelto es más resistente a la erosión que granito-gneiss saprolito, pero los usos de la tierra de los alrededores no respeta estas diferencias. Estos análisis han permitido explicar por qué este y otras cárcavas del municipio aparentemente se estabilizaron, pero las pérdidas de suelo siguen ocurriendo. Se ha demostrado que la expansión urbana y rural desempeñó un papel importante en el desencadenamiento de estas erosiones y pérdidas de suelo.

Palabras clave: pérdida del suelo; prevención; cárcavas; planeamiento ambiental.

1. Introduction

1.1. Gully erosion: An environmental or social problem?

Soil erosion is a natural phenomenon; however, when

accelerated, it causes social, environment and economic losses [1]. It affects not only the area itself, but there are also off-site impacts [2]. Several studies show the triggering, development and effects of gullies (complex soil erosion) and reclamation solutions [2-15].

How to cite: de Freitas Sampaio, L., Pires- de Oliveira, M. P., Cassaro, R., Silvestre-Rodrigues, V. G., Pejon, O. J., Barbujani-Sígolo, J. & Martins-Ferreira, V. Gully erosion, land uses, water and soil dynamics: a case study of Nazareno (Minas Gerais, Brazil) DYN

Over the past several decades, gullies have become a very important issue worldwide. The acceleration in the number of gullies is connected with human interference beginning in the 18th century, which has modified and intensified natural rates of soil removal and deposits [16].

In India, this problem is related to improper management of runoff, deforestation, overgrazing and incorrect agricultural activities [17]; the lack of rural conservative practices and the excess of mechanization are the causes seen in Latin America [18]; and in Europe, the USA, China and Africa, many studies have shown a high level of soil loss in gullies over years [19].

Although this type of erosion is associated with runoff and steep slopes, it mostly occurs by subterranean flow and in soils that are susceptible to crusting or piping [20]. Even activities that at first were considered unable to interfere in environmental dynamics (such as cattle trails or ditches to separate rural properties, whose origins are connected with human necessities) can initiate gully erosion [21]. Once developed, their natural recovery could take decades [22]. Therefore, reclamation projects may try to return the environment to its condition before erosion (restoration) or give a different function to the site (rehabilitation) [23]. However, in Brazil the choice of reclamation technique is likely to be based on the most commonly used one or the cheapest one. In those cases, the results are not satisfactory, and the process can even become worse [15].

There is a great quantity of water erosion processes (gullies) in Southern Minas Gerais' state (Brazil). These gullies affect productive areas and can be found on both public and private properties [27]. Approximately 1,700 gullies are located in the Alto Rio Grande watershed. This represents about 2,700 ha of soil loss [24-26]. Gully evolution is caused by deforestation and human land uses, such as old road building, mining and ditch openings as properties' divisions [14,27]. These gullies promote soil degradation and fertility loss [28].

Recovery measures have been taken in Nazareno city and region by the Projeto Maria de Barro (a Nazareno NGO) to reduce the impact of gullies [26]. However, some gullies show signs of destabilization due to reactivation and enlargement by processes such as landslides. A financially and technically viable project for gully reclamation in developing countries, like Brazil, is almost impossible. Even though studies and efforts have been made to mitigate the degradation, interactions between soil properties (macro and micro scales) and land uses remains necessary; studying these are the primary goal of this research. In conjunction with the Maria de Barro NGO, the next goal is to help provide assistance to land management practices (prevention activities) and gully reclamation projects (correction activities) to Nazareno. We observed that some gullies are in a similar situation, for example, in terms of the same environmental conditions (types of soil) and water flow concentration by roads. This paper presents the case study of Cravo Stream gully located at Nazareno city.

1.2. Study area

Nazareno is located in the Southeast of Brazil (Fig.1), in the Campos das Vertentes region (44°61'W, 21°21'S). The

municipality covers an area of 324 km² and the mean level above sea level is 935 m [29]. The Nazareno region can be classified as an environment that is susceptible to soil erosion [29]. There are more than 60 erosion features in the area [27]. Over the last decade, several studies have been made to explain the region's soil erosion [13,25-27,30,31]. These studies showed that soil erosion is accelerated by the combination between environmental fragility and human activity (Table 1).

The region lies in the São Francisco Craton, which was predominantly formed by granite-gneiss territories of between the Archean and the Paleoproterozoic, Archean Greenstone Belts successions and Metasedimentary rocks [32,33]. The study area is located on the Barbacena Greestone Belt, which is limited by granite-gneiss terrains, presented discontinuously. The structures have NE-SW directions that follow regional patterns [34]. There is a shear zone (Lenheiro Shear Zone) near the study area [35].

In terms of soil description, [24,25,36-38] it is noted that well-developed soil (oxisol, or latosol, in Brazil) and granite-gneiss saprolites (Fig. 2) are predominant in the municipality. The well-developed soils in the study area have a granular structure and present gibbsite with high iron (Fe) levels. These characteristics induced an elevated porosity and permeability. On the other hand, granite-gneiss saprolites are predominantly caulinitic, presenting a block structure; these characteristics induced low



Figure 1. Located in Nazareno, Minas Gerais (Brazil): 69 gully areas in and near the municipality.
Source: The authors.

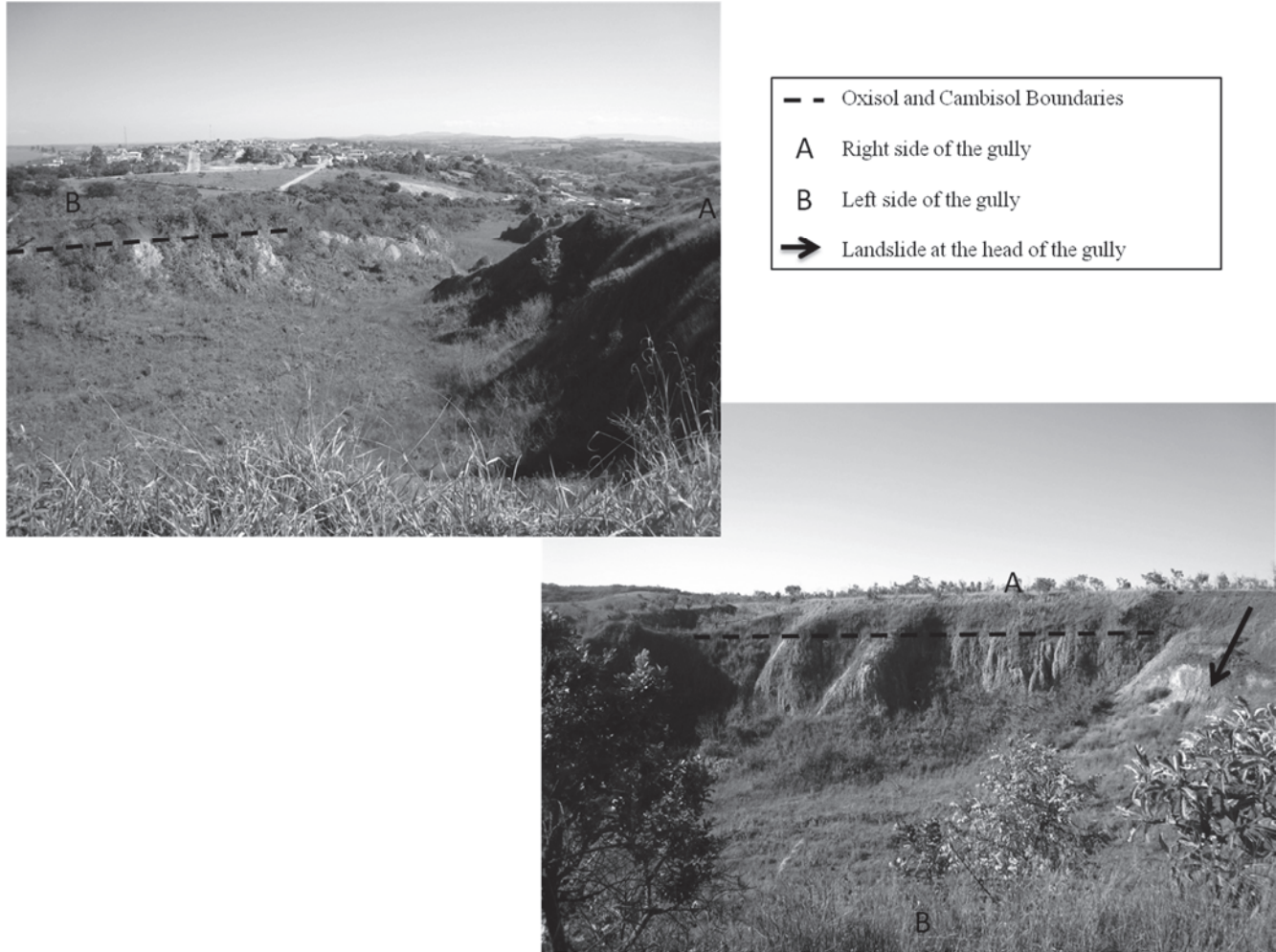


Figure 2. Soil boundaries and landslide inside the Cravo Stream Gully, Nazareno, Minas Gerais (Brazil).
Source: The authors.

porosity and permeability. Saprolites are derived from granite-gneiss, quartzite, micaschists and talc schists, granite-gneiss prevailing [39]. Therefore, there are more gullies in granite-gneiss saprolites (higher relation gully/square kilometer) in the study area [27].

The Nazareno region consists of hills with a convex-concave top and steep slopes, which lie at elevations of between 839 m and 1140 m above sea level. The steepest slopes and the higher elevations are situated in the northeast of the municipality [36-38].

Table 1.
Distribution of land uses areas in Nazareno, Minas Gerais (Brazil).

Description	Area (ha)
Municipality	32,895
Gullies	252
Semideciduous Forest	1563
Field	1814
Eucalyptus	77
Other Land Uses	28,506
Urban Area	118
Lakes and Rivers	803

Source: The authors.

The climate vary from Cwa and Cwb (Köppen classification), with average temperatures ranging from 18 to 22°C in the rainy season and from 15 to 19°C in the dry season. The average precipitation ranges from between 1200 mm and 1500 mm [38].

2. Materials and methods

We used the topographic map (Nazareno, SF-23-X-C-I-2 – 1:50,000) that dated back to 1975, from the Brazilian Geographic and Statistic Institute (IBGE) with GIS software (ArcGIS® - ArcMap), to assess the environmental information at the study area.

Land uses were analyzed at the gully perimeter. Both oxisol (O, well-developed soil) and granite-gneiss saprolite (S) were sampled and taken to the laboratory for physical (tropical soil characterization, soil particle size analyses and erodibility test, based on [40-46] standards) and chemical (pH, delta pH, electric conductivity, Eh, based on [47], organic matter – OM, based on [48], and Cation Exchange Capacity (CEC), based on [46]) experiments at the

Geotechnical Department of São Paulo University – (USP). Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) were also performed at USP's Chemistry Institute – IQSC. This analysis was undertaken to compare the different behaviors of the two types of soil and to connect them to land uses. Some samples were not used in all experiments because it was not possible or easy to obtain them in the field.

3. Results and discussion

Fig. 3 shows the entrance to Cravo Stream gully. An improper drainage system along the compacted road can be seen. Due to this, the speed and the strength of the concentrated flow have been increased, and, the water flows down the road directly inside the gully removing soil particles. This runoff increases the rate of erosion in its end part. We can see, therefore, the importance of constructing a suitable superficial drainage system in terms of land management.

We observed a coffee plantation with a compacted unpaved road without a proper drainage system close to the gully's limits (Fig. 4). The plantation itself, if managed with conservative practices, could even help to reduce erosion, by improving soil cover and infiltration. But, in this case, as Fig. 5 shows, there is another erosion feature inside the plantation area, indicating that conservative practices were not adequately performed. Besides, the unpaved road also contributes to the flow concentration towards the gully.

In 2012, landslides occurred inside the gully [49]. The top left of Fig. 4 shows one of them. We can see that, even with reclamation measures, there is still soil instability, which is associated with water flow.

Fig. 5 also shows two cross sections made with Cravo Stream watershed data. The granite-gneiss saprolite exposure was formed by deforestation, and its removal from subterranean water flow causes the gully slopes to become unstable, thus facilitating landslide processes. Whenever

there is exposure of granite-gneiss saprolite and other parts of well-developed soil, runoff removes them, adding instability to the system. This removal process is slow, and may, therefore, deceive the population about gully's stability.



Figure 3. Cravo Stream Gully entrance, Nazareno, Minas Gerais (Brazil). The compacted road that does not have a proper drainage system can be seen. Source: The authors.

We observed fluting and tunnel erosions (Fig. 6), which shows that the subterranean flow plays an important part as well as runoff on soil removal. The water table varies greatly with rain because it is already exposed. This, combined with the exposure of saprolite, creates instability within slope toes, causing piping and landslides. These complex subterranean water movements contribute to the enlargement of the gully towards its head. Houses were built at the end of the gully (nearby residences – Fig. 6) on erosion susceptible material. Thus, they might be affected by the soil that is removed from the gully and deposited there.

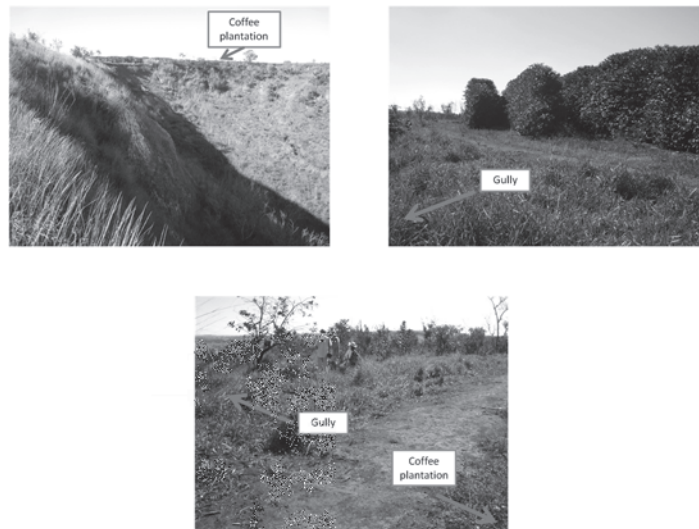


Figure 4. Top left: Coffee planted near the Cravo Stream Gully head and landslide. Top right: Zoom of the coffee plantation and the road surrounding it. Bottom: Unpaved and compacted road without a proper drainage system surrounding the gully and the plantation. Source: a) and b): The authors; c) Adapted from [50].

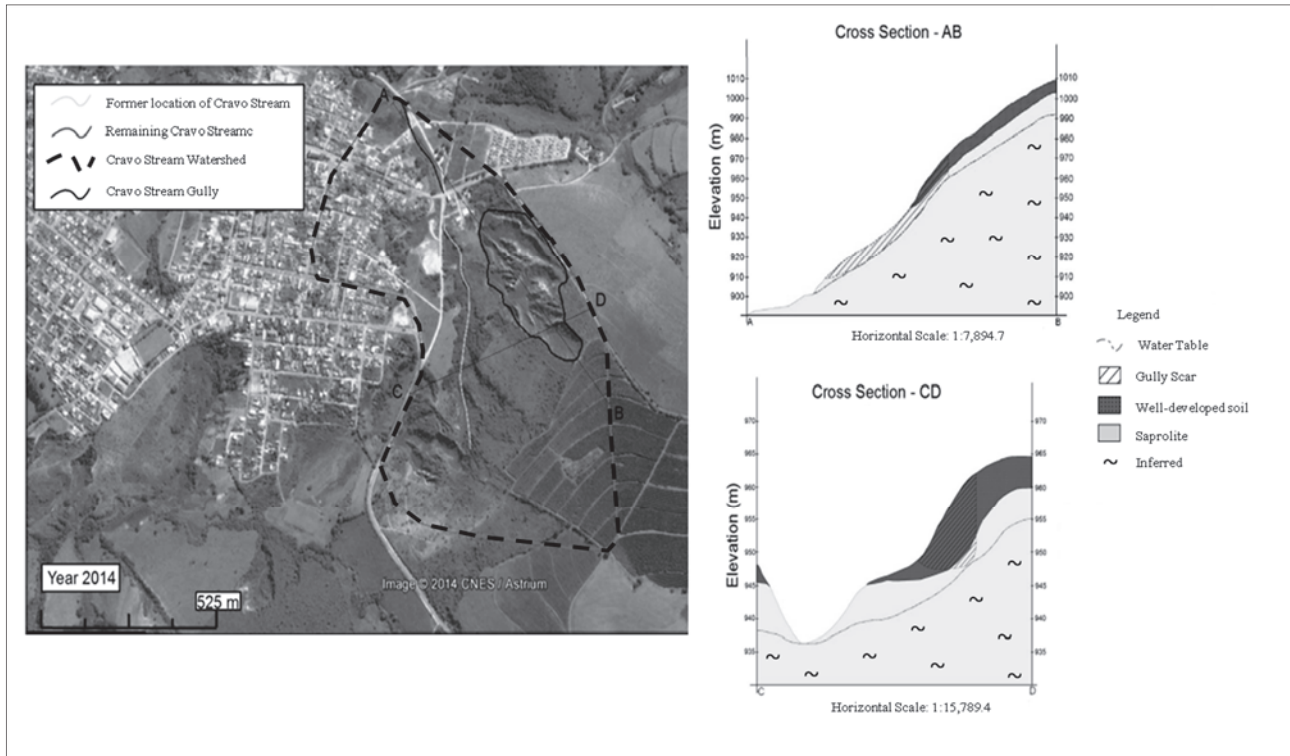


Figure 5. Cravo Stream watershed near the coffee plantation and the Nazareno urban area (Minas Gerais, Brazil); cross sections showing the approximate soil profile of the area and the soil loss caused by the gully.
Source: Adapted from [50].

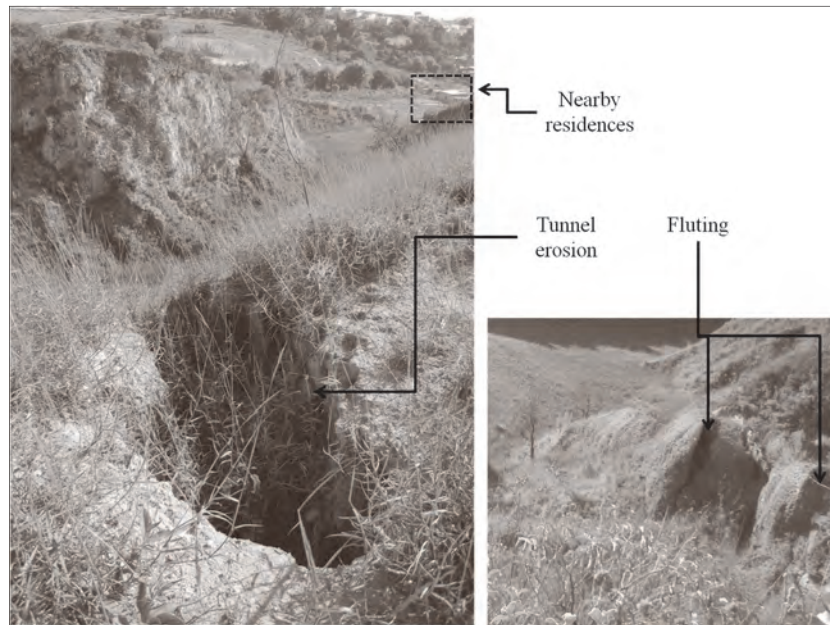


Figure 6. Tunnel erosion in the Cravo Stream Gully. Fluting inside and houses installed close to the end of it.
Source: The authors.

Land uses that do not consider soil properties and its susceptibility to erosion in this region, such as deforestation, mining, urban expansion and road construction without adequate drainage systems, as well as overgrazing exposes the soil. They also alter the drainage conditions of catchments

and accelerate erosion creating gullies [29–31].

Currently, the Cravo Stream gully is surrounded by anthropogenic land uses and erosion features (Figures 5 and 6). This shows an absence of both urban and rural planning. Similar situations can be observed all over the region.

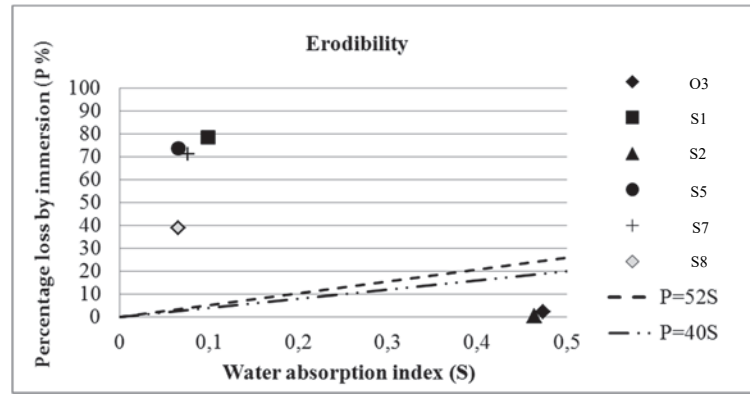


Figure 7. Erodibility experiment with oxisol and granite-gneiss saprolite from the Cravo Stream gully, Nazareno (Minas Gerais, Brazil). Source: [50].

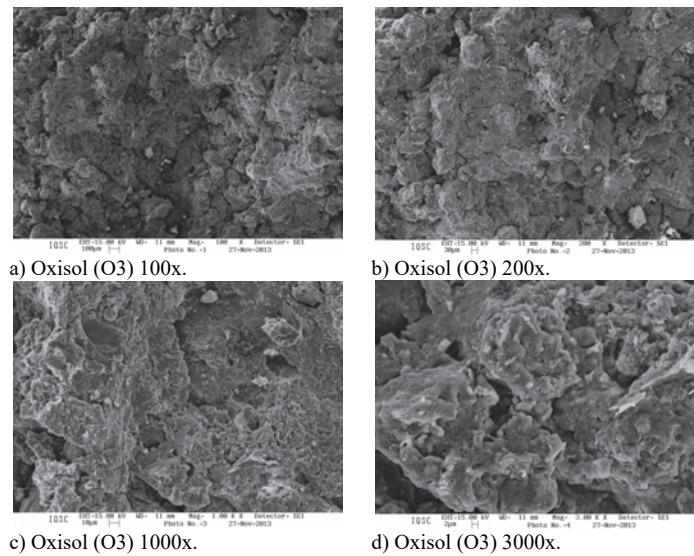


Figure 8. Oxisol (O3) SEM from Cravo Stream gully, Nazareno (Minas Gerais, Brazil). Granular and homogeneous structure that may represent the presence of quartz or lateritic concretions. Source: Adapted from [50].

The well-developed soil (O) and granite-gneiss saprolite (S) samples were analyzed, both in chemical and physical aspects (Table 2). The results show that well-developed soil has 78% fine particles, mostly clay. It may also have lateritic concretions. It has predominantly negative charges and a low electric conductivity (and, therefore, a lower salt concentration) with an oxidant behavior. These characteristics improve soil resistance to removal. The granite-gneiss saprolite shows a non-lateritic behavior of silty sands, which are less cohesive and more susceptible to soil removal than the oxisol. [29] assessed that granite-gneiss saprolite have fine sand and silt, which can promote crusting. As a result, infiltration is reduced and soil particles are removed within rainwater erosive forces. Soil moisture is influenced by texture: clay soils tend to retain water. The average granite-gneiss saprolite's moisture is about 11%, and oxisol's is about 26% [27].

Above the two line criteria (P), we can observe that S1, S5, S7 and S8 are more erodible than the other samples (O3 and S2) (Fig. 7). [39] ascertained that soil losses were

lower in oxisols than in granite-gneiss saprolites; this supports our findings.

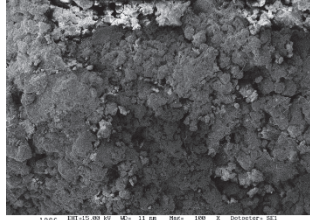
Both well-developed soil (oxisol) and granite-gneiss saprolite present neutral to acid pH, low organic matter (O.M.) and low Cation Exchange Capacity (CEC) (Table 2). These characteristics are limited to vegetation growth on eroded lands [29].

The results from the Scanning Electron Microscopy (SEM) are presented in Figures 8, 9 and 10. The well-developed soil sample (O3) is more homogeneous and its particles are uniformly connected with lateritic concretions. S2 sample, which is the transition of the two types of soil, showed a union of homogeneous particles with some rock weathered parts as S7 keeps weathered mineral structures and kaolinite. We associate the less cohesive structure in the microscopic scale to the susceptibility to erosive behavior of granite-gneiss saprolite. The homogeneous connection between oxisol particles makes them more resistant to soil removal. Fig. 10 shows distinct and sparse particles compared with the

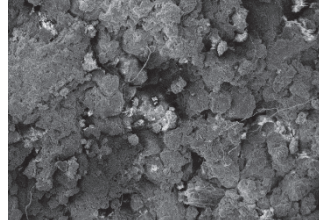
other samples that have mica and kaolinite, which can probably be related to soil removal.

The samples' Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) (Table 3) confirm the weathering evolution that was previously cited. Elements such as aluminum and iron oxides are associated with laterization. [43] noted that lateritic concretions may not be very easy to distinguish from clay clods, and could be linked to magnetite, ilmenite, hematite and quartz minerals.

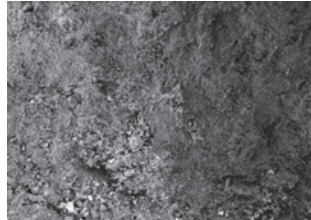
The results showed that certain land uses and the exposure of granite-gneiss saprolite can bring back soil erosion to an area, even if it seems to be stable or if the well-developed soil is above the granite-gneiss saprolite. Despite the fact that well-developed soil is resistant, it can be erodible in intense flow conditions. Soil loss is increased when the increase of runoff is combined with subterranean water flow dynamics. This results in degradation and expansion of the gully area. Under intense rains and when landslides occur inside the gully, this process is accelerated.



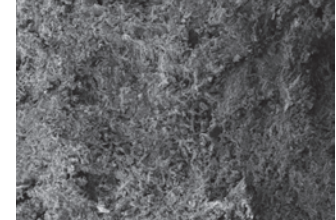
a) Granite-gneiss saprolite (S2) 100x.



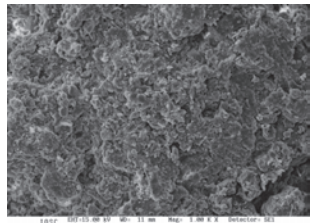
b) Granite-gneiss saprolite (S2) 200x.



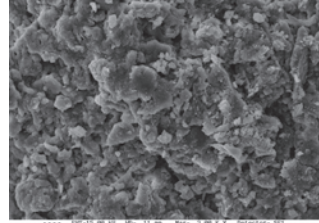
a) Granite-gneiss saprolite (S7) 100x.



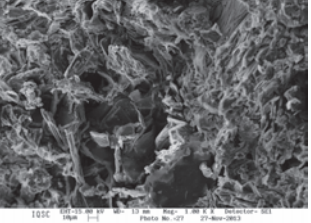
b) Granite-gneiss saprolite (S7) 200x.



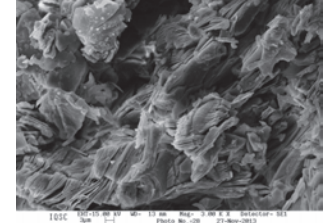
c) Granite-gneiss saprolite (S2) 1000x.



d) Granite-gneiss saprolite (S2) 3000x.



a) Granite-gneiss saprolite (S7) 1000x.



d) Granite-gneiss saprolite (S7) 3000x.

Figure 9. Granite-gneiss saprolite (S2) SEM from the Cravo Stream gully, Nazareno (Minas Gerais, Brazil). Sample from a transitional place (oxisol to granite-gneiss saprolite): granular and homogeneous structure with highly weathered minerals.

Source: Adapted from [50].

Figure 10. Granite-gneiss saprolite (S7) SEM from Cravo Stream gully, Nazareno (Minas Gerais, Brazil). Different and non-homogeneous structure with placoid (micas) and fanfold minerals (kaolinite). Sparse texture.

Source: Adapted from [50].

Table 2.

Experiments with two types of soil in the Cravo Stream gully, Nazareno (Minas Gerais, Brazil).

Sample	Physical Experiments					Chemical Experiments				
	Mini MCV-MCT	Particle Size Distribution	Dry Density ³ (g.cm ⁻³)	pH KCl	pH H ₂ O	ΔpH	Electric Conductivity (μS.cm ⁻¹)	Eh (mV)	OM (g.kg ⁻¹)	CEC (cmol _c .100g ⁻¹)
Oxisol (O1)	LG ¹ 1c': 2.20 2e': 0.89	Clay: 50% Silt: 28% Fine sand: 14% Medium sand: 7% Coarse sand: 1%	2.895	6.4	6.8	-0.4	5.70	+221.00	31.00	2.33
Granite-gneiss saprolite (S7)	NA ¹ c': 0.70 e': 1.17	Clay: 4% Silt: 61% Fine sand: 19% Medium sand: 15% Coarse sand: 1%	2.649	4.6	7.2	-2.6	19.60	+335.00	24.00	1.62

¹ c' – soil shaliness; ² e' – degree of laterization; ³ Temperature: 20°C; ⁴ ΔpH = pH KCl – pH H₂O.

Source: Adapted from [50] and authors.

Table 3.
Semiquantitative EDS from samples of oxisol (O3) and granite-gneiss saprolite (S2 and S7), Nazareno (Minas Gerais, Brazil).

Elements	Percentages (%)		
	O3	S2	S7
O	53,59	54,55	53,58
Al	18,86	21,14	17,36
Fe	15,11	7,99	4,01
Si	11,57	15,35	21,15
Ti	0,86	0,62	0,32
K	-	0,35	3,31
Mg	-	-	0,27
Total	99,99	100,00	100,00

:- Not detected.

Source: [50].

4. Conclusions

The Cravo Stream gully in Nazareno (Minas Gerais, Brazil) shows an example of how microscopic structures and characteristics reflect macroscopic environmental behaviors as well as how land uses could influence and accelerate erosion processes in these soils. The results showed that the well-developed soil (oxisol) is more homogeneous, cohesive and well formed with lateritic behavior; these aspects can enhance soil resistance to erosion. The granite-gneiss saprolite structure has weathered minerals and other elements, such as kaolinite, which is associated with a different stage of formation. It is less cohesive, which may decrease its resistance to erosion. All of this can be connected to its distinct erodibility.

Land use, such as compact roads without a proper drainage system, and rural and urban expansion, are contributing to the acceleration of erosion features by directing runoff to the more erodible and fragile soil (saprolite) and, in some cases, removing resistant soil (oxisol) and exposing the susceptible one. Even if new gullies are not created now, the old ones (such as Cravo Stream gully) may gradually and slowly continue to remove material. Landslides (circular on oxisol and planar on saprolite) and subterranean instability (such as fluting and tunnel erosion) are proof that these features are not stable and are still negatively interacting with land uses.

An appropriate drainage system must be considered in every case (urban and rural areas); water flow should be diverted from the erodible soil. Besides, conservative practices may help to prevent and to mitigate gullies' problems in rural areas. This article can be used as a basis for reclamation projects and land use planning, not only for Nazareno itself, but for other areas in Minas Gerais state that have similar environmental conditions.

Acknowledgements

We would like to thank CAPES and CNPq for their financial support. We would also like to thank the Maria de Barro Project, CRIDES, Vinicius Ferreira and Rogério Ferreira for their assistance.

References

- [1] Lal, R., Soil degradation by erosion. *Land Degradation & Development*, 12(6), pp. 519-539, 2001. DOI: 10.1002/ldr.472.
- [2] Boardman, J., Soil erosion science: Reflections on the limitations of current approaches. *Catena*, 68(2-3), pp. 73-86, 2006. DOI: 10.1016/j.catena.2006.03.007
- [3] Beasley, R.P., *Erosion and sediment pollution control*. Iowa: The Iowa State University Press, 1972.
- [4] Frenzel, A., Medidas preventivas contra os processos erosivos. *Proceedings of Simpósio sobre o controle de erosão*. Curitiba: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), 1980. pp. 201-213.
- [5] Higgins, C.G., Higgins, C.G. and Coates, D.R., Gully development - Groundwater geomorphology: The role of subsurface water in earth-surface processes and landforms. Boulder: Geological Society of America, 1990. pp. 139-155.
- [6] Barrow, C.J., *Land degradation: development and breakdown of terrestrial environments*. Cambridge University Press, 1991.
- [7] Morgan, R.P.C., *Soil erosion and its control*. Nova York: Longman, 1995.
- [8] Grissinger, E.H., *Reclamation of gullies and channel erosion*. - Agassi, M. *Soil erosion, conservation and rehabilitation*. Marcel Dekker Inc. 1996.
- [9] Fendrich, R., Obladen, N.L., Aisse, M.M. e Garcias, C.M., *Drenagem e controle da erosão urbana*. Curitiba: Champagnat, 1997.
- [10] Carrijo, B.R. e Baccaro, C.A.D., Análise sobre a erosão hídrica na área urbana de Uberlândia (MG). *Uberlândia: Caminhos de Geografia* [online], 1(2), pp. 70-83, 2000. Available at: <http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/15254/8555>
- [11] Bertoni, J. and Lombardi-Neto, F., *Conservação do solo*. São Paulo: Editora Ícone, 2005.
- [12] Ide, D.M., *Investigação geotécnica e estudo de um processo erosivo causado por ocupação urbana*. Msc. Thesis, Engineering School of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, São Paulo, Brazil. 2009.
- [13] Ferreira, R.R.M., Ferreira, V.M., Tavares-Filho, J. e Ralisch, R., Origem e evolução de voçorocas em cambissolos da bacia Alto Rio Grande, Minas Gerais. *Proceedings of XXXI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo*, Gramado-RS. 2007. 5P.
- [14] Araujo, G.H.S., Almeida, J.R. e Guerra, A.J.T., *Gestão ambiental de áreas degradadas*. Rio de Janeiro. Bertrand Brasil. 7ª Ed. 2011.
- [15] Rotta, C.M.S. and Zuquette, L.V., Erosion feature reclamation in urban areas: typical unsuccessful examples from Brazil. *Environmental Earth Sciences*, 72(2), pp. 535-555, 2013. DOI: 10.1007/s12665-013-2974-y
- [16] Rotta, C.M.S. e Zuquette, L.V., Processos erosivos. pp. 114 – 151. In: Zuquette, L.V. *Geotecnia Ambiental*. São Paulo. Ed. Campus. 1ª Ed. 2015.
- [17] Haigh, M.J., Ravine erosion and reclamation in India. *Geoforum*, 15(4), pp. 543-561, 1984. DOI: 10.1016/0016-7185(84)90024-1
- [18] Lal, R., Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 17(4), pp. 319-464, 1998. DOI: 10.1016/S0735-2689(98)00363-3
- [19] Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten, G. and Valentin, C., Gully erosion and environmental change: Importance and research needs. *Catena*, 50(2-4), pp. 91-133, 2003. DOI: 10.1016/S0341-8162(02)00143-1
- [20] Valentin, C., Poesen, J. and Li, Y., Gully erosion: Impacts, factors and control. *Catena*, 63(2-3), 2005, pp. 132-153. DOI: 10.1016/j.catena.2005.06.001
- [21] Rodrigues, J.E., *Estudo de fenômenos erosivos acelerados – voçorocas*. PhD. dissertation, Engineering School of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, São Paulo, Brazil. 1982.
- [22] Morgan, R.P.C., *Soil erosion and conservation*. Blackwell Publishing, 2005.
- [23] ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR-10703: *Degradação do solo: Terminologia*. Rio de Janeiro. Brazil. 1989. 45P.
- [24] Silva, A.C., *Relação entre voçorocas e solos na região de Lavras (MG)*. MSc. Thesis, College of Agriculture of Lavras, Minas Gerais, Brazil, 1990.
- [25] Ferreira, V.M., *Voçorocas no município de Nazareno, MG: origem, uso da terra e atributos do solo*. MSc. Thesis, Federal University of Lavras, Minas Gerais, Brazil, 2005.
- [26] Ferreira, R.R.M. e Ferreira, V.M., *Apostila técnica de estabilização de voçorocas*. Projeto Tecendo a Rede Voçorocas, Centro de Regional Integrado de Desenvolvimento Sustentável, Nazareno, Minas Gerais, Brazil, 2009, 20P. Available at: http://api.ning.com/files/ilz8SFkiR-zEjfW1dr4gLUwU6UqXXSOhx*uz9-DmNZp0da06Z-

- e7wIMVSYH*M*z3-noZXHyHuboQ8zM1DIcCh*vaa3H5-
/apostila3revvoorocas.pdf
- [27] Gomide, P.H.O., Silva, M.L.N. e Soares, C.R.F.S., Atributos físicos, químicos e biológicos do solo em ambientes de voçorocas no município de Lavras – MG. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* [online]. 35(2), pp. 567-577, 2011. DOI: 10.1590/S0100-06832011000200026.
- [28] Sampaio, L.F., Oliveira, M.P.P., Rodrigues, V.G.S. and Pejon, O.J., Review of soil degradation in the region of Nazareno, Minas Gerais. *Brazil. in Lollino G. et al. Engineering Geology for Society and Territory – Volume 5, Urban Geology, Sustainable Planning and Landscape Exploitation*, Springer, 2015, pp. 433-437. DOI: 10.1007/978-3-319-09048-1
- [29] Ferreira, V.M., Silva, M.L.N., Curi, N., Oliveira, A.H., Silva, M.A. e Avanzi, J.C., Influência antrópica e atributos de solo: inter-relações em ambientes de voçorocas na mesorregião Campos das Vertentes, MG. *Geografia*, 36(1), pp. 209-219, 2011. Available at: http://www.dcs.ufla.br/site/_adm/upload/file/pdf/Prof%20Marx/Aula%202/Art%20leitura/Ferreira%20et%20al%202011.pdf
- [30] Horta, I.M.F., Levantamento dos solos e ocupação da superfície do município de Nazareno, MG. MSc. Thesis, Federal University of Lavras, Minas Gerais, Brazil, 2006.
- [31] Ferreira, R.R.M., Qualidade física de cambissolos sobre dois materiais de origem com pastagens extensivas. PhD Dissertation, State University of Londrina, Paraná, Brazil, 2008.
- [32] Toledo, C.L.B., Evolução geológica das rochas máficas e ultramáficas na Greenstone Belt Barbacena, região de Nazareno, MG. PhD Dissertation, Institute of Geosciences, State University of Campinas, São Paulo, Brazil, 2002.
- [33] Teixeira, W., Ávila, C.A. e Nunes, L.C., Nd-Sr isotopic geochemistry and U-Pb geochronology of the granitic gneiss and Lajedo granodiorite. *Implications for Paleoproterozoic evolution of the Mineiro belt, southern São Francisco Craton, Brazil*. *Geologia USP Série Científica*, 8(1), pp. 53-74, 2008. Available at: <http://www.igc.usp.br/?id=geologiausp>
- [34] Teixeira, W. and Figueiredo, M.C.H., An outline of Early Proterozoic crustal evolution in the São Francisco craton, Brazil: a review. *Precambrian Research*, 53(1-2), pp. 1-22, 1991. DOI: 10.1016/0301-9268(91)90003-S
- [35] Nunes, L.C., Geocronologia, geoquímica isotópica e litoquímica do plutonismo diorítico-granítico entre Lavras e Conselheiro Lafaiete: implicações para a evolução Paleoproterozóica da parte central do Cinturão Mineiro. MSc. Thesis, Institute of Geosciences, University of São Paulo, São Paulo, Brazil, 2007.
- [36] Baruqui, A.M., Naime, U.J., Motta, P.E.F. e Carvalho-Filho, A., Levantamento de reconhecimento de média intensidade dos solos da Zona Campos das Vertentes - MG. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento*, 96, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Solos), Rio de Janeiro, 2006. 326P.
- [37] Naime, U.J., Motta, P.E.F., Carvalho-Filho, A. e Baruqui, A.M., Avaliação da aptidão agrícola das terras da zona campos das vertentes (2007). Currently she is a professor at the Engineering School of São Carlos, MG. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento*, 91, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Solos), Rio de Janeiro, 2006. 62P.
- [38] Horta, I.M.F., Pereira, J.A.A., Marques, J.J. e Carvalho, L.M.T., Digital reconnaissance soil survey of Nazareno, state of Minas Gerais. *Ciência e Agrotecnologia*, 33(E), pp. 1940-1947, 2009. Available at: <http://www.editora.ufla.br/index.php/revistas/ciencia-e-agrotecnologia/artigos-publicados>
- [39] Silva, A.M., Silva, M.L.N., Curi, N., Lima, J.M., Barreto, V.C.M. e Silva, T.F., Perdas por erosão e erodibilidade de cambissolo e latossolo roxo nas sul de Minas Gerais – Resultados preliminares. *Proceedings of VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão*. Goiânia (GO), 2001, pp. 1-8.
- [40] MT – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER – ME-228/94. Solos – compactação em equipamento miniatura. Available at: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me228-94.pdf>
- [41] MT – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER – ME-258/94. Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV. Available at: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me258-94.pdf>
- [42] MT – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER – ME-256/94. Solos compactados com equipamento miniatura-determinação da perda. Available at: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me256-94.pdf>
- [43] Nogami, J.S. e Villibor, D.F., Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos, Editora Vilibor, 1995.
- [44] ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR-6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro. Brazil. 1984. 8P.
- [45] ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR-7181: Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro. Brazil. 1984. 13P.
- [46] Pejon, O.J., Mapeamento geotécnico da folha de Piracicaba-SP (escala 1:100.000): Estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação dos atributos. PhD Dissertation, Engineering School of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, São Paulo, Brazil. 1992.
- [47] Claessen, M.E., Barreto, W.O., Paula, J.L. e Duarte, M.N., Manual de métodos de análise de solo. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). Centro Nacional de Pesquisa de Solos, Rio de Janeiro, Brazil, 1997. Available at: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Manual+de+Metodos_000fzvhotqk02wx5ok0q43a0ram31wtr.pdf
- [48] Eusterhues, K., Rumpel, C. and Kögel-Knabner, I., Stabilization of soil organic matter isolated via oxidative degradation. *Organic Geochemistry*, 36(11), pp. 1567-1575, 2005. DOI: 10.1016/j.orggeochem.2005.06.010
- [49] Oliveira, M.P.P., Sampaio, L.F., Rodrigues, V.G.S., Ferreira, V.M. e Pejon, O.J., Caracterização preliminar da boçoroca do Córrego do Cravo, Nazareno/MG - Brasil. *Proceedings of: VII Congresso Uruguayo de Geologia*. 2013. pp. 96-100.
- [50] Sampaio, L.F., Geological and geotechnical study of erosive processes and proposition of a macro-drainage system: Córrego do Cravo Gully (Nazareno-MG, Brazil). MSc. Thesis, Engineering School of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, São Paulo, Brazil, 2014.

L.F. Sampaio, She is currently a PhD. student on the Geotechnical Post-graduate Program at the Engineering School of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, São Paulo, Brazil. She undertakes research studies in environmental geotechnics focusing on degraded land reclamation.

M. P. Oliveira, She has an MSc. in Sciences from the Geotechnical Post-graduate Program at the Engineering School of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, São Paulo, Brazil. She is currently working with degraded land and reclamation, environmental education and solid waste management.

R. Cassaro, He is currently an MSc. student on the Geotechnical Post-graduate Program at the São Carlos Engineering School, University of São Paulo, São Carlos, São Paulo, Brazil.

V.G.S. Rodrigues, She has a PhD. in Geosciences (Geochemistry and Geotectonic Post-graduate Program) from the University of São Paulo (University of São Paulo (Geotechnical Department), São Carlos, Brazil. Her research and experience in geosciences focuses on environmental geology and geotechnics.

O.J. Pejon, He has a PhD in Geotechnics from the University of São Paulo (1992). He is currently a professor at the Engineering School of São Carlos, University of São Paulo (Geotechnical Department), São Carlos, Brazil. He has research and experience in civil engineering, focusing on Geotechnics.

J.B. Sígolo, He has a PhD. (1988) in General and Application Geology, which was undertaken on the Post-graduate Program at the Geoscience Institute, University of São Paulo. He is currently a professor at the University of São Paulo, Brazil. He has research and experience in geochemistry and environmental geology.

V.M. Ferreira, He has an MSc. in Soil and Water Conservation from the Federal University of Lavras, Minas Gerais, Brazil. He has worked with gully reclamation since 1999 and is currently the coordinator of the Maria de Barro Project.

Dual arm compressive spectral imaging in the visible and IR range

Yenni Paloma Villa-Acuña^a & Henry Arguello-Fuentes^b

^a Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
yenni.villa@correo.uis.edu.co

^b Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. henarfu@uis.edu.co

Received: June 21th, 2015. Received in revised form: June 03rd, 2016. Accepted: July 21th, 2016.

Abstract

Imaging spectroscopy involves sensing spatial information in a scene across a range of wavelengths in order to acquire a three-dimensional data cube. Spectral images play an important role in science and technology. Some of their applications require image acquisition in both the visible and the infrared ranges in order to detect characteristics that are not noticeable to the bare eye. These can be perceived in lower layers of the scene where the visible radiation does not penetrate. This paper proposes a compressive image acquisition system that reduces the number of optical elements by jointly and compressively acquiring the images in the visible and infrared spectra. It also evaluates whether the quality of the reconstructed images is good enough to consider the optical implementation of the proposed system. Diverse simulations are performed to determine the peak signal to noise ratio (PSNR) of the data cubes as a function of the coded apertures transmittance, the Gaussian noise applied to the measurements and the number of snapshots. The simulations provide PSNR values of up to 33 dB in the reconstructed images.

Keywords: Spectral Imaging; Compressive Sensing; Dual arm; Infrared; Visible.

Sistema dual para muestreo compresivo de imágenes espectrales en el rango visible e infrarrojo

Resumen

La espectroscopia de imágenes involucra el muestreo de la información espacial de un objetivo a lo largo de un conjunto de longitudes de onda, en el que se adquiere un cubo de datos de tres dimensiones, dos de ellas espaciales y una espectral. Las imágenes espectrales juegan un papel importante en muchos campos de la ciencia y la tecnología, algunas de sus aplicaciones exigen la adquisición de la imagen en el espectro visible e infrarrojo, con el fin de detectar características no distinguibles a simple vista, presentes en capas inferiores del objetivo donde la luz visible no alcanza a atravesar. Este trabajo propone un sistema que reduce dichos costos de implementación adquiriendo simultáneamente y de forma comprimida la imagen en el espectro visible e infrarrojo. Además evalúa si la calidad de las imágenes reconstruidas es lo suficientemente buena para considerar su implementación óptica. Se realizaron diversas simulaciones para determinar la relación señal a ruido pico (PSNR, por su sigla en inglés) de los cubos de datos reconstruidos, en función de la transmitancia de los códigos de apertura, el ruido Gaussiano aplicado a las mediciones y el número de capturas. Los valores de PSNR obtenidos alcanzan los 33 dB.

Palabras clave: Imágenes Espectrales; Muestreo Compresivo; Sistema Dual; Infrarrojo; Visible.

1. Introduction

Spectrometers are instruments to measure the intensity or polarization of electromagnetic waves across a wide range of wavelengths, this is known as their spectral signature. Despite spectrometers providing precise spectral information

for a specific spatial point, some applications are more interested in scanning the whole scene, thus involving all spatial points [1]. These instruments are known as spectral imagers as they acquire a scene's spatial (x, y) and spectral (λ) information in a 3D data cube. There are two main classes of spectral imagers, which can be either spectrally or spatially

How to cite: Villa-Acuña, Y. P. & Arguello-Fuentes, H. Dual arm compressive spectral imaging in the visible and IR range DYNA 83 (199) pp. 207-217, 2016

discriminatory. This depends on the dimension of the scan across the remaining 2D to complete the 3D data cube. An example of a spectrally discriminatory instrument is a 2D spatial camera based on bandpass filters [2]. This architecture is used to scan all spectral channels by sequentially tuning the bandwidth in steps. It requires the scene to be completely static during each spectral acquisition in order to acquire the same spatial matrix for every frequency range. The main drawback of this technique is that the number of zones to be scanned increases proportionally to the desired spatial or spectral resolution.

Conversely, in the relatively new compressive spectral imaging (CSI) approach, the detector measures 2D random coded compressed projections. In this, the number of required measurements for the reconstruction is far less than in the linear scanning case. CSI relies on CS principles: sparsity and incoherence [3,4].

The coded aperture snapshot spectral imager (CASSI) is an architecture that effectively applies the CS theory to improve the sensing speed and reduce the large amount of data to far fewer measurements than the ones established by the Nyquist/Shannon theorem. This makes it possible to acquire the entire data cube with just a few focal plane array (FPA) measurements [1-4]. The theoretical background of CASSI is applicable for any region of the electromagnetic spectrum determined by the spectral sensitivity of the optical elements. Therefore, as there is no technology developed in sensitive sensors that applies to such wide frequency ranges to capture images in both visible and infrared spectral bands, it is necessary to use an architecture that separately acquires the information through the appropriate detector. This could be created by using two CASSI systems separately, which results in an expensive system to implement. The dual arm (DA)-CASSI system is an alternative to reduce the implementation costs of the previous solution by jointly catching both ranges' spectral information. This system is proposed in this paper.

Spectral images play a very important role in various areas of science and technology such as: remote sensing [5], agriculture [6] and quality control [7]. Near infrared (NIR) spectroscopy utilizes the spectral information in the range from 780 to 2500 [nm] to provide more complex structural information related to the combination of bonds' vibration. Numerous NIR studies demonstrate that the previous is a non-destructive and rapid technique -in the area of food quality assessment- since it reveals information related to the vibrational behavior of molecular bonds. Therefore, it can give details of the variety of molecules present in food [8]. For this reason, some applications require the image acquisition in both the visible (V) and infrared spectrum (IR) in order to detect characteristics not visible to the bare eye. These can be perceived in lower layers of the scene where the visible radiation does not penetrate [9]. Thus, not only visible but also infrared data is of the utmost interest for these applications. For this reason, the main objective of this paper is to design an optical architecture that allows multiple random projections of images to be acquired in the visible and infrared spectrum. It also includes the theoretical model and the evaluation of the reconstructed quality of the images in order to consider its optical implementation.

This paper is organized as follows: first, the background about CS theory and the multi-shot CASSI system are presented. There is also a brief explanation about system parallelization in order to separately acquire the image in each spectral range. After, the optical-mathematical model for the dual arm CASSI (DA-CASSI) system is presented. Finally, simulations and results to quantitatively compare the performance of the proposed system against two separate CASSI systems are presented.

2. Compressive sensing background

CS effectively reduces the acquisition time and the number of acquired measurements by simultaneously sensing and compressing the data instead of directly sensing the signal and then compressing it in the post processing stage. In this way, the cost of the system is reduced as well as its storage requirements. In order to do so, CS relies on two principles: sparsity and incoherence.

2.1. Sparsity

CS exploits the fact that many natural signals have a more compact representation on a convenient basis [3]. More formally, let $\mathbf{f} \in R^N$ be the signal of interest and, $\mathbf{f} = \Psi\boldsymbol{\theta}$ be the representation of $\mathbf{f}$ on the basis Ψ . We can then say that $\mathbf{f}$ is S -sparse if the orthonormal basis $\Psi \in R^{N \times N}$ sparsifies $\mathbf{f}$, when $\boldsymbol{\theta} = \Psi^T \mathbf{f}$ has only $S \ll N$ non-zero entries, where Ψ^T is the transpose matrix of Ψ . Otherwise, we can say that Ψ compresses $\mathbf{f}$, if the sorted by magnitude entries of $\boldsymbol{\theta}$ decay according to $|\boldsymbol{\theta}(i)| < Ci^{-1/p}$ for any $p \leq 1$, and $C < \infty$. Then, it is said that $\boldsymbol{\theta}$ is S -compressible in Ψ by retaining the S largest coefficients by magnitude and setting the rest to zero [10].

A sparse representation means that the number of non-zero coefficients in $\boldsymbol{\theta}$ is S with $S \ll N$. A compressible representation, on the other hand, means that the coefficient's magnitudes on a given basis, when sorted, have fast power-law decay. Strictly speaking, most signals of interest are not exactly sparse but approximately sparse or compressible on a convenient basis, and the selection of the basis on which the signal is compressible is crucial in order to obtain better reconstruction results. Previous work has proven that the Kronecker product sparsifying basis gives the sparsest spectral images since such matrices act as sparsifying bases that jointly model the structure present in every signal dimension for multidimensional signals [10]. Suppose $\mathbf{F} \in R^{M \times N \times L}$ is a hyperspectral signal, or its vector representation $\mathbf{f} \in R^{MNL}$ is S -sparse on some basis Ψ_{3D} , then $\mathbf{f}$ can be expressed as a linear combination of S vectors of Ψ_{3D} as follows:

$$\mathbf{f} = \Psi_{3D}\boldsymbol{\theta}, \quad (1)$$

where $S \ll MNL$ and Ψ_{3D} is the Kronecker product of three basis $\Psi_1 \otimes \Psi_2 \otimes \Psi_3$. Usually, Ψ_{3D} is set to be the Kronecker product of the 2D-Wavelet symmlet 8 basis (used for the spatial dimensions) and the 1D-DCT basis (for the spectral), such that $\Psi_{3D} = \Psi_{w2D} \otimes \Psi_{DCT}$ [11,12].

2.2. Incoherence

The compressibility of spectral images also depends on how similar the sparsifying and the sensing basis are, which can be quantified by their mutual coherence. Mathematically, the mutual coherence of two orthonormal bases $\Phi \in \mathbb{R}^{N \times N}$ and $\Psi \in \mathbb{R}^{N \times N}$ is defined as the maximum absolute value for the inner product between elements of two bases, as follows:

$$\mu(\Phi, \Psi) = \sqrt{N} \cdot \max_{1 \leq k, j \leq N} |\langle \Phi_k, \Psi_j \rangle|. \quad (2)$$

In this case, Ψ and Φ are the sparsifying and sensing bases, respectively, $\Psi_j(t)$ is the j^{th} column of the representation basis matrix and, $\Phi_k(t)$ is the k^{th} row of the sensing matrix. From eq. (2), if Ψ and Φ contain correlated elements, the coherence is large. Otherwise, it is small. Thus, a lower value of μ indicates lower coherence or better incoherence between the measurement and the sparsifying basis. For CS, smaller mutual coherence values demand fewer measurements to achieve a certain accuracy in the reconstructed signals. For this reason, as random matrices are largely incoherent with any fixed basis Ψ , the selection of an orthobasis Φ uniformly at random promotes CS efficiency [3].

2.3. CASSI background

The CASSI system depicted in Fig. 1 is composed by six optical elements: an objective lens that focuses scene F onto the fixed coded aperture (CA); a set of coded apertures T^ℓ to perform the coding, with $\ell = \{1, \dots, K\}$ and K the total number of shots; a band pass filter that limits the incoming source; a dispersive element S_k to shift the coded field horizontally; and an imaging lens to relay the coded filtered and spectrally sheared field onto the FPA image plane where it is finally integrated over the spectral sensitivity $\Delta\lambda$.

Assuming that all optical elements are ideal, including linear dispersion by the dispersive element, the ℓ^{th} FPA measurement in the (m, n) pixel, $G_{m,n}^\ell$, can be expressed as:

$$G_{m,n}^\ell = \sum_{k=0}^{L-1} F_{m,n-k,k} T_{m,n-k}^\ell + \omega_{m,n}, \quad (3)$$

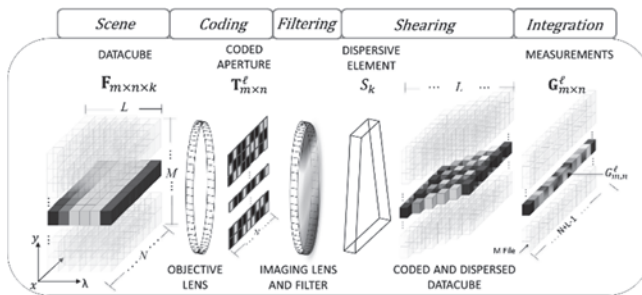


Figure 1. Light propagation through the CASSI system. The input signal F is coded by the CA T^ℓ , filtered and then dispersed by the prism S_k . Finally, the coded and dispersed signal is integrated on the FPA detector. Source: Adapted from [12].

where L is the total number of resolvable bands and ω is the noise present in the system. Let $\mathbf{g}^\ell$ denote the vector representation of the ℓ^{th} FPA measurements $\mathbf{G}^\ell$, which is written in matrix form as $\mathbf{g}^\ell = \mathbf{H}^\ell \mathbf{f}$, where $\mathbf{H}^\ell$ is the transfer function that accounts for the effects of the dispersive element and the ℓ^{th} CA. The set of K FPA measurements can then be assembled as $\mathbf{g} = [(\mathbf{g}^0)^T, \dots, (\mathbf{g}^\ell)^T, \dots, (\mathbf{g}^{K-1})^T]^T$, which, in turn, can be expressed as:

$$\mathbf{g} = \mathbf{H} \mathbf{f} + \omega, \quad (4)$$

where $\mathbf{H} = [(\mathbf{H}^0)^T, \dots, (\mathbf{H}^\ell)^T, \dots, (\mathbf{H}^{K-1})^T]^T$ is the vertical concatenation of the $\mathbf{H}^\ell$ matrices.

The CASSI principles that are described above are general and applicable to imaging in any region of the electromagnetic spectrum that is determined by the spectral sensitivity of all the optical elements. To acquire It is possible to create a scene's spectral information in both visible and IR range by using two CASSI systems separately so that each one acquires the image in a different spectral range. However, in order to reduce implementation costs, an architecture that jointly senses the scene in both ranges and also gives the information separated on the correspondent detector is proposed in the following section.

3. Dual-Arm (DA)-CASSI system.

Fig. 2 depicts the DA-CASSI architecture. It is composed of two arms corresponding to the visible and IR paths. When the impinging light source focused by the objective is coded by the DMD, the coded field is divided and addressed by the beam splitter towards each path. Both arms are composed by a band pass filter that band limits the incoming fields; a dispersive element (usually a prism), which horizontally shears the filtered and coded fields; and the appropriate FPA detector, into which the resulting spectral densities are finally integrated.

3.1. DA-CASSI mathematical model

The light propagation in the optical system begins when the reflected light source is focused by the objective lens into the CA, where the coding is realized by applying $T(x, y)$ to the spatio-spectral density source $f_0(x, y, \lambda)$. This yields $f_1(x, y, \lambda)$

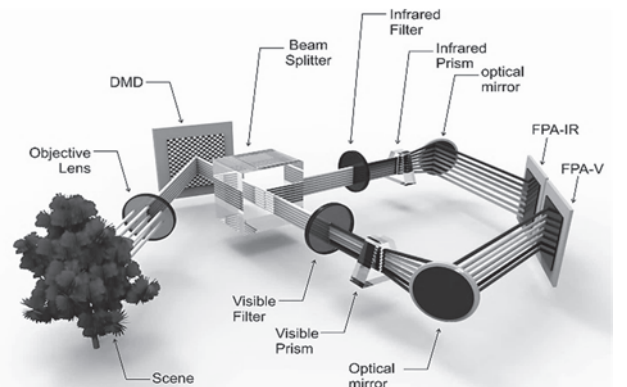


Figure 2. DA-CASSI optical architecture. Source: The authors.

$$f_1(x, y, \lambda) = T(x, y) f_o(x, y, \lambda), \quad (5)$$

where (x, y) are the spatial coordinates and λ is the wavelength of the impinging light. The spectral density $f_1(x, y, \lambda)$ power is equally divided by the beam splitter and sent to the respective arm's filter. In each path, only the wavelengths belonging to that spectral range will pass to the corresponding prism where they will consequently be dispersed. This will result in the following coded fields:

$$f_{2V}(x, y, \lambda) = \iint f_{1V}(x, y, \lambda) h_V(x' - x - S_V(\lambda), y' - y) dx' dy', \quad (6)$$

$$f_{2IR}(x, y, \lambda) = \iint f_{1IR}(x, y, \lambda) h_{IR}(x' - x - S_{IR}(\lambda), y' - y) dx' dy',$$

where h_V and h_{IR} are the optical impulse responses of the system for the visible and infrared systems, respectively, $S_V(\lambda)$ and $S_{IR}(\lambda)$ are the dispersion functions induced by the prisms and corresponding to each spectral range. Finally, $f_{1V}(x, y, \lambda)$ and $f_{1IR}(x, y, \lambda)$ are the filtered versions of $f_1(x, y, \lambda)$ in the visible and IR respectively.

Every coded and dispersed field is focused by an imaging lens into the respective FPA where they are integrated over the detector's spectral range sensitivity.

$$g_V(x, y) = \int_{\lambda_o}^{\lambda_V} f_{2V}(x, y, \lambda) d\lambda, \quad (7)$$

$$g_{IR}(x, y) = \int_{\lambda_V}^{\lambda_{IR}} f_{2IR}(x, y, \lambda) d\lambda$$

where the primed variables refer to the spatial location before the CA and the non-primed in the FPA.

Assuming that (i), the PSF h_V and h_{IR} are shift invariant; (ii) there is a one-to-one match between coded aperture features and the detectors' pixels and; (iii) supposing idealities in the optical elements, including linear dispersion by the dispersive element, the measurements at the detectors can be expressed as:

$$g_V(x, y) = \int_{\lambda_o}^{\lambda_V} f_o(x - S_V(\lambda), y, \lambda) T(x - S_V(\lambda), y) d\lambda, \quad (8)$$

$$g_{IR}(x, y) = \int_{\lambda_V}^{\lambda_{IR}} f_o(x - S_{IR}(\lambda), y, \lambda) T(x - S_{IR}(\lambda), y) d\lambda.$$

For analysis and computational purposes, the underlying analog phenomenon is discretized such that the spatio-spectral signal $f_o(x, y, \lambda)$ is defined as $\mathbf{F}_{m,n,k}$, and its vector representation is assembled as $\mathbf{f} = [\mathbf{f}_V; \mathbf{f}_{IR}]$, where (n, m) indexes the spatial axes (x, y) and k the spectral axis λ . The discretized coded aperture is represented by $\mathbf{T}$. Assuming that

the visible filter limits the spectral components between $\{\lambda_0 - \lambda_V\}$ and the infrared between $\{\lambda_V - \lambda_{IR}\}$, the total number of resolvable bands L is limited by $L_V = \frac{\lambda_V - \lambda_0}{N_V}$ and $L_{IR} = \frac{\lambda_{IR} - \lambda_V}{N_{IR}}$, where the spectral resolution is given by N_V and N_{IR} . Fig. 3 depicts the discretized model of the light propagation through the DA-CASSI system.

According to Fig. 3, the discretized output in each detector is modeled as the independent sum of the underlying spectral voxel slices that are modulated by the same coded aperture $\mathbf{T}$ and dispersed by the corresponding prism.

More strictly, the two FPA measurements in m, n for each detector can be expressed as:

$$(G_V)_{m,n} = \sum_{k=0}^{L_V-1} (F_V)_{m,n-k,k} T_{m,n-k} + (\omega)_{m,n}, \quad (9)$$

$$(G_{IR})_{m,n} = \sum_{k=L_V}^{L_{IR}-1} (F_{IR})_{m,n-k,k} T_{m,n-k} + (\omega)_{m,n}.$$

In matrix form, eq. (9) can be expressed as eq. (4); however, the structure of the sensing matrix is represented as a diagonal matrix where the first sub matrix corresponds to the visible spectrum H_V and the second to the infrared H_{IR} , as follows:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{g}_V \\ \mathbf{g}_{IR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_V & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{H}_{IR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{f}_V \\ \mathbf{f}_{IR} \end{bmatrix} + \boldsymbol{\omega} \quad (10)$$

An example of the sensing matrix $\mathbf{H}$ is illustrated in Fig. 4. This matrix has a diagonal pattern where the circled diagonal vectors repeating horizontally correspond to the distribution of the coded aperture used for both the visible (top left) and infrared (bottom right) ranges.

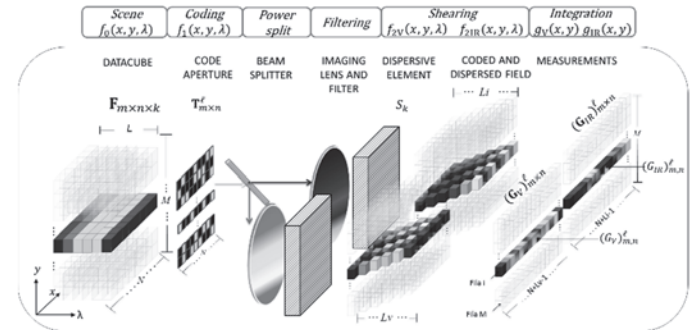


Figure 3. Light propagation through the DA-CASSI. The input signal $\mathbf{F}$ is coded by the CA, $\mathbf{T}^e$; the resulting field power is equally divided by the beam splitter and sent to both arms, where it will be filtered and then dispersed by the prism S_k . Finally, each coded and dispersed field is integrated into the respective detector.

Source: The authors.

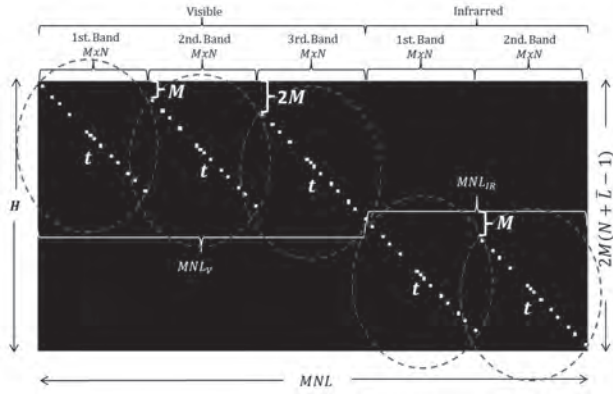


Figure 4. Single shot sensing matrix H example for $M = 4$, $N = 8$, $L_V = 3$ and $L_{IR} = 2$. Black squares represent zero-valued elements (blocking light) and the white squares represent one value elements. Notice that the coded aperture t , is the same for the visible and infrared range.
Source: The authors.

In order to increase the number of compressive measurements when spectrally rich or very detailed spatial scenes are sensed, the multi-shot DA-CASSI allows multiple FPA measurements [11] to be acquired, each using a different CA during the integration time of the detector. This can be accomplished in two different ways: a) by moving a printed thin-film-based CA [13] back and forth using a high precision piezo-electric device to accurately perform the nanoposition realignment procedure (which significantly increases the system costs), or b) by using a DMD-based CA [14] that takes advantage of its tilting capabilities to address or deflect the impinging source light to the objective without requiring realignment. Therefore, the DMD-based CA becomes the best practical implementation since it offers a more robust, accurate and reliable multi-shot modulation system at a reduced cost [12].

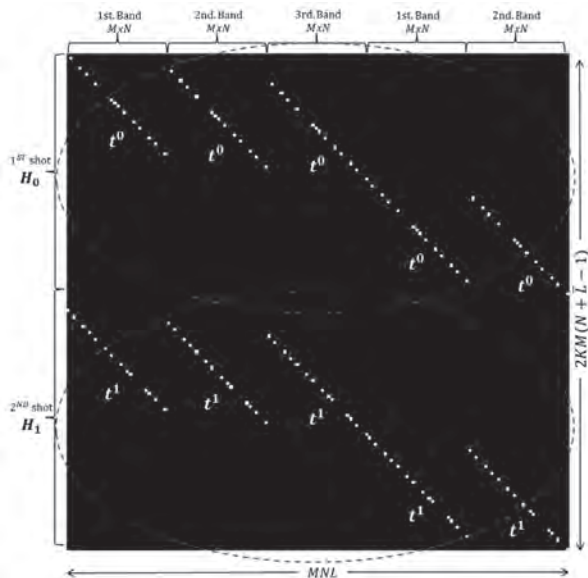


Figure 5. Multi-shot H matrix example for $K = 2$, $M = 4$, $N = 8$, $L_V = 3$ and $L_{IR} = 2$. Each circle pattern corresponds to every snapshot taken. Notice that t^0 and t^1 are the vector representations of the code apertures T^0 and T^1 respectively.
Source: The authors.

The H matrix for the multi-shot DA-CASSI system can also be expressed as in the conventional CASSI, eq. (4), since the modification is implicit for every $H^\ell = [H_V^\ell \ 0; 0 \ H_{IR}^\ell]$. Fig. 5 shows an example of a multi-shot $H = [(H^0)^T \dots (H^\ell)^T \dots (H^K)^T]$ matrix for $M=4$, $N=8$, $K=2$ and $L=5$. In this matrix, three bands for the visible and two for the infrared range are used. The upper half of this matrix corresponds to the first shot and the lower half matrix accounts for the second.

Finally, the multi-shot vector of measurements is given by the following expression:

$$\begin{bmatrix} g^0 \\ \vdots \\ g^\ell \\ \vdots \\ g^{K-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H^0 \\ \vdots \\ H^\ell \\ \vdots \\ H^{K-1} \end{bmatrix} f + \omega. \quad (11)$$

It can be noticed that the H matrix in eq. (11) is sparse and highly structured. Each row contains at most $L_V + L_{IR}$ non-zero elements, and each column contains up to K non-zero elements.

The non-linear dispersion curve of the prisms and other elements such as the imaging or objective lenses, the spectral response of the camera and the coded apertures might be considered ideal mathematically as long as a prior calibration process is conducted in order to partially mitigate all the deviations from the ideal characteristics assumed.

As shown in Fig. 2, the source light splits after the modulation undertaken by the DMD. For this reason, the DA-CASSI does not require an objective lens and a DMD as two CASSI systems are used simultaneously in parallel for the same purpose. This significantly reduces the total costs of the proposed system. Notice that the f_V and f_{IR} images are implicitly aligned in the DA-CASSI, whereas the separate CASSI systems need to be aligned to acquire the same spatial matrix.

3.2. DA-CASSI Reconstruction Process

As the number of voxels (columns of H) is greater than the number of detector pixels (rows of H) obtained, the system of linear equations represented by H becomes under-determined or ill-conditioned, hence direct inversion of the transfer function H^{-1} is unfeasible. However, several numerical algorithms have been designed to solve these kinds of convex unconstrained optimization problems. The gradient projection for the sparse reconstruction (GPSR) is one such example, and it is employed to obtain an approximation $\hat{f}$ of the original data cube f . This provides a good trade-off between computational complexity and reconstruction quality. The complexity per GPSR iteration is better explained in [15].

The set of measurements acquired by the FPA g is used as an input to the GPSR algorithm, and the reconstruction is attained by solving the optimization problem:

$$\hat{\mathbf{f}} = \Psi^T \left(\underset{\boldsymbol{\theta}}{\operatorname{argmin}} \|\mathbf{H}\Psi\boldsymbol{\theta} - \mathbf{g}\|_2^2 + \tau \|\boldsymbol{\theta}\|_1 \right), \quad (12)$$

where τ is a regularization constant, $\mathbf{H}$ is the sensing matrix in eq. (10), $\boldsymbol{\theta}$ is a sparse representation of $\mathbf{f}$ on basis Ψ and the ℓ_1 minimization norm turns small components of $\boldsymbol{\theta}$ to zero and helps to boost sparse solutions. As the GPSR finds a sparse representation of the original data cube in the given basis Ψ , to obtain $\hat{\mathbf{f}}$ from the coefficients given by the GPSR, they must be returned to their original domain by applying Ψ^T .

Notice that the DA-CASSI reconstruction process uses $2KM(N + \bar{L} - 1)$ measurements per iteration to recover $\mathbf{f}$, compared with the parallelized CASSI systems where only $KM(N + L_V - 1)$ or $KM(N + L_{IR} - 1)$ measurements are employed to separately obtain $\mathbf{f}_V$ and $\mathbf{f}_{IR}$ respectively.

4. Coded apertures design, compression ratio and Gaussian noise

The design of the coded aperture used to modulate the source light plays an important role in the reconstructed signal quality since this sets up the spatial modulation. Traditionally, the coded apertures employed in the CASSI system include Boolean [11,13], Bernoulli [12] and gray scaled [16] codes designed randomly [11-13], or they follow a Hadamard structure [11,16]. However, a recent work developed in order to enrich coding strategies proposed the use of colored coded apertures. This would replace the block-unblock photomasks with patterned optical filter arrays as a combination of low-pass, high-pass and band-pass filters so that every pixel from the coded aperture only allows a desired set of wavelengths to pass. This permits the modulation of the scene, not only spatially but also spectrally [12]. When developing this work, we used Boolean random coded apertures in order to employ every pixel of the coded aperture, $T_{m,n}^\ell \in \{0,1\}$, with $T_{m,n}^\ell = 1$ representing a transmissive code element and $T_{m,n}^\ell = 0$ a blocking code element. The transmittance ξ of the coded aperture is defined as:

$$\xi = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \frac{T_{m,n}^\ell}{MN}, \quad (13)$$

where MN represents the size of the coded aperture. Fig. 6 represents the transmittance concept. The pattern in Fig. 6a is blocking a greater number of pixels (a smaller transmittance) than that in Fig. 6c.

In addition to the transmittance, another important variable to analyze is the number of captured snapshots K [4, 11-14]. The compression ratio is the relation between the number of measurements acquired and the size of the spectral image to recover. As such, the compression ratio ρ can be expressed as a linear function of the number of shots K in the following way:

$$\rho = \frac{K(2M(N + \bar{L} - 1))}{(MNL)}, \quad (14)$$

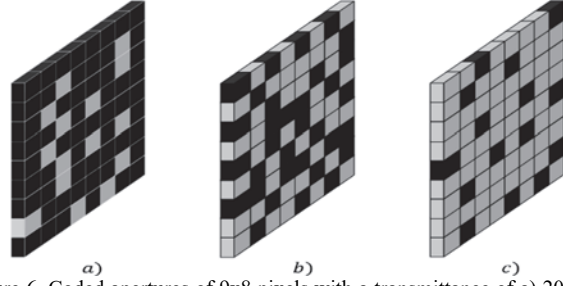


Figure 6. Coded apertures of 9x8 pixels with a transmittance of a) 20%. b) 50%. c) 80%. The block squares represent blocking elements whilst white squares permit the light to go through. Source: The authors.

where $\bar{L}$ is the average between the number of visible and infrared bands.

In any real application, the measurements acquired are corrupted by at least a small amount of noise as sensing devices do not have infinite precision. In order to analyze the impact caused by different amounts of sensor noise, zero-mean Gaussian noise ω was added to the set of FPA measurements $\mathbf{g}$, as in eq. (11). The variance of the noise is selected so we achieved a desired signal to noise ratio (SNR). The SNR can be expressed as:

$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \left(\frac{\sigma_g^2}{\sigma_n^2} \right), \quad (15)$$

where σ_g^2 is the variance of the FPA measurement set $\mathbf{g}$, and σ_n^2 is the variance of the noise.

5. Computer simulations and results

Diverse simulations were performed using two hyperspectral data cubes that were acquired with the AVIRIS sensor [17]. The selected scenes were found in AVIRIS' official website: Moffet and Salinas fields. Both hyperspectral images were acquired between 400 to 2500 [nm], and contained 224 spectral reflectance bands. For each of the scenes' bands, the data was rescaled so that only 128x128 pixels are used due to the restriction of using only dyadic numbers that were required for the fast implementation of the 2-D wavelet transform. Furthermore, once the water absorption bands were removed, the remaining bands were linearly averaged so that the final data had 8 bands for the visible range and 8 bands for the IR.

For the first data set, the Moffet field aerial view, contains 16 classes of agricultural components such as corn, oats, wheat, woods, grass, etc. The original spatial resolution is 1924x753 pixels. The number of bands was reduced to 190 by removing bands covering the water absorption region: {1328.125 nm – 1440.625 nm}, {1487.500 nm – 1515.625 nm} and {1834.375 nm – 1984.375 nm}. An RGB representation of this database is presented in the upper left of Fig. 7. Here, the eight visible spectral bands are represented with their corresponding wavelength by using false color, and the remaining eight bands belonging to the

IR spectrum on gray scale.

The second spectral image was acquired over “Salinas Valley”, California. The original image size in pixels is 512x217, and, as in the “Moffet Field” data cube, 36 water absorption bands were discarded from the 224 original ones. However, in this case, the removed bands were: {400.000 nm – 428.125 nm}, {1393.750 nm – 1478.125 nm}, {1815.625 nm – 1975 nm} and {2462.500 nm – 2490.625 nm}. This scene includes vegetables, bare soils, and vineyard fields, as shown in Fig. 8.

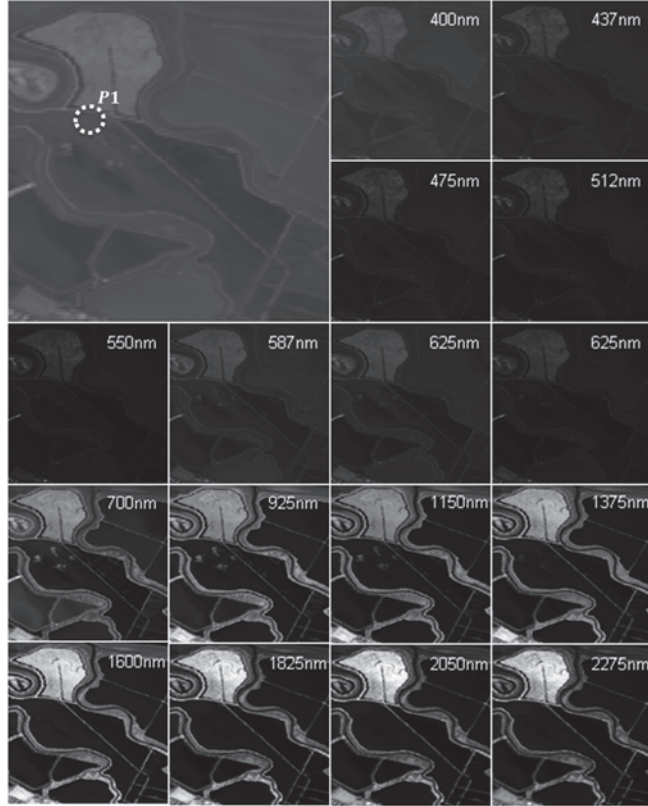


Figure 7. Spectral bands of “Moffet field” data cube with wavelengths ranging from 400 nm to 2275 nm. Each spectral slice has a spatial resolution of 128x128 pixels (Database 1).

Source: The authors.

The following section is divided into two subsections: in the first, the goal is to compare the sparsity of the spectral images when their visible and IR spectral band sets are separately and jointly sparsified. In the second, the analysis pretends to determine the performance of the proposed system in contrast with the parallelized CASSI systems.

5.1. Power analysis of the sparse representations

The objective of this experiment is to understand if the infrared extra content provides valuable information that increases sparsity in the images when the whole data cube $\mathbf{f}$ is represented by the sparsifying basis Ψ_{3D} . The energy contained in the jointly transformed $\boldsymbol{\theta} = \Psi_{3D}^{-1}\mathbf{f}$ is compared with the sorted vector's energy in coefficients $\hat{\boldsymbol{\theta}} = [\boldsymbol{\theta}_V; \boldsymbol{\theta}_{IR}]$, where $\boldsymbol{\theta}_V = \Psi_{3D}^{-1}\mathbf{f}_V$ and $\boldsymbol{\theta}_{IR} = \Psi_{3D}^{-1}\mathbf{f}_{IR}$ are transformed separately.

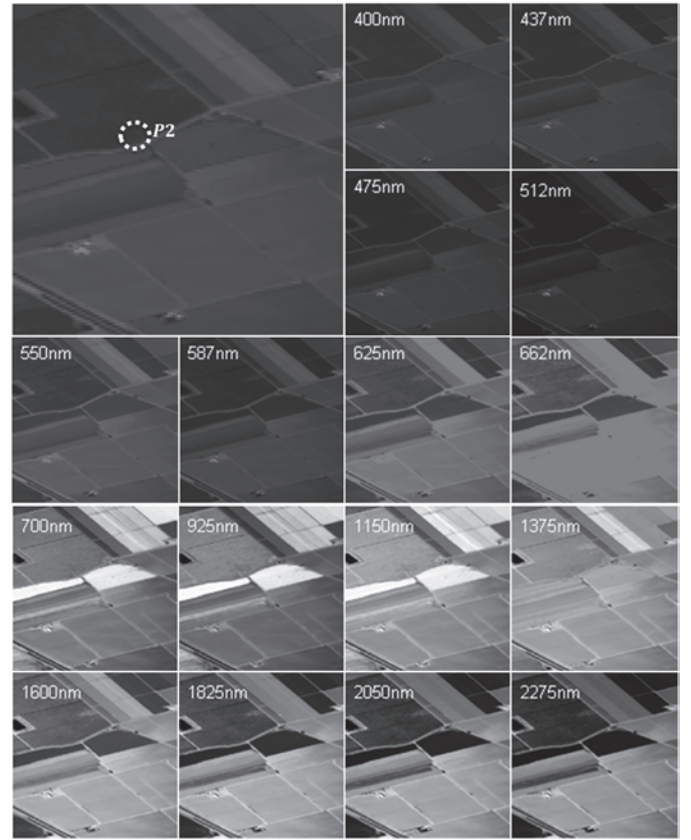


Figure 8. Spectral bands of “Salinas” data cube with wavelengths ranging from 400 nm to 2275 nm. Each spectral slice has a spatial resolution of 128x128 pixels (Database 2).

Source: The authors.

In order to do this, we compare the percentage of energy content as a function of the number of coefficients for $\boldsymbol{\theta}$ and $\hat{\boldsymbol{\theta}}$. A zoomed version for the first 25 coefficients is shown in Fig. 9. It can be noticed that in Database 2 (Fig. 9 right) $\boldsymbol{\theta}$ has a sharper growth rate since more than 80% of the energy is contained in the first 5 coefficients compared with 60% achieved in the separated approach. Conversely, in the first Database (Fig. 9 left), $\boldsymbol{\theta}$ is less sparse compared with $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ since it has a slower power growth. It is important to take into account that regardless of the approach used to obtain the sparse representation, the total energy of each database must add up to the same value for both cases. The difference lies in the energy distribution among the coefficients.

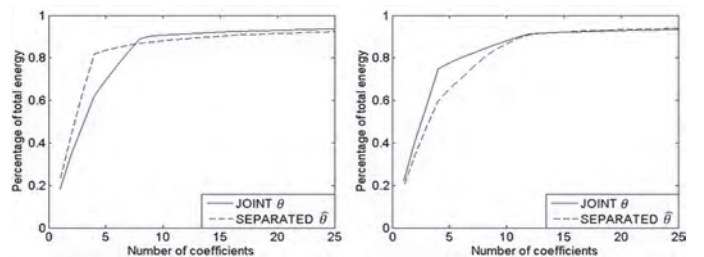


Figure 9. Comparison percentage of energy contained as a function of the number of coefficients for (a) Moffet field and (b) Salinas databases.

Source: The authors.

Under the assumption that the sparsity of the signal is highly related to the correlation between all the bands, a correlation analysis was undertaken, and the resulting 16x16 matrices are presented in Fig. 10. It can be observed that, as expected, Database 2 (right) presents a high correlation between all the visible bands. These, in turn, highly correlate with the latest infrared bands. Thus, the more correlated the bands of the data cube are, the greater the sparsity that is achieved.

5.2. Reconstruction of the spectral images

Diverse simulations were performed in order to determine the best Peak-Signal-to-Noise-Ratio (PSNR) of the reconstructed data cubes as a function of the transmittance, the compression ratio and the Gaussian noise applied to the measurements. In this section, the performance of the proposed DA-CASSI system and the conventional CASSI are compared by reconstructing of both databases.

To compare the performance of the DA-CASSI model with the traditional CASSI model, two different analyses were proposed. The first experiment focuses on the impact of two important factors, the coded aperture transmittance ξ and the number of snapshots taken (as a function of ρ); the second refers to the noise analysis for the best results obtained in the first part. For both analyses, the regularization parameter τ has been carefully selected so that optimum results are obtained; each experiment was repeated five times for every case, and the results were averaged. Finally, all simulations were conducted and timed using an Intel Core i7 3960x3.3 GHz processor with a 32 GB RAM memory.

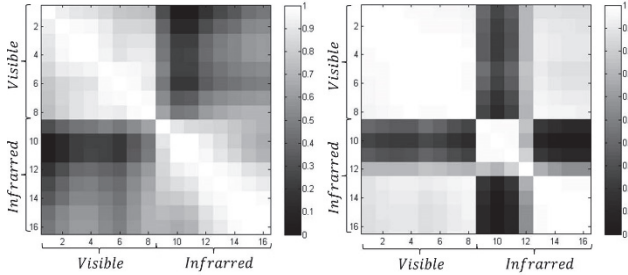
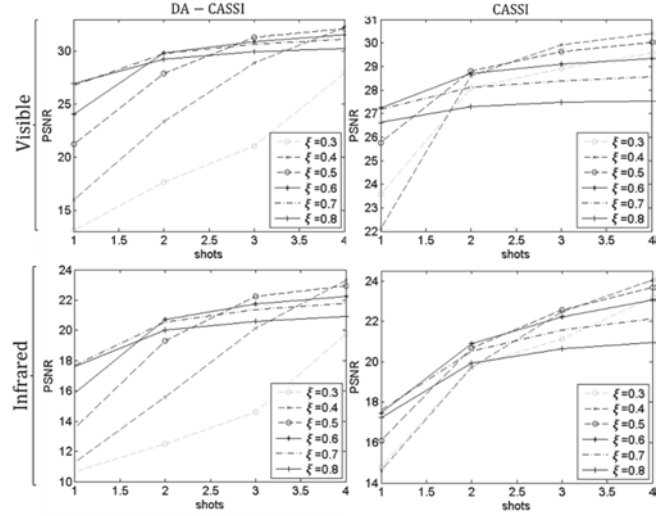


Figure 10. Correlation matrix for (a) Moffet field and (b) Salinas databases. Source: The authors.

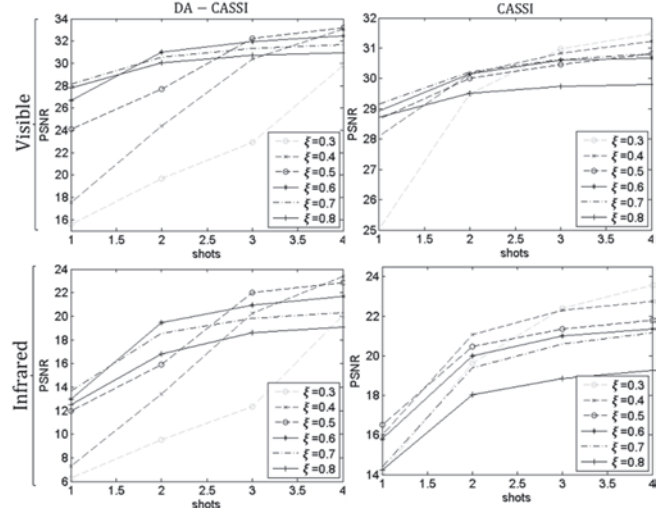
5.2.1. Optimal parameters analysis

In order to analyze the effect of the transmittance, we used several values of $\xi \in \{0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8\}$. Transmittances above 0.8 are not analyzed given that they need to be solved by an extremely ill-posed inverse problem. Additionally, transmittances below 0.3 are also discarded due to their extremely low light efficiency [12]. In order to analyze the effect of the number of snapshots, we either varied K from 1 to 4 or we made the compression ratio $\rho = 13.18, 26.37, 39.55$ and 52.73%.

Fig. 11 manifests the reconstruction results obtained in the transmittance analysis at a different number of snapshots for both databases using the traditional CASSI and the proposed



(a) Database 2. (Top-left) Visible using DA-CASSI, (Top-right) IR using DA-CASSI, (Bottom-left) visible using CASSI (Bottom-right) IR using CASSI.



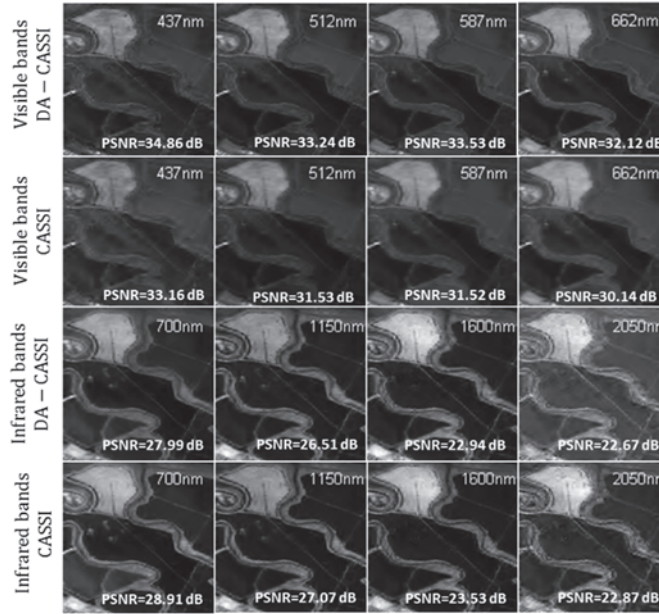
(b) Database 2. (Top-left) Visible using DA-CASSI, (Top-right) IR using DA-CASSI, (Bottom-left) Visible using CASSI (Bottom-right) IR using CASSI.

Figure 11. Impact of the transmittance ξ in the PSNR of the reconstructed images as a function of the number of snapshots K for (a) Moffet field and (b) Salinas data cubes. Source: The authors

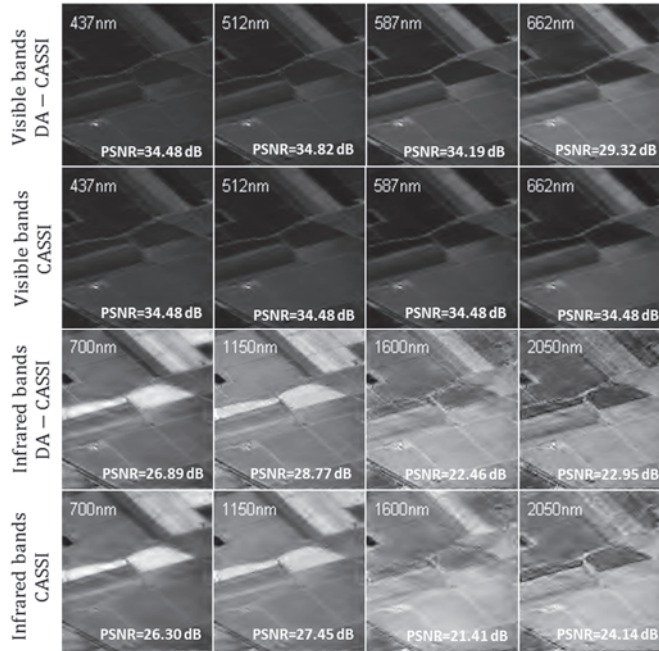
DA-CASSI. It can be observed that for a given ξ , and regardless of the database used, the reconstructed PSNR values increase as K increases. In addition, it can be noticed that, on average, the best results were always obtained for transmittances between 0.4 and 0.7.

A more detailed comparison can be quantitatively undertaken by analyzing Table 1, in which the averaged PSNR of the reconstructed data cubes are presented as a function of the optimal transmittance value for each number of shots.

From Table 1, it can be observed that: (i) as the two databases are the same size, the compression ratio ρ is the same for a given K , and in turn, its optimal transmittance value ξ_{opt} is inversely related to the number of shots; (ii) for



(a) Database 1. Four reconstructed bands from (first row) visible range using DA-CASSI (second row); visible range using CASSI (third row); IR range using DA-CASSI (last row) and IR range using CASSI.



(b) Database 2. Four reconstructed bands from (first row) visible range using DA-CASSI (second row); visible range using CASSI (third row); IR range using DA-CASSI (last row) and IR range using CASSI.

Figure 12. Comparison of the best achieved reconstructed images ($\xi=0.4$ and $\rho=52.73\%$) between CASSI and DA-CASSI for (a) Moffet field and (b) Salinas databases.

Source: The authors.

the visible range, the proposed DA- CASSI model recovers the bands with higher accuracy, yielding to a gain of up to 2 dB when more than 2 FPA shots are used; (iii) as a consequence of the low correlation between the infrared bands, the results

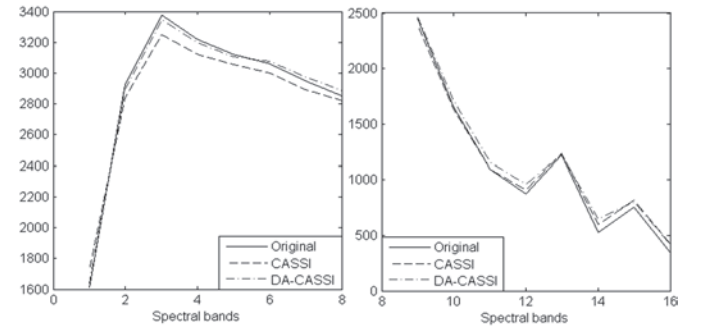
obtained for this range are lower than in the visible range. However, for Database 2, due to the better sparsity boosted by the high correlation presented between the visible and the last four infrared bands, the proposed system is able to surpass the traditional CASSI by up to 1 dB when more than 2 snapshots are used. For both databases, the best results are obtained for $\xi=0.4$ and $\rho=52.73\%$; the reconstructed bands with their corresponding attained PSNR are shown in Fig. 12. In summary, it is possible to asseverate that the improvement achieved in the DA-CASSI, is caused not only by the greater number of measurements used in the reconstruction per iteration compared with the CASSI system, but also by the correlation between the visible and infrared bands that boost the sparsity when this is high. Otherwise, the incoherence does not affect the performance as the sensing and sparsifying basis are the same for both models.

Table 1.

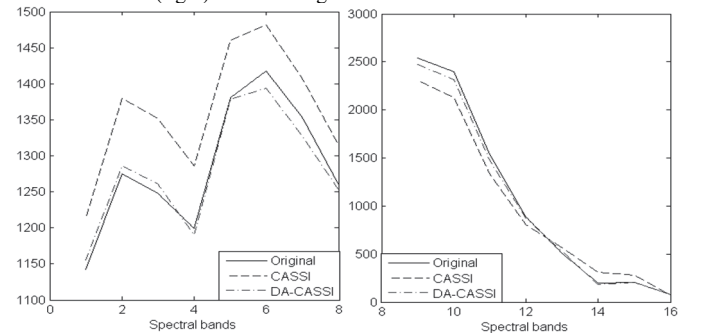
Averaged PSNR of the reconstructed bands for the optimal transmittance values as a function of K

Database	K	ρ (%)	ξ opt	DA-CASSI		CASSI	
				V [dB]	IR [dB]	V [dB]	IR [dB]
No. 1	1	13,18	0.7	26,651	17,651	27,096	17,539
Moffet	2	26.37	0.6	29,839	20,739	28,725	20,941
128x128	3	39.55	0.5	30,297	21,362	29,660	22,442
x16	4	52.73	0.4	32,276	23,337	30,491	23,999
No. 2	1	13,18	0.7	28,092	13,581	29,178	14,447
Salinas	2	26.37	0.6	30,329	18,460	30,150	20,201
128x128	3	39.55	0.5	32,298	21,767	30,564	21,392
X16	4	52.73	0.4	33,221	23,629	31,215	22,814

Source: The authors.



(a) Database 1. Reconstructed signatures of P1 in Fig. 9 for the: (left) Visible and (right) Infrared range.



(b) Database 2. Reconstructed signatures of P1 in Fig. 9 for the: (left) Visible and (right) Infrared range.

Figure 13. Spectral signatures of P1 and P2 for $\xi=0.4$, $\rho=52.73\%$. (a) Database 1. (b) Database 2. Source: The authors.

Table 2.

Averaged PSNR of the reconstructed bands for $\xi=0.4$ and $\rho=52.73\%$ as a function of the SNR noise.

Database	$\rho(\%)$	SN R [dB]	DA-CASSI		CASSI	
			V [dB]	IR [dB]	V [dB]	IR [dB]
No. 1 Moffet 128x128x1 6	52.73	10		17.59		20.83
			28.931	1	29.008	2
		20		21.20		21.10
			32.092	3	30.097	6
		30		21.55		21.42
No. 2 Salinas 128x128x1 6	52.73		32.204	6	30.321	3
		40		23.33	30.424	23.85
				1		4
		10		19.02		20.89
			30.102	1	30.045	7
No. 3 P2 128x128x1 6	52.73	20		22.98		22.33
			33.064	9	30.984	1
		30		23.06		22.43
			33.102	4	31.092	5
		40		23.39	31.213	22.52
No. 4 P1 128x128x1 6	52.73		33.145	9		8

Source: The authors.

In order to analyze the spectral performance, two spatial points were randomly chosen from each database (P1 and P2 in Fig. 7 and Fig. 8 respectively), and their spectral signatures are shown in Fig. 13. It can be observed that the signature reconstructed with the DA-CASSI fits better with the original curve.

5.2.2. Noise analysis

We have shown that the proposed system efficiently recovers the spectral images from just a few measurements, but in order to be truly powerful, it is necessary for the DA-CASSI system to be able to deal with noise. For this reason, the best performed measurements obtained in the analysis were corrupted with five different amounts of noise, and the results were then compared.

Table 2 shows the impact in the PSNR of the reconstructed images (with respect to the SNR) when adding noise to the measurements. As has been shown, the PSNR improves as the signal to noise ratio increases, ranging from 10 to 40 dB. It is worthwhile noting how the reconstruction quality increases as the noise decreases. It should also be noted that in most the cases, the DA-CASSI outperforms the traditional CASSI, even when there is noise present.

6. Conclusions

We have presented a variation of the CASSI system for spectral images in the visible and infrared range. The architecture design, as well as the mathematical model for the single-frame and multi-frame DA-CASSI system, have been proposed. The DA-CASSI system is a possible solution to reduce the implementation costs of such a broad spectrum acquisition system. The improvement achieved in the DA-CASSI is caused not only by the greater number of measurements used in the reconstruction compared with the CASSI system, but also by the correlation between the visible and infrared bands that boost the sparsity when this is high. In general, the PSNR of the reconstructed images with the

proposed model reaches up to 33 dB and 23.32 dB for the visible and infrared bands, respectively.

References

- [1] Arce, G.R., Brady, D.J., Carin, L., Arguello, H. and Kittle, D.S., Compressive coded aperture spectral imaging: an introduction. *IEEE Signal Processing*, 31(1), pp. 105-115, 2014. DOI: 10.1109/MSP.2013.2278763
- [2] Gat, N., Imaging spectroscopy using tunable filters: A review, *Proceedings of SPIE*, pp. 50-64, 2000. DOI: 10.1117/12.381686
- [3] Candès, E.J. and Wakin, M.B., An introduction to compressive sampling. *IEEE Signal Processing Magazine*, 25(2), pp. 21-30, 2008. DOI: 10.1109/MSP.2007.914731
- [4] Ye, P., Arguello, H. and Arce, G.R., Spectral aperture code design for multi-shot compressive spectral imaging, In *Digital Holography and Three-Dimensional Imaging (OSA)*, p. DWA6, 2010. DOI: 10.1364/DH.2010.DWA6
- [5] Shaw, G.A. and Burke, H.H.K., Spectral imaging for remote sensing. *Lincoln Laboratory Journal*, [Online] 14(1), pp. 3-28, 2003. Available at: <https://www.ll.mit.edu/publications/journal/journalarchives14-1.html#1>
- [6] Govender, M., Chetty, K. and Bulcock, H., A review of hyperspectral remote sensing and its application in vegetation and water resource studies. *Water Sa*, 33(2), 2007. DOI: 10.4314/wsa.v33i2.49049
- [7] Gowen, A.A., O'Donnell, C., Cullen, P.J., Downey, G. and Frias, J.M., Hyperspectral imaging—an emerging process analytical tool for food quality and safety control. *Trends in Food Science and Technology*, 18(12), pp. 590-598, 2007. DOI: 10.1016/j.tifs.2007.06.001
- [8] Cen, H. and He, Y., Theory and application of near infrared reflectance spectroscopy in determination of food quality. *Trends in Food Science and Technology*, 18(2), pp. 72-83, 2007. DOI: 10.1016/j.tifs.2006.09.003
- [9] Ding, H.B. and Xu, R.J., Differentiation of beef and kangaroo meat by visible/near-infrared reflectance spectroscopy. *Journal of Food Science*, 64(5), pp. 814-817, 1999. DOI: 10.1111/j.1365-2621.1999.tb15918.x
- [10] Duarte, M.F., and Baraniuk, R.G., Kronecker compressive sensing. *IEEE Transactions on Image Processing*, 21(2), pp. 494-504, 2012. DOI: 10.1109/TIP.2011.2165289
- [11] Arguello, H. and Arce, G.R., Code aperture optimization for spectrally agile compressive imaging. *Journal of the Optical Society of America*, 28(11), pp. 2400-2413, 2011. DOI: 10.1364/JOSAA.28.002400
- [12] Rueda, H., Arguello, H. and Arce, G.R., DMD-based implementation of patterned optical filter arrays for compressive spectral imaging. *Journal of the Optical Society of America*, 32(1), pp. 80-89, 2015. DOI: 10.1364/JOSAA.32.000080
- [13] Kittle, D., Choi, K., Wagadarikar, A. and Brady, D.J., Multiframe image estimation for coded aperture snapshot spectral imagers. *Applied Optics*, 49(36), pp. 6824-6833, 2010. DOI: 10.1364/AO.49.006824
- [14] Wu, Y., Mirza, I.O., Arce, G.R. and Prather, D.W., Development of a digital-micromirror-device-based multishot snapshot spectral imaging system. *Optics Letters*, 36(14), pp. 2692-2694, 2011. DOI: 10.1364/OL.36.002692
- [15] Figueiredo, M., Nowak, R.D. and Wright, S.J., Gradient projection for sparse reconstruction: Application to compressed sensing and other inverse problems. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 1(4), pp. 586-597, 2007. DOI: 10.1109/JSTSP.2007.910281
- [16] Rueda, H., Calderon, A.R. and Arguello, H., Spectral selectivity in compressive spectral imaging based on grayscale coded apertures, *Image Signal Processing and Artificial Vision (STSIVA)*, pp. 1-5, 2013. DOI: 10.1109/STSIVA.2013.6644929
- [17] Green, R.O., Eastwood, M.L., Sarture, C.M., Chrien, T.G., Aronsson, M., Chippendale, B.J. and Williams, O., Imaging spectroscopy and the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS). *Remote Sensing of Environment*, 65(3), pp. 227-248, 1998. DOI: 10.1016/S0034-4257(98)00064-9

Y.P. Villa-Acuña, graduated with a BSc in Electronics Engineering in 2015 from the Universidad Industrial de Santander. Her research interests include digital signal processing, image processing and remote sensing.
ORCID: 0000-0001-7046-4984.

H. Arguello-Fuentes, graduated with a BSc in Electrical Engineering in 2000 and an MSc. in Electrical Power in 2003, both from the Universidad Industrial de Santander, Colombia. He was awarded his PhD in Electrical and Computer Engineering from the University of Delaware, United States. He is an associate professor in the Department of Systems Engineering at the Universidad Industrial de Santander, Colombia. His research interests include compressive sensing, high dimensional signal processing and computational imaging.
ORCID: 0000-0002-2202-253X.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería
Eléctrica e Ingeniería de Control

Oferta de Posgrados

Maestría en Ingeniería - Ingeniería Eléctrica

Mayor información:

E-mail: ingelcontro_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 52 64

The emission index as a parameter for assessing the environmental pollution from thermal power plants. Case study

Nadime Mustafa-Moraes ^a, Ubiratan Holanda-Bezerra ^b, Jorge Laureano Moya-Rodríguez ^c, Jandecy Cabral-Leite ^c

^a Universidade do Estado do Amazonas (UEA). Manaus - Amazonas - Brazil. mustafanadime@gmail.com

^b Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará (ITEC/CEAMAZON/UFPA). Brazil. bira@ufpa.br

^c Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia (ITEGAM). Manaus - Amazonas - Brazil. jorgemoyar@gmail.com,
jandecy.cabral@itegam.org.br

Received: June 18th, 2015. Received in revised form: February 20th, 2016. Accepted: July 21th, 2016.

Abstract

In power plants, in addition to electricity, a lot of air pollution by exhaust gases are generated. There are many national and international standards that establish the permissible limits of different substances, but still has not been developed a mathematical expression to evaluate the environmental impact caused by all components of the exhaust gases as a whole. A method to evaluate this impact is developed in this paper. The developed mathematical expression was called "emission rate". Emission rates for gas engines and fuel oil engines are offered. To get a better idea of the environmental impact of each type of engine was also developed the "specific emission index", which is the emission rate divided by the power delivered by the engine. Comparisons between specific emission rates of different engines are offered by means of a case study in a power plant in the city of Manaus.

Keywords: Pollution, electricity generation, environment.

El índice de emisiones como parámetro para evaluar la contaminación ambiental de las Centrales Térmicas. Estudio de caso

Resumen

En las plantas generadoras de electricidad, además de la energía eléctrica, se generan contaminantes del aire por los gases de escape. Hay normas nacionales e internacionales que establecen los límites permisibles de diferentes sustancias, pero no existe una expresión matemática para evaluar el impacto ambiental producido por todos los componentes de los gases como un todo. En este trabajo se desarrolla un procedimiento para evaluar este impacto. A la expresión matemática desarrollada se le denominó "índice de emisiones". Se ofrecen los índices de emisiones para motores de gas y de Fueloil. Para tener una idea exacta del impacto ambiental de cada tipo de motor se desarrolló también el "índice de emisiones específicas", que es la tasa de emisión dividida por la potencia del motor. Se ofrecen comparaciones entre los índices de emisión específicos de los motores a través de un estudio de caso de una planta generadora de electricidad en la ciudad de Manaus.

Palabras Clave: Contaminación, centrales térmicas, medio ambiente.

1. Introducción

La degradación ambiental, cada vez más acelerada a nivel mundial y los impactos adversos de la generación de energía ha recaudado cada vez más la atención de políticos e investigadores en las últimas décadas. Uno de los principales contribuyentes a la emisión de gases de efecto invernadero

hacia la atmósfera, que a su vez son los responsables del cambio climático, es el uso de combustibles fósiles en las plantas generadoras de electricidad y en los vehículos automotores [1,2].

Una norma de calidad del aire establece legalmente un límite superior para la concentración de determinado componente atmosférico para garantizar la protección de la

How to cite: Mustafa Moraes, N., Holanda Bezerra, U., Moya Rodríguez, J. L. & Cabral Leite, J. El índice de emisiones como parámetro para evaluar la contaminación ambiental de las Centrales Térmicas. Estudio de caso DYNA 83 (199) pp. 218-224, 2016

salud y el bienestar de las personas. Las Normas establecidas se basan en estudios científicos sobre los efectos de los contaminantes específicos sobre la salud y se establecen niveles que puedan propiciar un margen de seguridad adecuado [3,4].

El nivel de polución del aire se mide por la cuantificación de las sustancias poluentes presentes en el mismo. Se considera poluente cualquier sustancia presente en el aire y que por su concentración pueda tornarlo impropio, nocivo u ofensivo a la salud, inconveniente al bienestar público, dañino a los materiales, a la fauna y a la flora o prejudicial a la seguridad y al disfrute de la propiedad y a las actividades normales de la comunidad. Sin embargo, se ha demostrado que una forma efectiva de reducir las emisiones contaminantes es el uso de estrategias operacionales adecuadas para centrales térmicas [5], las cuales se pueden implementar a través de programación de modelos matemáticos, minimizando las emisiones como una función objetivo o considerando límites de emisiones como restricciones. El despacho de carga de una planta generadora de electricidad puede ser formulado como un problema de optimización de un solo objetivo convirtiendo las emisiones en restricciones [6].

La determinación sistemática de la calidad del aire debe ser, por problemas de orden práctico, limitada a un restringido número de poluentes, definidos en función de su importancia y de los recursos materiales y humanos disponibles. De forma general, la selección recae siempre sobre un grupo de poluentes que sirven como indicadores de calidad del aire, establecidos universalmente, entre ellos: dióxido de azufre (SO₂), partículas en suspensión, monóxido de carbono (CO), ozono (O₃) y dióxido de nitrógeno (NO₂). La razón de escoger estos parámetros como indicadores de la calidad del aire está ligada a su mayor frecuencia de ocurrencia y a los efectos adversos que causan al medio ambiente. Para el problema del cambio climático causado por los gases de efecto invernadero, la Unión Europea (UE) introdujo el "Emission Trading Scheme" (ETS), que adopta el mecanismo de mercado "cap-and trade" para el comercio de emisiones de CO₂ [7]. En este régimen, las licencias o permisos de emisión son primero colocados para cada instalación industrial; las instituciones participantes pueden comprar licencias adicionales y/o vender su exceso de emisión al mercado. Por otro lado, algunos países como Finlandia introdujeron el tributo ecológico (Impuesto sobre el carbono), incluyendo el impuesto con base tanto a la cantidad de carbono contenido en el combustible como a la cantidad de emisión de CO₂ [8]. La tasa del impuesto se decide principalmente por la regulación de las autoridades con el doble objetivo de reducir la emisión de CO₂ y la promoción del desarrollo técnico.

Con la introducción de los impuestos del mercado ecológico y de emisiones para el sector de la energía eléctrica, el desarrollo de métodos de toma de decisión en materia de comercio de emisiones, o restricción de las mismas, se está tornando cada vez más importante, y muchos estudios para decidir la programación de los generadores de electricidad se están llevando a cabo [9-11].

Para obtener una solución óptima, compatible tanto o con la economía, como también con el medio ambiente es

importante considerar no solo el nivel de eficiencia de cada unidad de generación, sino también la contaminación que provoca. Sin embargo, la mayoría de los estudios de despacho de carga que incluyen restricciones ambientales, se concentran sobre la solución que maximiza el lucro por unidad de generación, más no las soluciones óptimas de Pareto en la reducción de estas emisiones.

Por eso es importante conocer el menor nivel posible de emisiones de contaminantes tales como el CO₂, el NO₂, el SO₂, etc. de acuerdo a las afectaciones que pueden provocar en la salud humana, basado en las instalaciones de generación existentes. Las soluciones óptimas de Pareto de optimización multiobjetivo del despacho económico y de las emisiones se pueden obtener teniendo en cuenta los precios del combustible y las afectaciones de los gases de escape, para la toma de decisiones económicas y ambientales.

En el presente trabajo se desarrolla un procedimiento para evaluar el impacto ambiental producido por todos los componentes de los gases de escape en una planta generadora de electricidad, a la expresión matemática desarrollada se le denominó "índice de emisiones". El procedimiento fue aplicado a una planta generadora de electricidad de la ciudad de Manaus.

2. Formas de evaluar las emisiones en las plantas de generación de electricidad.

Discusiones exhaustivas de las fuentes, los efectos, y la necesidad de reducir la contaminación atmosférica debido a la generación de energía eléctrica se ofrecen en muchos trabajos de la literatura [12-14]. Por otra parte, la última de estas referencias presenta una descripción detallada de la valoración de las externalidades ambientales, mientras que [15] analiza cuatro métodos básicos de valoración. En [16,17] se tratan los efectos de las externalidades ambientales en las decisiones económicas tomadas en la planificación y las operaciones del sistema de generación de electricidad.

Las emisiones pueden reducirse a través de los siguientes medios:

- Sistemas de limpieza post-combustión, tales como precipitadores electrostáticos (las emisiones de SO_x pueden reducirse mediante la instalación de lavadores de gases). Esto requiere no sólo un tiempo considerable para el diseño, pruebas e instalación, sino también considerable desembolso de capital.
- El cambio a combustibles con bajo potencial de emisiones (las emisiones de SO_x pueden reducirse cambiando permanentemente a un combustible bajo en azufre). El cambio de combustible depende del precio y la disponibilidad de combustible bajo en azufre, tales como el petróleo, gas y carbón de bajo contenido de azufre.
- Realizar un despacho de carga que además minimice las emisiones en lugar de que sea un complemento al objetivo "costo" del despacho de carga tradicional.

La mayor parte del trabajo de investigación realizado hasta el momento se concentra en la reducción de óxidos de azufre (SO_x) y óxidos de nitrógeno (NO_x). El mayor esfuerzo se ha dedicado a la reducción de un tipo de contaminantes o de una mezcla de contaminantes. La tendencia ha sido reducir la producción total de las emisiones

o reducir la concentración de la contaminación a nivel del suelo en ciertas áreas que a su vez, depende de las emisiones y de las condiciones meteorológicas.

La importancia dada actualmente al despacho de carga económico – ambiental se debe en parte a los recientes compromisos de los gobiernos norteamericanos y europeos para mejorar la calidad del aire y otros problemas ambientales [18,19].

2.1. Modelos para evaluar las mediciones.

Entre los temas centrales relacionados con el despacho de carga económico ambiental están los que tienen que ver con modelar con precisión la relación entre la cantidad de cada poluyente y la potencia generada por cada motor, buscando los niveles de concentración de emisiones resultantes en los sitios seleccionados, y las técnicas empleadas para asignar los costos externos a la contaminación.

Hay tres posibilidades para tener en cuenta las emisiones en el despacho de carga:

1. Considerarlas como restricciones dentro del despacho económico [5,20-22]
2. Incluir las con un determinado factor de peso dentro del despacho económico [23-25]
3. Considerarlas como una función objetivo independiente, pero asignarle valores de costo en dinero.

La mayoría de los modelos existentes le asignan un valor en dinero a las emisiones para tenerlas en cuenta como una función objetivo de costo. Algunos autores solo consideran los efectos del SO₂, otros del NO₂ y otros del CO₂ pocos autores consideran todos los efectos en conjunto y cuando lo hacen siempre como se dijo anteriormente es en función de costos. Sin embargo, cuando se trata de contaminación ambiental entran en juego aspectos relacionados con la salud humana que son más importantes que los costos.

3. Contaminantes del medio ambiente considerados en Brasil

Según la CONAMA [3], se consideran poluentes estandarizados en Brasil los siguientes:

- partículas totales en suspensión
- humo
- dióxido de azufre (SO₂);
- partículas inhalables;
- monóxido de carbono (CO);
- ozono (O₃);
- dióxido de nitrógeno.

Los estándares nacionales de la calidad del aire establecidos en la Resolución CONAMA n.3 de 28/06/90 se muestran en la Tabla 1 [3].

4. El índice de emisiones como nuevo parámetro para evaluar la contaminación ambiental producida por los motores de una planta generadora de electricidad

En la mayoría de las plantas productoras de electricidad con motores de combustión interna se usa como combustible el gas natural o el petróleo, siendo diferente el grado de contaminación que producen en dependencia del combustible usado.

Tabla 1.
Normas de calidad del aire en Brasil.

Poluyente	Tiempo de Muestra	Patrón Primario $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ⁽⁴⁾	Patrón Secundario $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ⁽⁴⁾	Método de medición
Partículas Totales en Suspensión	24 horas ⁽¹⁾ MGA ⁽²⁾	240 80	150 60	Mostrador de grandes volúmenes
Dióxido de Azufre	24 horas ⁽¹⁾ MAA ⁽³⁾	365 80	100 40	Pararosanilina
Monóxido de Carbono	1 hora ⁽¹⁾ 8 horas ⁽¹⁾	40.000 (35pmm) 10.000 (9 pmm)	40.000(35 pmm) 10.000 (9 pmm)	Infrarrojo no dispersivo
Ozono	1 hora ⁽¹⁾	160	160	QUIMIOLU MINISCENCIA
Humo	24 horas ⁽¹⁾ MAA ⁽³⁾	150 60	100 40	Reflectancia
Partículas Inhalables	24 horas ⁽¹⁾ MAA ⁽³⁾	150 50	150 50	Separación Inercial Filtración
Dióxido de Nitrógeno	1 hora ⁽¹⁾ MAA ⁽³⁾	320 100	190 100	Quimioluminiscencia

(1) No debe ser excedido más que una vez al año.

(2) Média geométrica anual (MGA).

(3) Média aritmética anual (MAA).

(4) La condición de referencia para las concentraciones es de 25°C y la presión de 760mmHg.

Fuente: [3].

Tabla 2.
Datos para determinar el índice de emisiones de los motores a gas

Poluyente	Patrón primario de la CONAMA $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Peso específico Permisible	Valor de influencia
Partículas totales en suspensión	240	0,00592885	0,99407115
Monóxido de Carbono	40000	0,98814229	0,01185771
Dióxido de Nitrógeno	320	0,00790514	0,99209486
Hidrocarbonatos	160	0,00395257	0,99604743
Total	40480	1	3

Fuente:[3, 4].

4.1. Índice de emisiones de los motores movidos con gas natural.

Para evaluar la polución del medio ambiente provocada por los motores a gas se desarrolló el índice de emisiones de los motores a gas. Para desarrollar la expresión matemática del índice de emisiones se tuvieron en cuenta los límites establecidos de calidad del aire por la CONAMA y se determinó el valor ponderado de cada poluyente dentro de la calidad del aire. Para ello se halló cuanto era el peso específico de cada poluyente de acuerdo a los valores máximos del poluyente en cuestión admitido por la norma, conforme se muestran en la Tabla 2.

Mientras menor sea la cantidad de un poluyente permitido por la CONAMA, mayor será su influencia nociva en el índice de emisiones y por tanto se le asignará un mayor valor de influencia. Se consideró además como valor de influencia de las emisiones de CO₂ a la unidad (1). La expresión para calcular la tasa de emisiones de los motores de gas queda entonces de la siguiente manera:

$$I_{emg} = CO_2 + 0,994MP + 0,0118CO + 0,992NO_2 + 0,996 C_xH_y \quad (1)$$

Como los motores de gas también emiten monóxido de nitrógeno, se decidió incluirlo en la expresión con la misma cantidad de influencia que el NO₂, quedando la expresión como:

$$I_{emg} = CO_2 + 0,994MP + 0,0118CO + 0,992(NO_2 + NO) + 0,996 C_xH_y \quad (2)$$

Para el cálculo de la tasa de emisión o índice de emisiones, los valores de emisión deben estar en el mismo sistema de unidades, siendo necesario llevar a cabo las conversiones de la misma de acuerdo con las empresas que realizan el control de estas emisiones.

La Tabla 3 muestra los valores de emisión en las diferentes unidades que más se usan y los factores de conversión para que todos queden en mg /Nm³.

Para realizar las conversiones fueron tenidos en cuenta los pesos molares de los componentes conforme a los valores y procedimientos siguientes (Tabla 4):

$$mg/m^3 = \frac{ppm \times PM}{24,45} \quad (3)$$

Tabla 3.
Factores de conversión

Parámetro	Unidades iniciales	Multiplicar por	Unidades finales
Partículas (MP)	mg/Nm ³	1	mg /Nm ³
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	mg /Nm ³	1	mg /Nm ³
Monóxido de Nitrógeno (NO)	mg /Nm ³	1	mg /Nm ³
Dióxido de Carbono (CO ₂)	%	18000	mg /Nm ³
Monóxido de Carbono (CO)	ppm	1,25	mg /Nm ³
Hidrocarburos (C _x H _y)	%	17960	mg /Nm ³

Fuente: Los autores.

Tabla 4.
Pesos molares.

Sustancia	Peso molar
C	12g/mol
O ₂	32 g/mol
O	16 g/mol
CO ₂	44 g/mol
CO	28g/mol
N	14g/mol
N ₂	28g/mol
H	1g/mol
Metano CH ₄	16g/mol
Hexano C ₆ H ₁₄	86g/mol

Fuente: Los autores.

Tabla 5.
Emisiones Típicas de los motores a gas

Emisiones típicas de un Motor a gas (UGGN 12)	Valores originales	Valores a 3%mg/m ³
Partículas mg/Nm ³	76,57	76,57
Dióxido de Nitrógeno mg/Nm ³	315,07	315,07
Oxígeno % a mg/Nm ³	12,3	80490,7975
Dióxido de Carbono (CO ₂) % a mg/Nm ³	4,8	86400
Monóxido de Carbono CO ppm a mg/Nm ³	286	327,525562
Monóxido de Nitrógeno mg/Nm ³	105	105
Hidrocarburos (C _x H _y) de ppm a mg/m ³	861,64	1688,8144
Óxidos de Nitrógeno (NO _x como NO ₂) ppm a (mg/Nm ³)	213	400,44

Fuente: Los autores.

Después de usar todos los factores de conversión, la expresión para calcular la tasa de emisión de los motores de gas es la siguiente:

$$I_{emg} = 18000 CO_2 + 0,994MP + 0,0118 * 1,25CO + 0,992(NO_2 + NO) + 0,996 * 17960 C_xH_y \text{ en mg/Nm}^3 \quad (4)$$

En la expresión anterior el CO₂ y los C_xH_y están expresados en %, el CO en ppm y los demás datos en mg /m³.

En la Tabla 5 se ofrecen las emisiones típicas de un motor a gas de una planta generadora de electricidad en las unidades originales en que fueron medidas y después de convertidas.

4.2. Índice de emisiones de los motores movidos con fueloil.

En este caso el procedimiento desarrollado fue el mismo que para los motores a gas, solo teniendo en cuenta las emisiones de este tipo de motores. En las Tablas 6 y 7 se muestran los correspondientes datos y los factores de conversión.

Para el caso de los motores que usan fueloil, el índice de emisiones se calcula como:

$$I_{emHFO} = 1800 \times CO_2 + 0,9941MP + 1,25 \times 0,0265CO + 0,992(NO_2 + NO) + 0,991 SO_2 + 0,9961 * 17960 C_xH_y \text{ em g/Nm}^3 \quad (5)$$

En la Tabla 8 se ofrecen las emisiones típicas de un motor de fueloil, en este caso de la firma MAN.

Tabla 6.
Datos para determinar el índice de emisión de los motores movidos con fueloil

Poluente	Patrón primario de la CONAMA $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Peso específico permisible	Valor de influencia
Partículas totales en suspensión	240	0,0059	0,9941
Monóxido de Carbono	40000	0,9735	0,0265
Dióxido de Nitrógeno	320	0,0078	0,9922
Dióxido de Azufre	365	0,0089	0,9911
Hidrocarburos	160	0,0039	0,9961
TOTAL	41085	1	4

Fuente: Los autores.

Tabla 7.

Factores de conversión en el caso de los motores de fueloil

Parámetro	Unidades iniciales	Multiplicar por	Unidades finales
Partículas (MP)	mg/Nm ³	1	mg /Nm ³
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	mg /Nm ³	1	mg /Nm ³
Monóxido de Nitrógeno (NO)	mg /Nm ³	1	mg /Nm ³
Dióxido de Carbono (CO ₂)	%	18000	mg /Nm ³
Monóxido de Carbono (CO)	ppm	1,25	mg /Nm ³
Dióxido de Azufre	mg/Nm ³	1	mg /Nm ³
Hidrocarburos (C _x H _y)	%	17960	mg /Nm ³

Fuente: Los autores.

Tabla 8.

Emisiones típicas de un motor MAN a fueloil

Emissões Típicas dum Motor MAN (MAN 1)	U originales	a 7% mg/m ³	a 3% mg/m ³
Material Particulado mg/m ³	156,65	156,6	201,407
Dióxido de Enxofre mg/m ³	287,42	287,4	369,54
Oxigênio % a mg/m ³	13,7	179304	230534
Dióxido de Nitrogênio mg/m ³	315,07	315,0	405,09
Dióxido de Carbono (CO ₂) % a mg/m ³	5,5	98977	127256
Monóxido de carbono CO ppm a mg/m ³	66,66	76,33	98,1496
Monóxido de Nitrogênio mg/m ³	1167	1167	1500,42
Óxidos de Nitrogênio (NO _x como NO ₂) (mg/m ₃)	1843	1843	2369,5
Hidrocarbonetos Totais (C _x H _y) de % a (mg/m ₃)	0,03	588	756

Fuente: Los autores.

5. Índice específico de Emisiones

Para evaluar mejor el índice de emisiones es importante tener en cuenta que potencia está generando el motor cuando está teniendo determinadas emisiones; ello permite establecer comparaciones justas entre motores de diferente potencia y usando diferentes combustibles. Para ello se creó el concepto de índice específico de emisiones, que no es más que dividir el índice de emisiones por la potencia suministrada por el motor.

$$I_{espem} = \frac{I_{em}}{P} \quad (7)$$

Dónde:

 I_{em} - Índice de emisiones P - Potencia del motor

6. Índice de emisiones de una planta generadora de electricidad. Estudio de caso

La planta térmica estudiada se encuentra situada en la ciudad de Manaus y tiene una capacidad de generación de 175 mW. Cuenta con motores a gas y motores a fuel oil. Se escogió esa planta por ser una fuente de alta contaminación para la ciudad.

Para analizar la contaminación provocada por la planta analizada fueron analizados los datos de las emisiones gaseosas de los años 2011 y 2012.

Además, para poder comparar las contaminaciones provocadas por los motores a gas con las contaminaciones de los motores que usan fueloil como combustible, tuvieron que

ser convertidos los datos de emisiones de ambos tipos de motores al mismo nivel de oxígeno usado durante las pruebas.

Para hacer la conversión de los datos a diferentes % de oxígeno fue utilizada la siguiente expresión:

$$C_c = C_{GAS} \times \frac{(21 - O_{REF})}{(21 - O_{MED})} \quad (8)$$

C_c – Concentración corregida expresada al % de oxígeno especificado.

C_{GAS} – Concentración del gas corregida (con los valores obtenidos en las verificaciones).

O_{REF} – Oxígeno de referencia, o sea al que tienen que referirse las medidas.

O_{MED} – Oxígeno medio durante las mediciones.

También fue necesario establecer el mismo sistema de unidades para algunos de los valores.

En la Tabla 9 se ofrece una comparación del índice de emisiones de los motores a gas y de los motores a fueloil de la planta analizada.

En la Tabla 10 y en la Fig. 1 se muestra el índice de emisiones de los motores a gas de la planta estudiada.

Tabla 9. Comparación de las emisiones (Índice de emisiones) entre los motores a gas y los motores a fueloil de la planta estudiada.

Índice de Emisiones	Fueloil	Gas
Partículas mg/m ³	201,4071429	76,57
Dióxido de Azufre mg/m ³	369,54	0
Oxígeno % a mg/m ³	230534,6	80490
Dióxido de Nitrógeno mg/m ³	405,09	315,0
Dióxido de Carbono (CO ₂) % a mg/m ³	127256,7	86400
Monóxido de carbono CO ppm a mg/m ³	98,14	327,525
Monóxido de Nitrógeno mg/m ³	1500,4	105
Óxidos de Nitrógeno (NO _x como NO ₂) (mg/m ³)	2369,57	400,44
Hidrocarburos Totales (C _x H _y) de % a (mg/m ³)	756	1688,81

Fuente: Los autores.

Tabla 10.

Índice de emisiones de los motores a gas de la planta (los motores 8 y 13 estaban fuera de servicio)

Motor a gas	Índice de Emisiones
UGGN N°1	54,21
UGGN N°2	80,59
UGGN N°3	87,79
UGGN N°4	80,58
UGGN N°5	95,74
UGGN N°6	113,05
UGGN N°7	91,95
UGGN N°8	Fuera de Servicio
UGGN N°9	72,73
UGGN N°10	90,83
UGGN N°11	86,04
UGGN N°12	66,76
UGGN N°13	Fuera de Servicio
UGGN N°14	87,10
UGGN N°15	51,28
UGGN N°16	61,84
UGGN N°17	86,08
UGGN N°18	80,64
UGGN N°19	89,80
UGGN N°20	92,56
UGGN N°21	95,59
UGGN N°22	93,27
UGGN N°23	83,06

Fuente: Los autores.

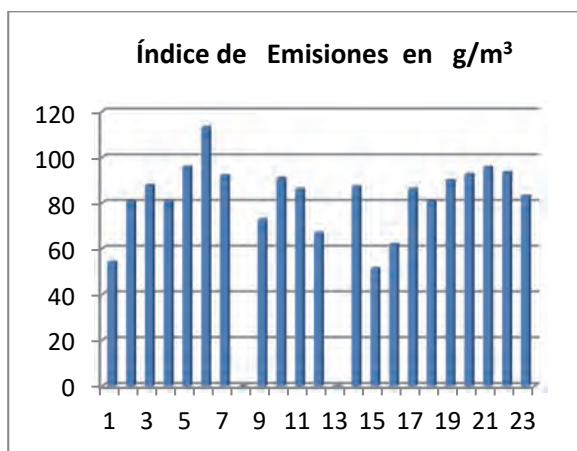


Figura 1. Índice de emisiones de los motores a gas de la planta (los motores 8 y 13 estaban fuera de servicio)
Fuente: Los autores.

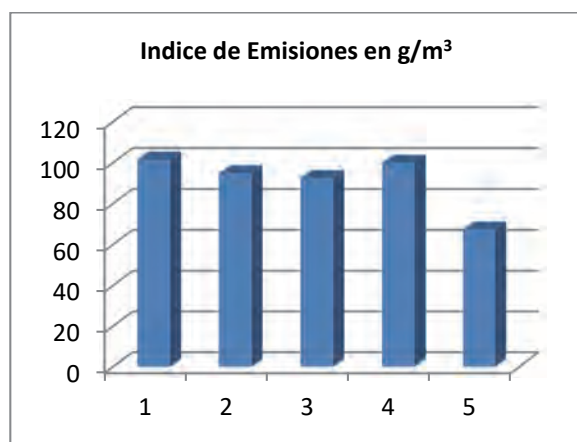


Figura 2. Índice de emisiones de los motores a fueloil de la planta.
Fuente: Los autores.

Tabla 11.

Índice de emisiones de los motores a gas de la planta (los motores 8 y 13 estaban fuera de servicio)

Motor a fueloil	Índice de Emisiones
MAN1	101,42
MAN2	94,63
MAN3	92,26
MAN4	99,73
MAN5	67,17

Fuente: Los autores.

En la Fig. 2 y en la Tabla 11 se muestra el índice de emisiones de los motores a fueloil de la planta.

7. Índice específico de Emisiones de los motores de la planta estudiada

En la Tabla 12 y en la Fig. 3 se ofrece una comparación del índice de emisiones específico de los motores a gas y de los motores a fueloil de la planta analizada para cada tipo de contaminante.

Tabla 12.

Comparación de las emisiones (Índice específico de emisiones) entre los motores a gas y los motores a fueloil de la planta estudiada.

Tipo de Contaminante	Índice específico de emisiones	
	Fueloil	Gas
Partículas mg/Nm ³	10,6564	22,3236
Dióxido de Azufre mg/Nm ³	19,5523	0
Oxígeno % a mg/Nm ³	12197,5	23466,7
Dióxido de Nitrógeno mg/Nm ³	21,4333	91,8571
Dióxido de Carbono (CO ₂) % a mg/Nm ³	6733,16	25189,5
Monóxido de carbono CO ppm a mg/Nm ³	5,19310	95,4885
Monóxido de Nitrógeno mg/Nm ³	79,3877	30,6122
Óxidos de Nitrógeno (NO _x como NO ₂) (mg/Nm ³)	125,374	116,7463
Hidrocarburos Totales (C _x H _y) de % a (mg/Nm ³)	40	492,3657

Fuente: Los autores.

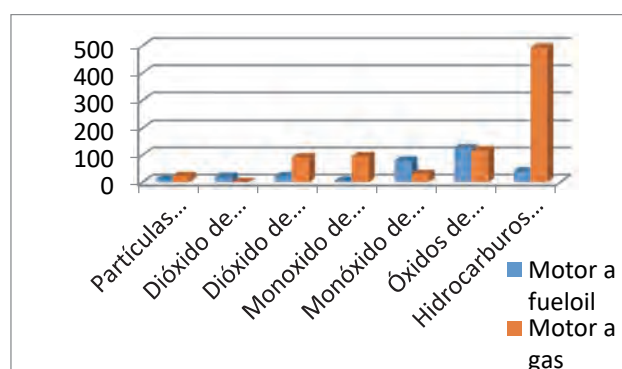


Figura 3. Índice específico de emisiones de los motores de la planta. Fuente: Los autores.

8. Análisis de los resultados

El índice de emisiones de los motores a gas de la planta es muy diferente entre todos los motores de la planta, inclusive los motores a gas emiten partículas, aspecto que de acuerdo a la literatura consultada no es admisible. Esta situación señalada anteriormente se debe al estado técnico de los motores a gas, muchos de los cuales queman aceite junto con el gas y de ahí las partículas en los gases de escape.

En el caso de los motores a fueloil, la diferencia del índice de emisiones entre los diferentes motores no es tan apreciable como en el caso de los motores a gas.

De la Fig. 3 se puede apreciar que en sentido general los motores a fueloil de la planta tienen un índice específico de emisiones menor que el de los motores a gas, es decir los motores a fueloil emiten menos contaminantes con relación a la potencia que entregan.

9. Conclusiones

En el trabajo se ofreció un análisis de los trabajos en el área de despacho económico-ambiental. Se analizaron varias técnicas destinadas a reducir las emisiones a la atmósfera debido a la generación de energía eléctrica. De todas las técnicas, la que menor inversión requiere es la de realizar un despacho de carga con emisiones mínimas.

Se desarrolló un nuevo método para evaluar la contaminación

ambiental producida por una planta generadora de electricidad. Este método a diferencia de los existentes en la literatura, no le asigna un valor de costo a las emisiones, sino que se parte de un índice total que tiene en cuenta no el costo, sino la importancia de cada emisión para la salud humana y para el medio ambiente. Para poder realizar comparaciones entre diferentes motores y combustibles se desarrolló el concepto de índice específico de emisiones que no es más que el índice de emisiones dividido por la potencia generada por el motor. El procedimiento matemático desarrollado se aplicó a un estudio de caso de una planta generadora de electricidad en la ciudad de Manaus en Brasil. Los resultados obtenidos fueron altamente satisfactorios y validan el procedimiento desarrollado. Se pudo apreciar del estudio de caso que el valor del índice de emisiones varía para los diferentes motores de la planta. Sus valores oscilan entre 54 y 102 g/m³

Agradecimientos:

Al Instituto de Tecnología y Educación Galileo del Amazonas (ITEGAM), a la Universidad Federal de Pará (UFPA) y a la Universidad del Estado del Amazonas (UEA).

Referencias

- [1] Bellhouse GM, Whittington H.W., Simulation of gaseous emissions from electricity generating plant. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 1996. DOI: 10.1016/0142-0615(96)00010-5
- [2] Toro-Gómez M.V., Quiceno-Rendón D.M., Energy demand and vehicle emissions estimate in Aburra Valley from 2000 to 2010 using LEAP model. *Dyna*, 2015. DOI: 10.15446/dyna.v82n189.41991
- [3] Oliveira, B.F.Ad., Ignotti, E., Hacon, S.S., A systematic review of the physical and chemical characteristics of pollutants from biomass burning and combustion of fossil fuels and health effects in Brazil. *Cadernos de Saúde Pública* (27), pp. 1678-1698, 2011. DOI: 10.1590/S0102-311X2011000900003
- [4] Tton Agence UEP. National Ambient Air Quality Standards (NAAQS). 2006
- [5] Binkou, A, Yu, Y., A novel formulation of optimal hydrothermal power flow. *Proceedings-Chinese Society of Electrical Engineering*, (28), 2008.
- [6] Yalcinoz, T., Altun, H., Environmentally constrained economic dispatch via a genetic algorithm with arithmetic crossover. *African Conference in Africa*, 2002 IEEE AFRICON 6th 2002. DOI: 10.1109/AFRCON.2002.1160037
- [7] Skjærseth, J.B., Wettstad, J., EU emissions trading: initiation, decision-making and implementation: Ashgate Publishing, Ltd.; 2008
- [8] Vourc'h, A., Jimenez, M., Enhancing environmentally sustainable growth in finland economics department working papers No. 229. DOI: 10.1787/370.821.866.730
- [9] Catalão, J., Mariano, S., Mendes, V., Ferreira, L., Profit-based unit commitment with emission limitations: A multiobjective approach. *Power Tech*, 2007 IEEE Lausanne 2007. DOI: 10.1109/PCT.2007.4538523
- [10] Kockar, I., Conejo, A.J., McDonald, J.R., Influence of the emissions trading scheme on generation scheduling. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, (31), pp. 465-473, 2009. DOI:10.1016/j.ijepes.2009.07.001
- [11] Yamin, H., El-Dwairi, Q., Shahidehpour, S., A new approach for GenCos profit based unit commitment in day-ahead competitive electricity markets considering reserve uncertainty. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, (29), pp. 609-616, 2007. DOI: 10.1016/j.ijepes.2006.09.004
- [12] Friedlander, G.D., Power, pollution, and the imperiled environment II. East, Midwest, and West Coast: pollution-control plans of some major utilities; role of government in environmental matters; other proposed systems for reducing stack emissions. *Spectrum, IEEE* (7), pp. 65-75, 1970.
- [13] Liu, X., Lin, B., Zhang, Y., Sulfur dioxide emission reduction of power plants in China: current policies and implications. *Journal of Cleaner Production*, 2015. DOI:10.1016/j.jclepro.2015.12.046
- [14] Sethi, M., Location of greenhouse gases (GHG) emissions from thermal power plants in India along the urban-rural continuum. *Journal of Cleaner Production*, 103, pp. 586-600, 2015. DOI:10.1016/j.jclepro.2014.10.067
- [15] Chemick, P., Caverhill, E., Methods of valuing environmental externalities. *The Electricity Journal*, 4, Pp. 46-53, 1991. DOI:10.1016/1040-6190(91)90171-O
- [16] Bernow, S., Biewald, B., Marron, D., Full-cost dispatch: incorporating environmental externalities in electric system operation. *The Electricity Journal*, 4, pp. 20-33, 1991. DOI:10.1016/1040-6190(91)90168-S
- [17] Holstein, M.P., Brands, W.J., Impacts on least cost planning and system operations of monetizing environmental externalities. *Proceedings of the American Power Conference*; (United States), 54, 1992.
- [18] Hess, S.W., Parker, J.E., Alms, K.D., Lee, J.T., Malone, M.J., Planning System Operations to Meet NOx Constraints. *IEEE Comp Applic in Power*, 5, pp. 10-14, 1992.
- [19] Hobbs, B.F., Emissions dispatch under the underutilization provision of the 1990 US Clean Air Act Amendments: models and analysis. *Power Systems*, IEEE Transactions on, 8, pp. 177-183, 1993. DOI: 10.1109/59.221263
- [20] Arya, L., Choubé, S., Kothari, D., Emission constrained secure economic dispatch. *International journal of electrical power & energy systems*, 19, pp. 279-285, 1997. DOI:10.1016/S0142-0615(96)00043-9
- [21] Chiang, C.-L., Optimal economic emission dispatch of hydrothermal power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 29, pp. 462-469, 2007. DOI:10.1016/j.ijepes.2006.11.004
- [22] Muslu, M., Economic dispatch with environmental considerations: tradeoff curves and emission reduction rates. *Electric Power Systems Research*, 71, pp. 153-158, 2004. DOI:10.1016/j.epr.2004.01.009
- [23] Aydin, D., Özyön, S., Yaşar, C., Liao, T., Artificial bee colony algorithm with dynamic population size to combined economic and emission dispatch problem. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 54, pp. 144-153, 2014. DOI:10.1016/j.ijepes.2013.06.020
- [24] Hooshmand, R.-A., Parastegari, M., Morshed, M.J., Emission, reserve and economic load dispatch problem with non-smooth and non-convex cost functions using the hybrid bacterial foraging-Nelder-Mead algorithm. *Applied Energy*, 89, pp. 443-453, 2012.
- [25] Bhattacharya, A., Chattopadhyay, P.K., Solving economic emission load dispatch problems using hybrid differential evolution. *Applied Soft Computing*, 11, pp. 2526-2537, 2011. DOI:10.1016/j.asoc.2010.09.008

N. Mustafá-Moraes, Profesora de la Universidad del Estado de Amazonas. Coordina el Curso de Matemáticas. Desarrolla la investigación en sistemas de potencia. También actúa como investigadora en el ITEGAM (Instituto de Tecnología de la Amazonia Galileo). Graduada en Licenciatura en Matemáticas por la Universidad Federal del Amazonas - UFAM (1998), Especialista en Metodología de la Educación Superior - UFAM (2002), Maestría en Matemática Pura en la Universidad Federal del Amazonas - UFAM (2005) y Doctor en Ingeniería Eléctrica la Universidad Federal de Pará, con énfasis en los sistemas de energía eléctrica. Orcid: 0000 0002 7060 2483

U. Holanda-Bezerra, Dr. en Ingeniería Eléctrica en 1988, de la Universidad Federal de Rio de Janeiro (COPPE / UFRJ), Brasil. Es profesor en el Departamento de Ingeniería Eléctrica e Informática UFPA desde 1977. ORCID: 0000/0002/2853/8676.

J.L. Moya-Rodríguez, Graduado de Ing. Mecánico en 1974 en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, de MSc. en Fiabilidad en 1985 en la UT "Otto Von Guericke" de Alemania y Dr. en Ciencias Técnicas en 1994 en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Ha trabajado como profesor de Postgrado en diferentes universidades de México, Brasil, Nicaragua y España. Posee varios premios de la Academia de Ciencias de Cuba y es Profesor de Mérito de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Tiene más de 300 artículos publicados en revistas y memorias de eventos. Es miembro de la ASME. Coordina las Maestrías de Ingeniería Mecánica y de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Tiene varios libros publicados. Es miembro del Tribunal Nacional de Defensas de Doctorado de la Rama Mecánica. Ha sido tutor de 27 tesis de doctorados y de 47 tesis de maestrías, todas ellas defendidas exitosamente. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0541-0191>

J. Cabral-Leite, Dr. en Ingeniería Eléctrica en 2013 de la Universidad Federal de Pará (UFPA), Brasil. Profesor e Investigador de ITEGAM. Manaus. Amazonas. Brasil. ORCID: 0000/0002/1337/3549.

Gaussian clarification based on sign function

José de Jesús Medel-Juárez ^a, Mario Espinosa-Santiago ^a & José Luis Fernández-Muñoz ^b

^a Centro de Investigación en Computación, Instituto Politécnico Nacional, México. jjmedelj@yahoo.com.mx, xxmesxx@gmail.com

^b Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, U. Legaría, Instituto Politécnico Nacional, México. jlfernandezmu@gmail.com

Received: June 18th, 2015. Received in revised form: March 16th, 2016. Accepted: May 25th, 2016.

Abstract

This paper presents a clarification model in the fuzzy sense based on the Membership Inverse Function (MIF), in Control Theory. It is considered as an identification and requires bounded input and output signals. The sign function and its derivative is regarded as a Gaussian function into the mathematical Membership description. Specifically, the sign function considers the difference between the absolute state variable values and its centroid, rather than remaining in the triangle inequality. Therefore, the theoretical result applied in Matlab® using the reference values as an identification process in an Auto Regressive Moving Average (ARMA) (1, 1) model describes the performance. The clarification converging in almost all points of the desired signal depends on the different initial conditions. The convergence obtained by the functional error built by the second probability moment was also used and applied in the same software giving an illustrative description.

Keywords: Clarification; Fuzzy Logic; Identification; Stochastic Process.

Clarificación gaussiana basado en la función signo

Resumen

Este artículo presenta un modelo de clarificación en el sentido difuso basado en la función de membresía inversa como proceso de identificación para un sistema tipo caja negra con Una Entrada y Una Salida (UEUS). La función signo y su derivada para la función gaussiana, permite la descripción matemática del estado a identificar. Específicamente, la función signo aplica la diferencia entre los valores absolutos de la variable de estado y su centroide, en vez de la desigualdad del triángulo. El resultado teórico estuvo aplicado en Matlab®, usando como valores de referencia a los resultados del modelo Auto-Regresivo de Promedios Móviles (ARPM) (1, 1); permitiendo la clarificación y su convergencia en casi todos los puntos a la señal de referencia con diferentes condiciones iniciales entre ellos. La convergencia de forma ilustrativa se describió por el funcional del error a través del segundo momento de probabilidad usando el mismo software.

Palabras clave: Clarificación; Lógica Difusa; Identificación; Proceso Estocástico.

1. Introduction

"The world is not black and white but only shades of gray." In 1965, Zadeh [1] wrote a seminal paper in which he introduced fuzzy sets with smooth boundaries. These sets are considered gray areas rather than black and white in contrast to classical sets, which form the basis of Boolean or binary logic. Fuzzy set theory and fuzzy logic are convenient tools for handling imprecise, or unmolded data in intelligent decision-making systems. It has also found many applications in the areas of information sciences and control systems.

In many science areas, the identification process used internal system states for description, reconstruction or prediction. The techniques developed, give the average answer regarding its internal states such as the centroid method (in fuzzy logic) or the analytical methods based on stochastic gradient. The identification is known as clarification in the fuzzy logic sense [2]. The clarification methods according to performance have similar structures [3], and generate an equivalent signal compared with a reference, without indicating the associated properties [4]. The common strategies such as Gaussian Membership Function (GMF) and Polynomial Transformation (PT) are combined, obtaining better

How to cite: Medel-Juárez, J. D.J., Espinosa-Santiago, M. & Fernández Muñoz, J. L. Gaussian clarification based on sign function DYNA 83 (199) pp. 225-228, 2016

performance compared with the existing algorithms [5]. Another strategy is the distance between two fuzzy sets resulting in a clarification value without the index determining the original fuzzy number [6]. Control Theory (CT) suggests the Fuzzy Clarification Method (FCM) [7] instead of Least Squares Method (LSM) [8-9], Instrumental Variable (IV) [10-11], Forgetting Factor (FF) [12-13], Stochastic Gradient (SG) [14-17], Kalman Filter (KF) [18-19], and Deconvolution [20-23]. The control systems commonly have unwanted conditions or operations and the clarification process involved gives poor results because its average answer requires using Artificial Neural Networks (ANN) with stability conditions applied during the identification process [24], obtaining better results in simulation [25-26]. In [27], a clarification algorithm was applied into a fuzzy adaptive controller deciding it necessary to know the internal state value, bounded by a GMF. The Membership Inverse Function (MIF) transforms the fuzzy results into identified states without indicating the technique used [28]. The statistical properties such as Mean, and Standard Deviation according to [27-32] accomplish the Main Membership Function (MMF).

The Membership Inverse Function (MIF) as a clarification process approximating this result to the real reference value.

According to previous results, we develop the clarification process for stochastic signals using the signal system sign function considered bounded by a Membership Gaussian Function (MGF). Section 2 gives the main results. Section 3, presents the simulations and in the conclusions are developed in Section 4 describing the advantages and the references applied.

2. Main results

The clarification process has a natural description using the sign function properties applied into Membership Gaussian Function (MGF) according to Theorem 1. Thus, the Black-box system response is described through the clarification process knowing only the Membership Function (MF) and its two first probability moments.

With u_i^τ as the input and x_i^τ the output, satisfying $\{u_i^\tau\} \subseteq N(\mu_u, \sigma_u^2 < \infty)$, $\{x_i^\tau\} \subseteq N(\mu_x, \sigma_x^2 < \infty)$, here, i is the sequence index and τ is the time system state with $i, \tau \in \mathbb{Z}_+$, $i \neq \tau$.

Theorem 1. Let $\mu_{i_G}^\tau$ be described in eq. (1), as the Membership Gaussian Function (MGF) for a fuzzy system.

$$\mu_{i_G}^\tau = e^{-\frac{(x_{i_G}^\tau - \mu_\tau)^2}{\sigma_\tau^2}}. \quad (1)$$

The clarification state $\hat{x}_{i_G}^\tau$ in eq. (2) is based on sign function accomplished with $\mu_{i_G}^\tau \geq 0, i \in \mathbb{Z}_+$.

$$\hat{x}_{i_G}^\tau = \mu_\tau + \text{sign}(m(\mu_{i_G}^\tau))\sigma_\tau^2 |\ln(\mu_{i_G}^\tau)|^{\frac{1}{2}}. \quad (2)$$

With μ_τ , σ_τ are the Centroid and Standard Deviation respectively, with a time occurrence system state τ into sequence states $\{x_{i_G}^\tau\}$, allows associating a Membership

Function (MF) $\mu_{i_G}^\tau$. With slope $m(\mu_{i_G}^\tau)$ and i the sequence index.

Proof. Let eq. (3) be a description of sign function

$$\text{sign}(x_{i_G}^\tau - \mu_\tau) = \frac{|x_{i_G}^\tau - \mu_\tau|}{x_{i_G}^\tau - \mu_\tau}. \quad (3)$$

The $\text{sign}(x_{i_G}^\tau - \mu_\tau)$ considering in eq. (4), is a Membership Gaussian Function (MGF) with slope $m(\mu_{i_G}^\tau)$, instead of absolute value.

$$\text{sign}(x_{i_G}^\tau - \mu_\tau) = -\frac{\text{sign}(m(\mu_{i_G}^\tau))}{\sigma_\tau}. \quad (4)$$

Eq. (5) applies the logarithm of the Gaussian function according to eq.(3).

$$\ln(\mu_{i_G}^\tau) = \ln\left(e^{-\frac{|x_{i_G}^\tau - \mu_\tau|^2}{\sigma_\tau^2}}\right). \quad (5)$$

Eq. (6) presents the simplified result of eq. (5).

$$\ln(\mu_{i_G}^\tau) = -\frac{|x_{i_G}^\tau - \mu_\tau|^2}{\sigma_\tau^2}. \quad (6)$$

Eq. (7), without denominator having the equality to 0.

$$\sigma_\tau |\ln(\mu_{i_G}^\tau)|^{\frac{1}{2}} + |x_{i_G}^\tau - \mu_\tau| = 0. \quad (7)$$

Eq. (8) presents the evaluation of $|x_{i_G}^\tau - \mu_\tau|$ as $-\frac{\text{sign}(m(\mu_{i_G}^\tau))}{\sigma_\tau}(x_{i_G}^\tau - \mu_\tau)$ in eqs. (3) and (4) into eq. (7).

$$\sigma_\tau |\ln(\mu_{i_G}^\tau)|^{\frac{1}{2}} - \frac{\text{sign}(m(\mu_{i_G}^\tau))}{\sigma_\tau}(\hat{x}_{i_G}^\tau - \mu_\tau) = 0. \quad (8)$$

Eq. (9) develops the clarification ($\hat{x}_{i_G}^\tau$) with respect to Membership Gaussian Function in agreement to eq. (8).

$$\hat{x}_{i_G}^\tau = \mu_\tau + \text{sign}(m(\mu_{i_G}^\tau))\sigma_\tau^2 |\ln(\mu_{i_G}^\tau)|^{\frac{1}{2}}. \quad (9)$$

3. Simulation

The digital Black-box system described by an ARMA (1, 1) technique [15] with State Space $x_{k+1} = ax_k + bw_k$; its evolution is depicted in Fig. 4 for $\{w_k\} \subseteq N(\mu, \sigma^2 \leq \infty)$.

The system proposed bounded by a Normal Distribution [32] is depicted in Fig. 2 with a Membership Gaussian Function (MGF) [33]. The slopes presented in Fig. 3 used the eqs. (3) and (4) into MGF. Fig. 5 shows the clarification state (2) $\hat{x}_{i_G}^\tau$ justifying Theorem 1 through (9).

Figure 1. Black-box system answer bounded into interval $[-1, 1]$, for 1×10^2 computational iterations.

Source: The authors.

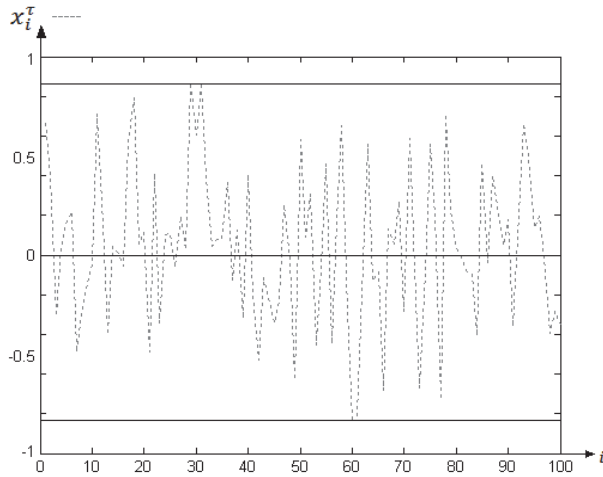


Figure 2. Membership Gaussian Function μ_{iG}^{τ} with respect to $\{x_i^{\tau}\}$ viewed in Fig. 4.
Source: The authors.

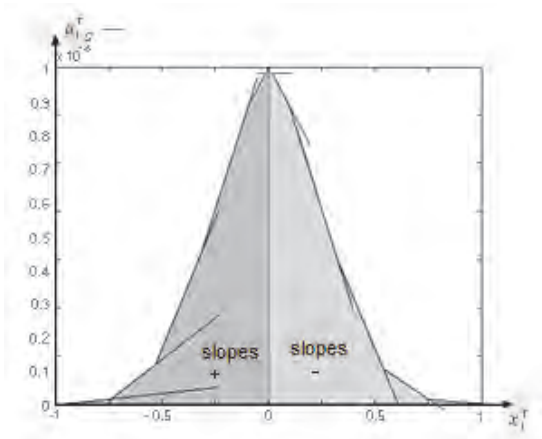


Figure 3. Gaussian Membership Function slopes μ_{iG}^{τ} .
Source: The authors.

Fig. 2 shows the Gaussian Membership function μ_{iG}^{τ} based on ARMA (1, 1) technique.

Fig. 3 presents the slopes $\{m(\mu_{iG}^{\tau})\}$ according to eq. (3) and taking into account the information content in Fig. 2.

Fig. 4, describes the clarification result viewed by $\hat{x}_{iG}^{\tau}$, function.

Fig. 5, includes the system evolution and its clarification, observing both signals converging regardless of different initial conditions.

4. Conclusions

The output system bounded by a Membership Gaussian Function (MGF) required a novel clarification technique justified in (9). The model developed and applied considered eqs. (4) and (5) properties applied in (8). The defuzzification strategy used a unit vector concept and its derivate properties applied on Membership Function (MF), achieving the clarification strategy. The theoretical results were developed

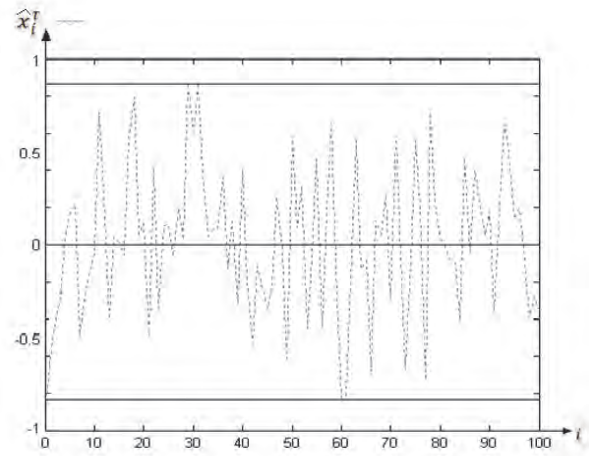


Figure 4. The clarification model results (2) is bounded into the same Black-box output interval $[-1, 1]$ for 1×10^2 computational iterations.
Source: The authors.

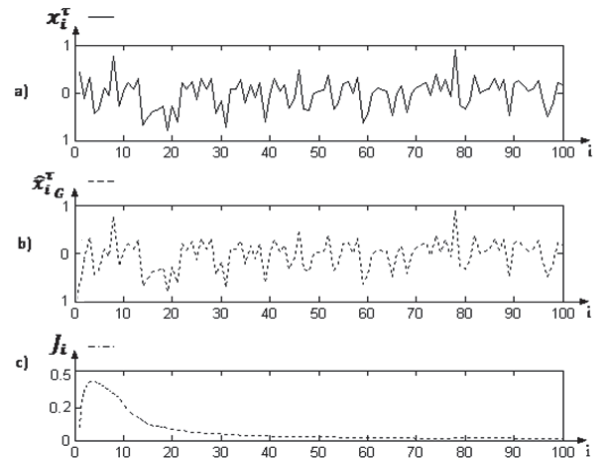


Figure 5. a) The reference signal $\{x_i^{\tau}: i = \overline{1, n}, n \in \mathbb{Z}_+, n = 1 \times 10^2\}$. b) Signal clarified based on (9). c) Functional error [20].
Source: The authors.

by the stochastic system bounded by a Gaussian distribution. The identification process or clarification consists of the Membership Inverse Function (MIF) developed in an analytical manner in eq. (2) and validated theoretically in eq. (9).

Therefore, this description for the clarification process was based on Membership Gaussian Inverse Function (MGIF) with the sign function and its derivative properties, obtaining the description $\hat{x}_i^T$ state.

References

- [1] M. Oussalah, On the compatibility between defuzzification and fuzzy arithmetic operations, *Fuzzy Sets and Systems*, 128(2), pp. 247-260, 2002.
- [2] Saletic., D.Z. and Popovich.,U., On possible constraints in applications of basic defuzzification techniques, *Proceeding of the 8th Seminar on neural network applications in electrical engineering, NEUREL*, pp. 225-230, 2006.
- [3] Jung, S.H., Cho., K.H., Kim., T.G. and Park., K.H., Defuzzification method for multi-shaped output fuzzy sets, *Electronics Letters*, 30(9), pp. 740-742, 1994.
- [4] Jiang., T. and Li., Y., Generalized defuzzification strategies and their parameter learning procedures, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 4(1), pp. 64-71, 1996.
- [5] Ma, M., Kandel, A. and Friedman, M., A new approach for defuzzification, *Fuzzy Sets and Systems*, 111(3), pp. 351-356, 2000.
- [6] Runkler, T.A., Extended defuzzification methods and their properties, *Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, 1, pp. 694-700, 1996.
- [7] Liu, F., Wang, J. and Peng, Y., A new approach to parameters identification of fuzzy regression models, *Proceedings of the 5th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, 1, pp. 127-131, 2008.
- [8] Mastorocostas, P. and Theocharis, J., Orthogonal least squares fuzzy modeling of nonlinear dynamical systems, *Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, 2, pp. 1147-1152, 1997.
- [9] Dai, H., Sinha, Naresh, K., Iterative instrumental variable method for robust identification of systems, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 42(5), pp. 480-486, 1995.
- [10] Yinao, W., Aiqing, R. and Zhihui, Z., The numerical simulation of improving parameter estimation by instrumental variable method, *Proceeding of the IEEE International Conference Grey Systems and Intelligent Services (GSIS)*, pp. 811-815, 2011.
- [11] Chen-Sen, O., Naijing, K. and Po-Jen, C., Recursive SVD-Based Least squares algorithm with forgetting factors for neuro-fuzzy modeling, *Proceeding of the 14th International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing (SNPD)*, pp. 575-580, 2013.
- [12] Paleologu, C., Benesty, J. and Ciocchina, S., A robust variable forgetting factor recursive least squares algorithm for system identification, *IEEE Signal Processing Letters*, 15, pp. 597-600, 2008.
- [13] Medel, J.J. and Zagaceta, M.T., Estimación-identificación como filtro digital integrado: descripción e implementación recursiva. *Rev. Mex. Fis.*, 56(1), pp. 1-8, 2010.
- [14] Ding, F., Liu, G. and Liu., X.P., Partially coupled stochastic gradient identification methods for non-uniformly sampled systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 55(8), pp. 1976-1981, 2010.
- [15] Chang, S.L. and Ogunfunmi, T., Stochastic gradient based on 3rd order Volterra system identification by nonlinear Wiener adaptive algorithm, *IEE Proceedings of the Vision, Image and Signal Processing*, 150(2), pp. 90-98, 2003.
- [16] Bershad, N.J., Celka, P. and Vesin, J., Stochastic analysis of gradient adaptive identification of nonlinear systems with memory for Gaussian data and noisy input and output measurements, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 47(3), pp. 675-689, 1999.
- [17] Wei, C.L., Tsai, J.S.H., Guo, S.M. and Shieh., L.S., Universal predictive Kalman filter based on fault estimator and tracker for sampled-data non-linear time-varying systems, *Control Theory & Applications, IET*, 5(1), pp. 203-220, 2011.
- [18] Chafaa, K., Ghanai, M. and Benmahammed, K., Fuzzy modeling using Kalman filter, *Control Theory & Applications, IET*, 1(1), pp. 58-64, 2007.
- [19] Medel, J.J. y García, C.V., Estimación de parámetros usando la deconvolución y la pseudo-inversa: descripción e implementación recursiva. *Rev. Mex. Fis.*, 56(1), pp. 54-60, 2010.
- [20] Erdogmus, D., Hild., K.E., Principe, J.C., Lazaro, M. and Santamaria, I., Adaptive blind deconvolution of linear channels using Renyi's entropy with Parzen window estimation, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 52(6), pp. 1489-1498, 2004.
- [21] Chen, L. and Kim-Hui, Y., A soft double regularization approach to parametric blind image deconvolution, *IEEE Transactions on Image Processing*, 14(5), pp. 624-633, 2005.
- [22] Depeyrot, M., Linear System identification using real-time deconvolution, *IEEE Transactions on Computers*, C-1(12), pp. 1139-1145, 1970.
- [23] Meng-Xin, L., Cheng-dong, W. and Feng, J., A vision-based inspection system using fuzzy rough neural network method, *Proceeding of the International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, pp. 3228-3232, 2006.
- [24] Sivanandam, S.N., Deepa, S.N. and Sumathi, S., Introduction to Fuzzy logic using MATLAB®, Springer, pp. 95 – 108, 2007.
- [25] Nguyen, H.T., Prasad, N.R., Walker., C.L. and Walker, E.A., A 1st course in Fuzzy and neural Control, (Chapman and Hall/CRC, (2002), Ed. 1, pp. 120-123.
- [26] Kosinski, W., Evolutionary algorithm determining defuzzification operators, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 20(5), pp. 619-627, 2007.
- [27] Urbanski, K. and Wasowski, J., Fuzzy measurement theory, *Measurements*, 41(4), pp. 391-402, 2008.
- [28] Jang, J.S.R., Sun, C.T. and Mizutani, E., Neuro-fuzzy and soft computing: a computational approach to learning and machine intelligence, Prentice-Hall, 1997, pp. 24 - 28.
- [29] Shin, Y.C. and Xu, C., Intelligent systems: modeling, optimization, and control. Section 2.1.3. CRC Press, 2008.
- [30] Slotine, J.J. and Li, W., Applied nonlinear control, Prentice-Hall, 1991, 1, pp. 290-306.
- [31] Shtessel, Y., Edwards, C., Fridman, L. and Levant, A., Sliding Mode control and observation, *Control Engineering, Birkhäuser*, pp. 18-19, 2013.
- [32] Velásquez-Henao, J.D. and Branch-Bedoya, J.W., Examples in the classroom: Pattern classification using the R language, *DYNA*, 79(173), pp. 81-88, 2012.
- [33] Velásquez-Henao, J. D., Rueda-Mejía, V.M. and Franco-Cardona, J.D., Electricity demand forecasting using a SARIMA- multiplicative single neuron hybrid model, *DYNA*, 80(180), pp. 4-8, 2013.
- [34] Roy-Chowdhury, S. and Pedrycz, W., A survey of defuzzification strategies, *Int. J. Intel. Syst*, pp. 679-695, 2001.

J. de J. Medel-Juárez, is a Professor working on- intelligent estimation and identification applied in hybrid filters. He is an Aeronautics Engineer (1994), MSc. in sciences in Automatic Control (1996), and also a PhD in Automatic Control (1998), Member of National Council for Science and Technology (1999), member of the Mexican Academy of Sciences. Actually, he is a Full Time Professor and Researcher in the Computer Research Center (CIC). His researches include Digital filtering, Control, Real-time, among others.
ORCID: 0000-0002-1257-1711

M.Espinosa-Santiago, is a MSc. in Computer Research Center (CIC) and Eng. in Electronics and Communications at the Mechanical and Electrical School at National Polytechnic Institute (ESIME Zacatenco IPN). Currently he works at the Technical Center for Research and Development Carso, (CTQ-CIDEC).
ORCID: 0000-0003- 0449-9382

J.L. Fernández-Muñoz, is a Full Time Professor working on Applied Intelligent Systems. He is PhD. in Physics and has MSc. in Physics (1998). Member of the National Researchers System. He is a researcher at Research Center of Science and Advanced Technology (CICATA-IPN) in the Laboratory of Condensed Matter.
ORCID: 0000-0002-2039-3222

Rheological properties of carbon nanotubes as additive in a lubricating fluid

Jesús Antonio Carlos Cornelio^a, Paula Andrea Cuervo-Velásquez^b, María Isabel Ardila^c, William Orozco-Murillo^c,
Luis Felipe Jaramillo-Zuluaga^b, Lina Marcela Hoyos-Palacio^d, Javier Lara-Romero^a & Alejandro Toro^b

^a Facultad de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México jacarlosc@unal.edu.co,
jlara_romero@hotmail.com

^b Grupo de Tribología y Superficies, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia pacuervo@unal.edu.co, lufjaramillozu@unal.edu.co,
aotoro@unal.edu.co

^c Grupo de Mantenimiento y Materiales, Facultad de Ingeniería, Institución Universitaria Pascual Bravo, Medellín, Colombia
isabel.ardila@pascualbravo.edu.co, william.orozco@pascualbravo.edu.co

^d Grupo de Dinámica Cardiovascular, Facultad de Medicina, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia lina.hoyos@upb.edu.co

Received: December 23th, 2015. Received in revised form: July 20th, 2016. Accepted: August 21th, 2016.

Abstract

The rheological properties of polyalphaolefin lubricant oil with the addition of multi-walled and single-walled carbon nanotubes were studied. The rheological tests were performed by varying the viscosity as a function of temperature, load and shear rate of mixtures with carbon nanotubes concentrations of 0.01 and 0.05 wt.%. The effect of the addition of carbon nanotubes on the wettability of the lubricant was also evaluated. The results showed that the addition of carbon nanotubes at the concentrations tested led to a variation in viscosity with respect to temperature. Shear stress showed significant increase with respect to strain rate and reached maximum values when the concentration of CNT was 0.05 wt % for both single-walled and multi-walled cases.

Keywords: Viscosity; Shear stress; Carbon nanotubes; Polyalphaolefin.

Propiedades reológicas de nanotubos de carbono como aditivo en un fluido lubricante

Resumen

Se estudiaron las propiedades reológicas de un aceite lubricante base polialfaolefina (PAO) al que se agregaron nanotubos de carbono (NTC) monocapa y multicapa como aditivos. Los ensayos reológicos realizados apuntaron a estudiar la variación de la viscosidad en función de la temperatura, la carga y la tasa de cizallamiento para mezclas con contenidos de nanotubos de carbono de 0.01% y 0.05% en peso. Adicionalmente, se evaluó la mojabilidad del PAO con y sin la adición de los nanotubos de carbono. Los resultados mostraron que la adición de los nanotubos de carbono a las concentraciones ensayadas lleva a una variación de la viscosidad con respecto a las temperaturas probadas. Fue observado un incremento significativo del esfuerzo de corte con respecto a la tasa de deformación, y tanto para el caso de monocapa como de multicapa dicho esfuerzo presentó tendencia a aumentar cuando la concentración de NTC fue de 0.05%.

Palabras clave: Viscosidad; Esfuerzo cortante; Nanotubos de carbono; Polialfaolefina.

1. Introducción

Los nanotubos de carbono (NTC), tanto monocapa como multicapa, han atraído un enorme interés desde su descubrimiento debido a sus propiedades electrónicas y mecánicas [1]. Se ha

reportado que los NTC son excepcionalmente resistentes y rígidos, sin embargo, notablemente flexibles a la vez. [2]. En otros términos, los nanotubos pueden funcionar como resortes extremadamente firmes ante pequeños esfuerzos y, frente a cargas muy altas, pueden deformarse drásticamente y volver

How to cite: Carlos-Cornelio, J. A., Cuervo-Velásquez, P. A., Ardila, M. I., Orozco-Murillo, O. M., Jaramillo-Zuluaga, L. F., Hoyos-Palacio, L. M., Lara-Romero, J. & Toro, A. Propiedades reológicas de nanotubos de carbono como aditivo en un fluido lubricante DYNALOG 83 (199)

posteriormente a su forma original. Diversos estudios han tratado de medir las propiedades mecánicas y la tensión máxima soportada por un nanotubo de carbono, con resultados heterogéneos, si bien se podría asumir de manera general que la tensión máxima de rotura podría rondar los 150 GPa [3, 4]. Estas propiedades los convierten en excelentes aditivos para eventualmente mejorar las propiedades mecánicas, electrónicas, tribológicas, térmicas o reológicas de un fluido [2].

La posibilidad de dispersión de los nanotubos de carbono los convierte en candidatos prometedores para fluidos debido a sus propiedades. Sin embargo se necesitan métodos de mezcla mecánicos para producir dispersiones de nanotubos de carbono que sean homogéneas y estables durante largos períodos de tiempo [5]. Los factores que afectan a la reología de dispersiones de nanotubos incluyen la química de la fase continua (el líquido base), la cantidad de nanotubos en todo el volumen de fluido, la relación de aspecto y la química de superficie promedio de los nanotubos (métodos de dispersión mecánica y tratamiento químico) [6,7]. La temperatura influye en las propiedades reológicas de los fluidos de base, pero también puede afectar a la estabilidad de las dispersiones de nanotubos ya sea a través de cambios en la conformación dispersante en el líquido o a través de cambios en las interacciones entre el dispersante y la superficie sólida de los nanotubos de carbono [5]. Por lo tanto, las propiedades reológicas de dispersiones de nanotubos de carbono son muy importantes para su aplicación en sistemas prácticos.

En este trabajo se evaluaron las propiedades reológicas de un aceite lubricante PAO (Polialfaolefina) aditivado con nanotubos de carbono (SWCNT [nanotubos de carbono monocapa] y MWCNT [nanotubos de carbono multicapa]) en concentraciones de 0.01% y 0.05% en peso. Los nanotubos de carbono fueron purificados y funcionalizados por modificación química para mejorar su estado de dispersión en la base lubricante PAO, y los ensayos reológicos se realizaron variando la temperatura y la tasa de cizallamiento. Adicionalmente se estudió el efecto de los nanotubos de carbono en la mojabilidad del PAO.

2. Materiales y métodos

2.1. Síntesis de nanotubos de carbono

Los nanotubos de carbono fueron sintetizados por deposición química de vapor (CVD). Se usó un tubo de cuarzo como sustrato para el crecimiento de los nanotubos y un horno equipado con un controlador de temperatura permitiendo alcanzar la temperatura de reacción requerida ($700^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$). Como fuente de carbono se utilizó acetileno; el catalizador usado para la producción de nanotubos de carbono multicapa (MWCNT) fue níquel y para los nanotubos de carbono monocapa (SWCNT) fue cobalto, la mezcla de gas estuvo compuesta de 80 cc/min de nitrógeno, 20 cc/min acetileno y 15 cc/min de hidrógeno. La secuencia de procesamiento incluyó el tiempo de reducción de 20 min, tiempo de acetileno 20 minutos y el tiempo de enfriamiento de 60 minutos.

2.2. Purificación y funcionalización de los nanotubos de carbono

Para la purificación donde se eliminan los restos de

catalizador se empleó un método basado en el lavado repetido de la muestra con diferentes ácidos. El proceso está compuesto por tres pasos; dos en la purificación y uno en la funcionalización. El primer componente que se elimina de la muestra es la sílice, que actúa como soporte de las partículas catalizadoras. Para este paso es agregado HF al 2% en volumen, y la solución es sometida a agitación por 30 min (paso 1). Posteriormente se lava varias veces para eliminar por completo el HF y se adiciona HCl en una concentración 2M (paso 2). Se agita por 30 min y nuevamente la muestra es lavada varias veces para ser sometida a un tratamiento de secado a 80°C en ambiente de O_2 en aire en un horno convencional por una hora, finalmente la muestra se pasa a un desecador completamente sellado por 24 horas [8].

El método para la funcionalización de los nanotubos de carbono está basado en la investigación de Matthew W. Marshall y colaboradores del 2006 [9], quienes propusieron un método simple de funcionalización con ácido carboxílico. Se utilizó 1 ml de solución 3:1 (V/V) de H_2SO_4 y HNO_3 por cada 2 mg de nanotubos, esto se sometió a agitación ultrasónica por 20 minutos en agua a 20°C (paso 3) utilizando hielo para control de la temperatura, evitando el rompimiento de los nanotubos para mantener su longitud original (Fig. 1). Después del tratamiento anterior el material fue lavado en agua desionizada limpiando el excedente de ácidos hasta llegar un pH de alrededor de 5. El material posteriormente se secó en horno sellado a 60°C .

Los nanotubos de carbono obtenidos (SWCNT y MWCNT) fueron caracterizados por SEM mediante el uso de equipos JEOL JSM-6490 LV y FEI Nova NanoSEM 200, espectroscopia RAMAN usando un espectrómetro Raman confocal marca Horiba Jobin Yvon, Modelo Labram HR de alta resolución con una distancia focal de 800 mm, Laser spot size de 1 a 300 μm , detector CCD con resolución de 1024×256 pixeles, rango espectral optimizado de 400-1100 nm y rejillas de difracción de 1800 y 600 líneas/m. Para el análisis FTIR se usó un equipo Marca Perkin Elmer modelo Spectrum one, detector DTGS con una resolución de 4 cm^{-1} y un rango de número de onda de 450 a 4000 cm^{-1} .

2.3. Dispersión de nanotubos de carbono en PAO

Para la preparación de las soluciones se usó como fluido lubricante una Polialfaolefina (PAO) S4 GX 320 (P&G Colombia). Se midieron 20 ml de PAO y se le agregó 0.01% y 0.05% en peso de MWCNTs y SWCNTs respectivamente. Para obtener una mezcla homogénea de las soluciones preparadas y que los nanotubos se dispersaran bien en el PAO, las soluciones se sometieron a 30 min de agitación mecánica seguidos de agitación ultrasónica durante 5 min.

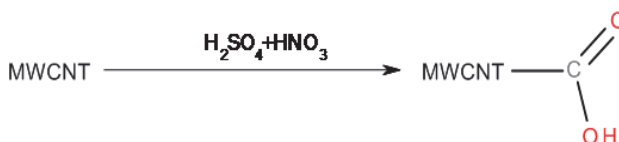


Figura 1. Mecanismo de funcionalización con ácido carboxílico.
Fuente: Adaptado de [9]

En general, la homogeneidad y estabilidad de la dispersión son mayores cuando el tamaño de las nanopartículas es pequeño, por ejemplo por debajo de 100 nm. En el caso de los nanotubos, el problema de la dispersión es más complejo y no hay relaciones simples para expresar las diversas tendencias. Generalmente los nanotubos se entremezclan y tienden a formar haces, lo que dificulta la dispersión [10]. La longitud de los nanotubos es sin duda un parámetro crucial, sin embargo realizando una buena funcionalización con grupos carboxilos se puede lograr que se dispersen en la base lubricante. Aunado a esto, proporcionando una buena agitación mecánica y ultrasónica se puede garantizar que las nanotubos se queden suspendidos en el PAO y no se sedimenten.

2.4. Ensayos reológicos

La caracterización reológica de las soluciones se llevó a cabo en un viscosímetro Brookfield LVDV-II+Pro con baño de temperatura e interfaz bi-direccional RS-232PC y el software Rheocalc®. El equipo tiene la capacidad de realizar ensayos con velocidad variable de 0.01 a 200 rpm, un rango de temperatura de prueba de 0°C a 100°C y una velocidad de cizalla máxima de $57s^{-1}$ a 200 RPM y poder de resolución de 1% del valor de viscosidad medido.

Los ensayos de rampa de velocidad controlada se realizaron con un husillo LV SC4-16 de tal manera que la velocidad de rotación del husillo incrementaba las revoluciones por minuto (rpm) cada 30 segundos, y se registraron los cambios de viscosidad para determinar el comportamiento newtoniano o no newtoniano de los lubricantes estudiados. El efecto de la temperatura sobre la viscosidad también se midió mediante la realización de pruebas en el rango de entre 0°C y 100°C con una velocidad de cizalla fija de $30s^{-1}$. Finalmente, los lubricantes se ensayaron a una velocidad de cizalla específica de $30s^{-1}$ durante 1200 segundos con el fin de observar cualquier cambio en la viscosidad respecto al tiempo.

El ángulo de contacto se midió utilizando un dispositivo Dataphysics OCA Number 15 series con una jeringa con capacidad de 1 ml para aplicar una gota en la superficie de la muestra. La superficie usada para los ensayos de mojabilidad fue una sección de riel de ferrocarril fabricado en acero al carbono de 5x8x14 cm, cuya rugosidad superficial fue caracterizada usando un dispositivo Mitutoyo SJ-201. Se realizaron ensayos a las muestras preparadas con nanotubos de carbono, así como al aceite base como punto de referencia.

3. Resultados y discusión

3.1. Microestructura de los nanotubos de carbono

En la Fig. 2 se muestra el aspecto de los nanotubos de carbono obtenidos. Las Figs. 2a y 2c muestran los nanotubos antes del proceso de purificación, mientras que las Figs. 2b y 2d presentan las muestras purificadas. Puede notarse que la purificación remueve de manera eficiente los residuos del catalizador así como los restos de sílice en las muestras obtenidas con níquel como catalizador, pero el proceso no es tan exitoso en las muestras fabricadas usando cobalto.

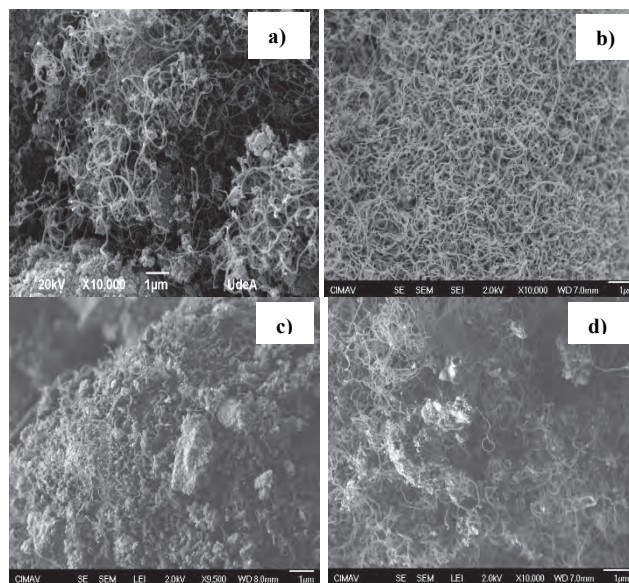


Figura 2. Imágenes SEM de los nanotubos de carbono obtenidos. a) MWCNT sintetizados, b) MWCNT purificados, c) SWCNT sintetizados, d) SWCNT purificados.

Fuente: Autores

La Fig. 3 muestra el aspecto de nanotubos de carbono monocapa (a) y multicapa (b) observados en TEM. Se puede observar que en el caso de monocapa el número de capas es menor a 10, mientras que en los multicapa el número de capas es del orden de 35. La Fig. 3c muestra un ejemplo de mediciones en una muestra de multicapa en el que el diámetro exterior es de aproximadamente 34.31 nm y el diámetro interno es alrededor de 7.45 nm, con una separación media entre nanotubos de aproximadamente 0,34 nm (que corresponde a la separación entre láminas de grafeno en la distancia de grafito).

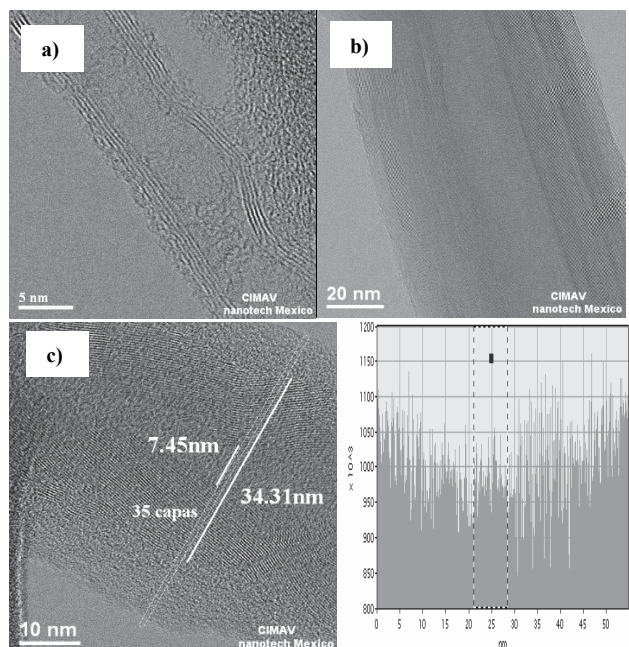


Figura 3. Imágenes TEM de los nanotubos de carbono. a) NTC monocapa, b) NTC multicapa, c) imagen TEM que muestra un análisis del diámetro y el esquema perfiles de que muestra el número de capas de nanotubos de carbono.

Fuente: Autores

En la Fig. 4 se observan espectros Raman para los nanotubos de carbono con sus relaciones de las bandas D, G y G' para cada etapa. La Fig. 4a muestra la relación de banda para nanotubos monocapa; la relación D y G (I_D/I_G) en los nanotubos sintetizados es de 0.52 y disminuye hasta 0.48. Para los multicapa (Fig. 4b) en los sintetizados es de 0.51 y disminuye a 0.48, esto para cada etapa del tratamiento de ácidos donde se puede observar que ya no hay un cambio significativo. Este cambio indica que al eliminar el cobalto y el níquel de la estructura de los NTC las capas se acomodan generando un aumento en la cristalinidad de los NTC [11].

La relación de las bandas G y G' ($I_{G'}/I_G$) es un indicativo de la rugosidad en la superficie de los NTC, es decir, del ordenamiento alineado de las paredes de los NTC desde la superficie al interior [11,12]. Para los NTC sintetizados el valor es de 1.69 mientras que en los purificados y funcionalizados oscila entre 1.67-1.68. Esta ligera disminución se asocia a un acomodamiento del nivel de alineamiento que logran tener las paredes de los NTC ya sea por el retiro de partículas de cobalto o níquel de la superficie de los NTC y/o por el efecto térmico del calentamiento durante cada paso [11].

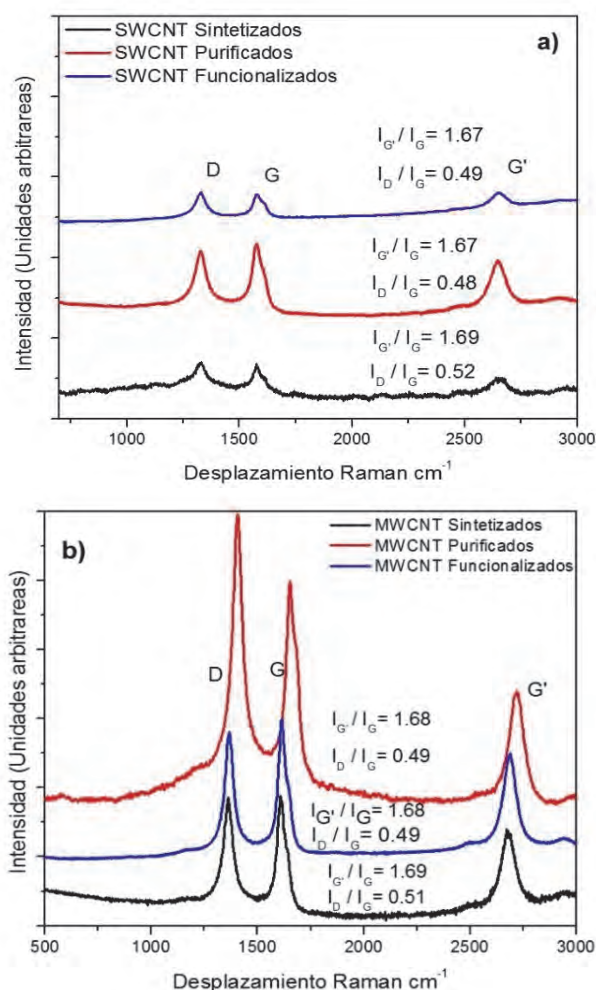


Figura 4. Análisis de espectroscopia Raman para los nanotubos obtenidos a) Nanotubos de carbono monocapa b) Nanotubos de carbono multicapa. Fuente: Autores

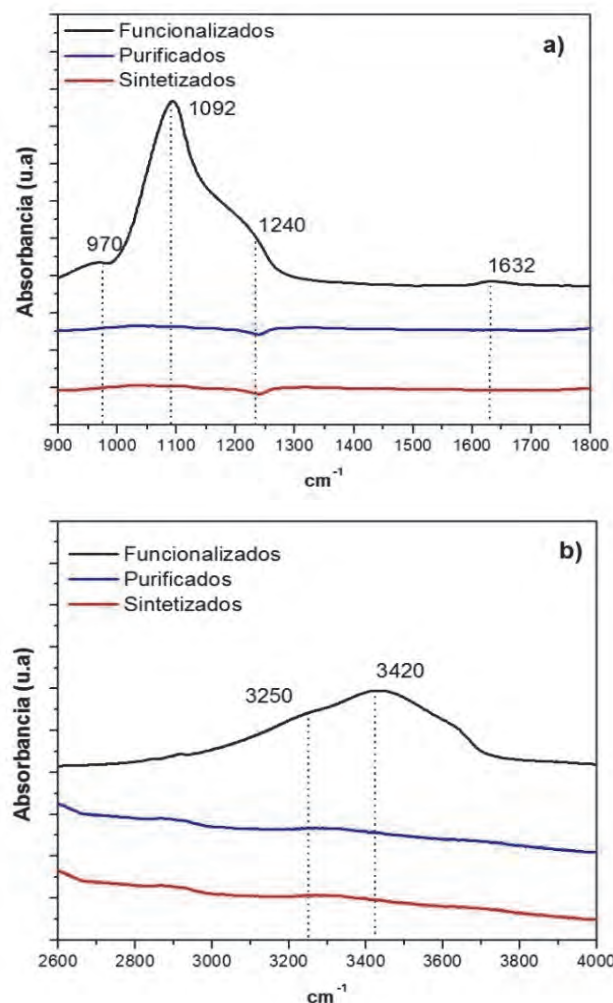


Figura 5. Secciones del espectro IR de los NTC en las condiciones de sintetizados, purificados y funcionalizados, a) sección 1 (de 900 a 1800 cm^{-1}) y b) sección 2 (de 2600 a 4000 cm^{-1}). Fuente: Autores

El análisis mediante FTIR se presenta en dos secciones para tener una mejor visualización de las señales detectadas. La primera sección comprende el intervalo de longitudes de onda de 900 a 1800 cm^{-1} (Fig. 5a) y la segunda sección se localiza entre 2600 y 4000 cm^{-1} (Fig. 5b).

En ambas secciones se observa que los NTC sintetizados y NTC purificados obtenidos al realizar los pasos 1 y 2 del tratamiento con ácidos no producen ninguna señal relacionada con la presencia de algún grupo funcional orgánico (Ver sección 2.2). Por el contrario, los NTC funcionalizados obtenidos al realizar el paso 3 del tratamiento con ácidos generan señales que pueden ser asociadas a la formación de grupos orgánicos sobre los NTC. En la sección 1 se detectan señales a las siguientes longitudes de onda: 970, 1092, 1240 y 1632 cm^{-1} , las cuales corresponden a la formación de dímeros carboxílicos que interactúan entre sí por puentes de hidrógeno. En la sección 2 se detectan señales localizadas a 3250 y 3420 cm^{-1} que corresponden al estiramiento de grupos hidroxilo asociados a los grupos carboxílicos que interactúan por puentes de hidrógeno [13].

3.2. Comportamiento reológico de la mezcla PAO-NTC

3.2.1. Efecto de la velocidad de cizallamiento

En la Fig. 6 se observa el comportamiento de la viscosidad al aumentar la velocidad de cizalla para tres temperaturas: 25°C, 40°C y 100°C. En general, para las temperaturas de 25°C y 40°C la viscosidad aumentó con la velocidad de cizalla tanto para las muestras aditivadas con NTC como con las de PAO sin aditivos, lo cual indica un comportamiento dilatante (*shear thickening*) en ambos casos. Sin embargo, para bajas velocidades de cizalla se observó una caída en la viscosidad para el PAO aditivado con 0.05% tanto para monocapa como multicapa, y un aumento para la concentración menor de NTC. Cuando la velocidad de cizalla aumenta ($>20\text{s}^{-1}$) todas las soluciones de PAO-NTC manifiestan la tendencia dilatante pero tienen una viscosidad del orden de 20 cP menor con respecto al PAO. A la temperatura de 40°C el PAO-MWCNT 0.01% presenta rasgos de pseudoplasticidad (*shear thinning*) y a partir de una velocidad de cizalla de 30s^{-1} tiende a ser un fluido newtoniano (ver Fig. 6b). Para la temperatura de 100°C y por encima de una velocidad de cizalla de 20s^{-1} todos los aceites exhibieron un comportamiento Newtoniano. A esta misma temperatura, para velocidades de cizalla muy bajas el PAO aditivado en la mayoría de los casos presentó un comportamiento dilatante, siendo que sólo el PAO-SWCNT 0.05% mostró una tendencia a ser pseudoplástico.

Los resultados con respecto a otros estudios donde se evaluaron nanotubos multicapa (MWCNT) con porcentajes de 0.3% y 1% [14,15] muestran que la viscosidad no cambia significativamente con la velocidad de cizalla al estar en una condición de temperatura del fluido de 25°C, sin embargo cuando la concentración de nanotubos está por debajo de 0.3%, comparando los resultados obtenidos a concentraciones más bajas se observa un cambio importante en la viscosidad con respecto al PAO sin aditivar.

En la literatura se encuentran resultados de viscosidad-velocidad de cizalla a temperaturas por encima de 25°C cuando la concentración de MWCNT es alta. Echandía y colaboradores [14] encontraron, por ejemplo, que a 55°C la viscosidad alcanza valores mayores que el lubricante no aditivado pero la mezcla tiene un comportamiento pseudoplástico. Para el caso de las concentraciones bajas utilizadas en este trabajo, se encontró que a 40°C la mezcla con la concentración de 0.05% de NTC tiene una viscosidad aproximada a la del PAO no aditivado y su comportamiento es dilatante, mientras que a la concentración de 0.01% la viscosidad aumenta para bajas velocidades de cizalla y a altas velocidades de cizalla se aproxima a la del PAO mostrando un comportamiento pseudoplástico. En general, el comportamiento del fluido al variar la velocidad de cizalla (dilatante, pseudoplástico y/o newtoniano) sufre cambios de gran magnitud en función de la concentración de NTC y naturalmente depende de la temperatura en la que se realice la prueba de viscosidad-velocidad de cizalla.

Echandía y colaboradores señalan que la variación de viscosidad con respecto a la velocidad de cizalla se debe a que la temperatura ayuda a dispersar los nanotubos y a las cantidades representativas de partículas en una fase continua,

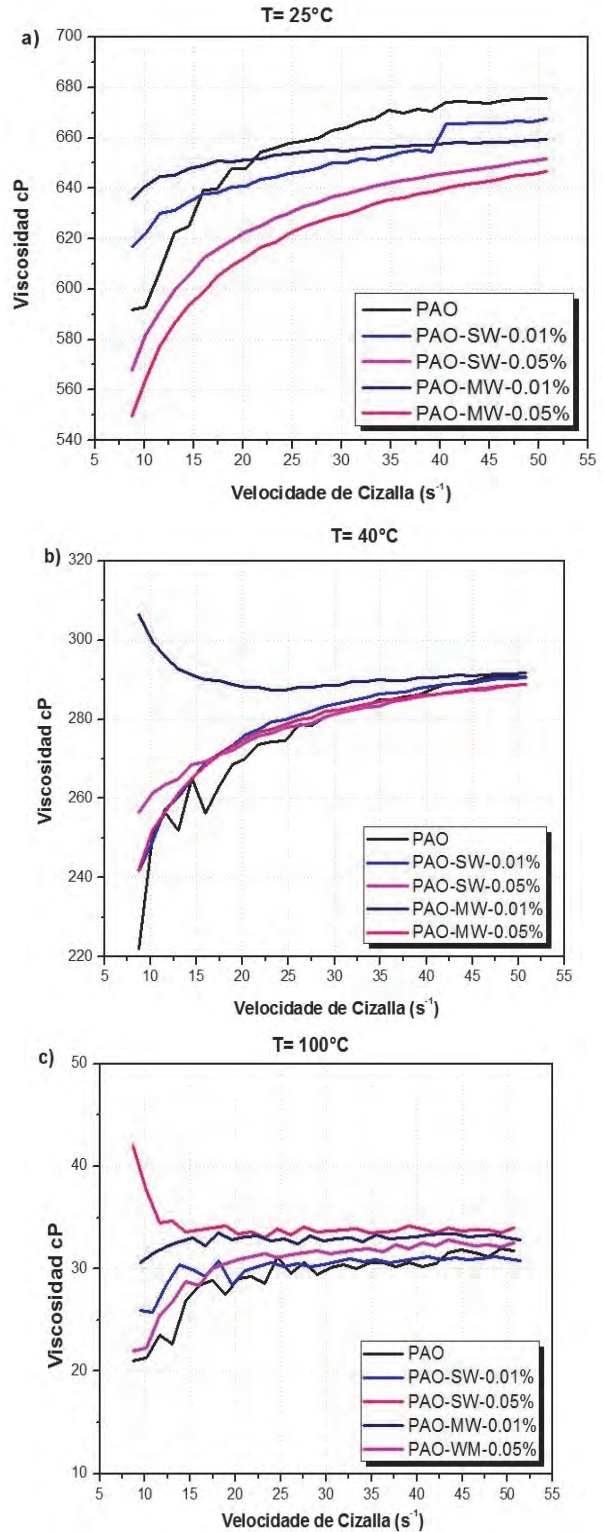


Figura 6. Viscosidad vs. Velocidad de cizalla para PAO. a) $T=25^{\circ}\text{C}$, b) $T=40^{\circ}\text{C}$, c) $T=100^{\circ}\text{C}$.

Fuente: Autores

ya que se requiere una mayor energía cuando hay una mayor cantidad de partículas en el fluido [14]. En el presente trabajo este resultado se pone en contexto al realizar análisis de

mezclas con concentraciones de NTC bajas, para las cuales se evidenció que la dependencia de la viscosidad con la velocidad de cizalla es menos relevante en la medida en que la concentración de NTC se va haciendo más baja.

3.2.2. Efecto de la temperatura

La Fig. 7 muestra la variación de la viscosidad de los lubricantes con la temperatura. Puede notarse que los resultados obtenidos para el aceite no aditivado coinciden con el valor de la ficha técnica, correspondiente a un lubricante de base sintética PAO. Además, se observa que el PAO aditivado con nanotubos presenta una tendencia muy similar a la del aceite base, de manera que se puede decir que los nanotubos no modifican la respuesta del lubricante hasta una temperatura de aproximadamente 60°C. A temperaturas mayores se observa que hay un ligero incremento de la viscosidad respecto al PAO, las razones para este comportamiento pueden en principio atribuirse a las propiedades térmicas de los nanotubos, pero para ser concluyente a este respecto es necesario adelantar pruebas específicas que se encuentran en ejecución y escapan al propósito de este trabajo.

3.2.3. Efecto del tiempo de ensayo

En la Fig. 8 se observan los resultados de la variación de la viscosidad con respecto al tiempo para una velocidad de cizalla fija de 30 s^{-1} . Al igual que el PAO no aditivado, la mayoría de las mezclas PAO-NTC presentaron un comportamiento independiente del tiempo. Sólo al inicio de las pruebas se observó una variación, especialmente en las mediciones a 25°C y 40°C, la cual se atribuyó principalmente a acomodación del equipo utilizado en los ensayos.

3.2.4. Mojabilidad (Ángulo de contacto)

La Fig. 9 muestra la variación del ángulo de contacto respecto al tiempo. En términos generales se puede observar que la adición de nanotubos de carbono tiene un efecto poco significativo en el ángulo de contacto del PAO. Sin embargo, puede decirse que existe una pequeña tendencia del ángulo

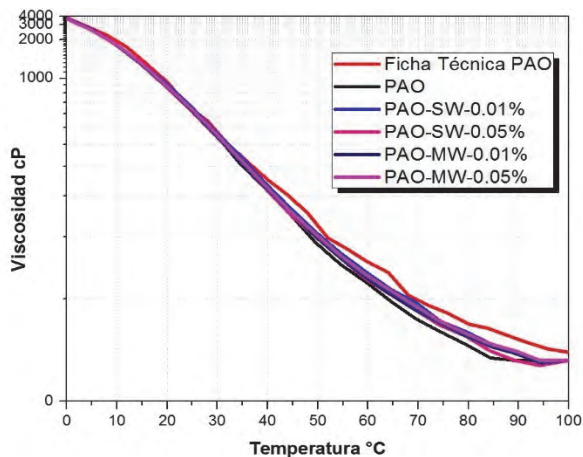


Figura 7. Viscosidad vs. Temperatura para PAO. Velocidad de cizalla 30 s^{-1}
Fuente: Autores

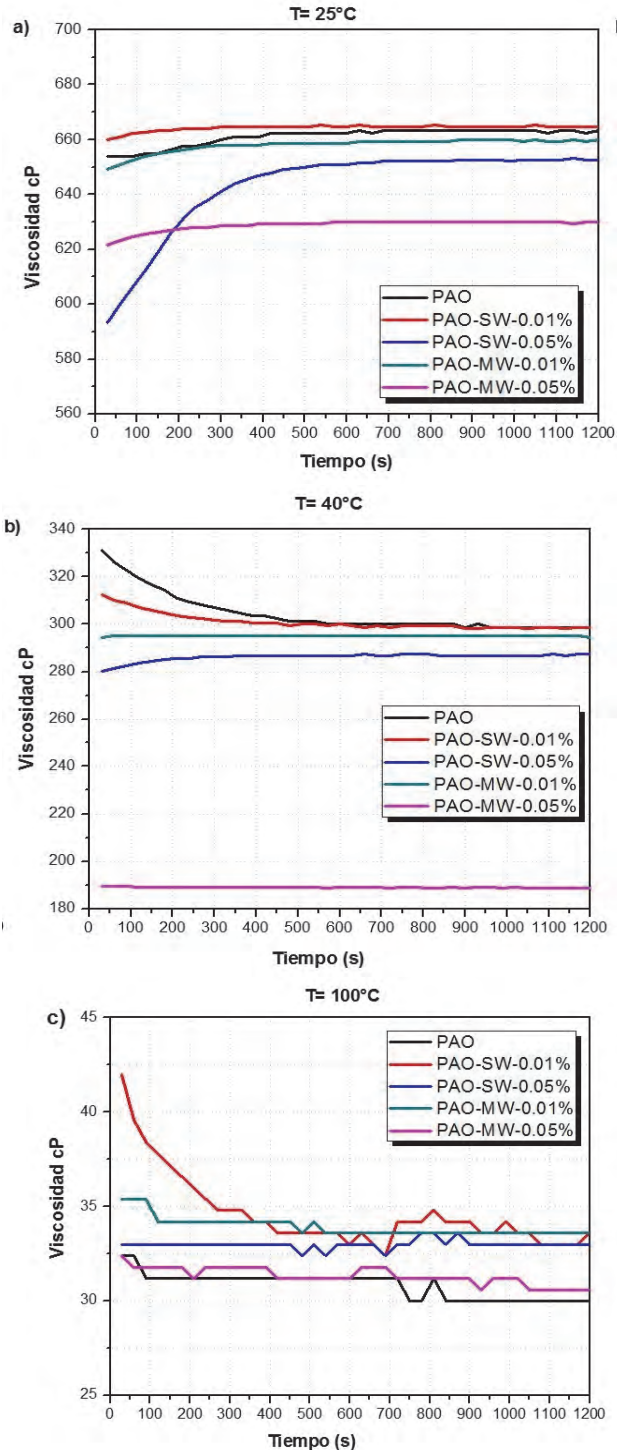


Figura 8. Viscosidad vs. Tiempo para PAO. Velocidad de cizalla 30 s^{-1}
Fuente: Autores

de contacto a disminuir con nanotubos de carbono monocapa, mientras que cuando se usan nanotubos multicapa el ángulo de contacto se incrementa respecto al PAO.

La Tabla 1 muestra el tiempo que requiere la gota para poder estabilizarse así como el ángulo de contacto promedio. Comparando el tiempo de estabilidad de la gota cuando se

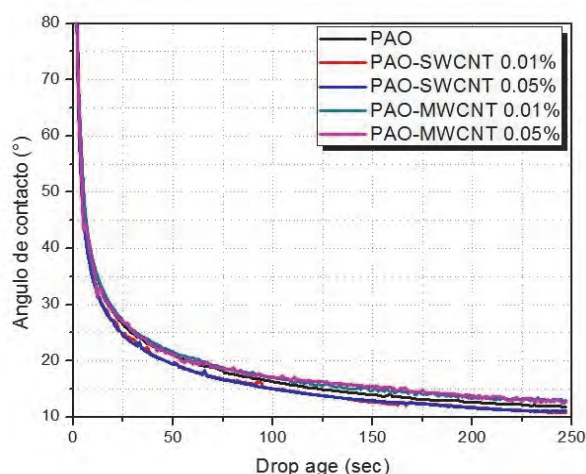


Figura 9. Ángulo de contacto para el PAO y PAO-NTC
Fuente: Autores

Tabla 1. Tiempo de estabilidad y ángulo de contacto para PAO y PAO-NTC

Muestra	Tiempo de estabilidad (s)	Ángulo de contacto (°)
PAO	30	11
PAO-SWCNT 0.01%	28	10.5
PAO-SWCNT 0.05%	28	10.5
PAO-MWCNT 0.01%	35	13
PAO-MWCNT 0.05%	35	13

Fuente: Autores

usan nanotubos de carbono monocapa estos requieren un menor tiempo de estabilidad y por lo tanto el ángulo de contacto disminuye con respecto al PAO. Cuando se usan nanotubos de carbono multicapa el tiempo de estabilidad de la gota aumenta así como el ángulo de contacto con respecto al PAO.

Se ha reportado en la literatura que la modificación del comportamiento del PAO y la incorporación de nanotubos de carbono monocapa y multicapa, puede estar relacionado debido al peso y la densidad que presentan los nanotubos de carbono monocapa respecto a los multicapa, en la cual puede influir el número de paredes, así como el diámetro interno y externo de los nanotubos de carbono usados [16].

4. Conclusiones

En este estudio se evaluaron las propiedades reológicas de nanotubos de carbono como aditivo en un aceite lubricante base Polialfaolefina (PAO). Se logró obtener nanotubos monocapa y multicapa por medio del método CVD así como su purificación y funcionalización con los grupos funcionales necesarios para que se dispersen en el PAO.

Los resultados indican que las concentraciones de NTC utilizadas condujeron a cambios en la respuesta del lubricante con la velocidad de cizallamiento, dependiendo del tipo de nanotubo usado como aditivo. Por otro lado, no se observaron

efectos significativos de la adición de nanotubos en la respuesta del lubricante con la temperatura.

Al igual que el PAO sin NTC, la mayoría de las mezclas PAO-NTC presentan un comportamiento independiente del tiempo. La modificación del PAO con NTC aumenta de resistencia al corte del lubricante, lo que podría ser significativo frente al desgaste y al coeficiente de fricción. Aunque los cambios son de pequeña magnitud, se observó que la mojabilidad del PAO aumenta con NTC multicapa y disminuye con NTC monocapa.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo brindado por la Institución Universitaria Pascual Bravo mediante el financiamiento del proyecto “Evaluación tribológica de un lubricante modificado con nanotubos de carbono para aplicación en sistemas rodantes-deslizantes” número de proyecto IN201404. Igualmente a la empresa P&G Colombia por el suministro del PAO y a la Universidad Pontificia Bolivariana por el acceso a la infraestructura para obtención de los NTC.

Referencias

- [1] Arai, S., Fujimori, A., Murai, M. and Endo, M., Excellent solid lubrication of electrodeposited nickel-multiwalled carbon nanotube composite films. *Materials Letters*, 62(20), pp. 3545-3548, 2008. DOI: 10.1016/j.matlet.2008.03.047
- [2] Wang, B., Wang, X., Lou, W. and Hao, J., Rheological and tribological properties of ionic liquid-based nanofluids containing functionalized multi-walled carbon nanotubes. *The Journal of Physical Chemistry C*, 114(19), pp. 8749-8754, 2010. DOI: 10.1021/jp1005346
- [3] Sánchez-Carrillo, A., Resistencia al rayado de nanocomposites de poliestireno reforzados con nanotubos de carbono modificados. Tesis, de Grado en Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica de Cartagena, Colombia, 2013, 176 P.
- [4] Abdel-Goad, M. and Pötschke, P., Rheological characterization of melt processed polycarbonate-multiwalled carbon nanotube composites. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 128(1), pp. 2-6, 2005. DOI: 10.1016/j.jnnfm.2005.01.008
- [5] Yang, Y., Grulke, E. A., Zhang, Z. G. and Wu, G., Temperature effects on the rheological properties of carbon nanotube-in-oil dispersions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 298(3), pp. 216-224, 2007. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2006.10.065
- [6] Xu, J., Chatterjee, S., Koelling, K.W., Wang, Y. and Bechtel, S.E., Shear and extensional rheology of carbon nanofiber suspensions. *Rheologica Acta*, 44(6), pp. 537-562, 2005. DOI: 10.1007/s00397-005-0436-5
- [7] Kim, B., Park, H. and Sigmund, W.M., Rheological behavior of multiwall carbon nanotubes with polyelectrolyte dispersants. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 256(2), pp. 123-127, 2005. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2004.12.063
- [8] García, A., Obtención y caracterización teórica y experimental de nanotubos de carbono dopados con diferentes elementos. Tesis Doctorado en Materiales. Centro de Investigación y de estudios avanzados del Instituto Politécnico Nacional: Santiago de Querétaro, México, 2010, 230 P.
- [9] Marshall, M.W., Popa-Nita, S. and Shapter, J.G. Measurement of functionalised carbon nanotube carboxylic acid groups using a simple chemical process. *Carbon*, 44(7), pp. 1137-1141, 2006. DOI: 10.1016/j.carbon.2005.11.010
- [10] Martin, J. M. and Ohmae, N., *Nanolubricants*, 13. John Wiley & Sons 2008. DOI: 10.1002/9780470987711

- [11] [11]López, J., Síntesis de nanopartículas metálicas de Ce y Zr soportadas sobre nanotubos de carbono y su aplicación en la adsorción de colorantes sintéticos. Tesis de Doctorado en Ingeniería Química. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Michoacán, México, 2014, 135 P.
- [12] [12]Dresselhaus, M.S., Dresselhaus, G., Saito, R. and Jorio, A. Raman spectroscopy of carbon nanotubes. Physics reports, 409(2), pp. 47-99, 2005. DOI: 10.1016/j.physrep.2004.10.006
- [13] [13] Lambert, J.B., Shurvell, H.F., Lightner, D.A. and Cooks, R.G. Introduction to organic spectroscopy. Macmillan Publishing Company, 1987.
- [14] [14] Echandia, L., Mejía, S., Osorio, D. y Rojas, N., Efecto reológico de la agregación de nanopartículas a fluidos lubricantes. Revista Colombiana de Materiales, [En línea]. (5), pp. 100-106, 2014. Disponible en: <http://aprendeenlinea.udea.edu.co/revistas/index.php/materiales/articulo/view/19437/16599>
- [15] [15]Sánchez, M.C., Berjano, M., Guerrero, A. y Gallegos, C., Evolución de las propiedades reológicas de emulsiones aceite vegetal en agua durante el proceso de emulsificación y almacenamiento. Grasas y aceites, [En línea]. 51(4), pp. 230-238, 2000. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Antonio_Guerrero2/publication/26523687_Evolucion_de_las_propiedades_reologicas_de_emulsiones_aceite_vegetal_en_agua_durante_el_proceso_de_emulsificacion_y_almacenamiento/links/0912f50cc3feab2b82000000.pdf
- [16] [16]Laurent, C., Flahaut, E. and Peigney, A., The weight and density of carbon nanotubes versus the number of walls and diameter. Carbon, 48(10), pp. 2994-2996 2010. DOI: 10.1016/j.carbon.2010.04.010

J.A.C. Cornelio, es Ing. Químico en 2010, del Instituto Tecnológico de Villahermosa México, MSc. en Ciencias en Ingeniería Química de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México, 2012. Dr. en Ciencias en Ingeniería Química, Se desempeña como Investigador de la Universidad Pontificia Bolivariana, en el Centro de Bioingeniería desde el 2015.
ORCID: 0000-0003-1953-6887

P.A. Cuervo, es Ing. Mecánica en 2010, de la Universidad Nacional de Colombia, MaSc. en Ingeniería - Materiales y Procesos en 2015, de la Universidad Nacional de Colombia. Se desempeña como Investigador en el Grupo de Tribología y Superficies de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín desde 2011.
ORCID: 0000-0003-3647-2096

M.I. Ardila, es Ing. Mecánica de la Universidad Pontificia Bolivariana, Esp. Tecnológica en Gestión de Proyectos con Énfasis en Finanzas de la Institución Universitaria Pascual Bravo, y candidata a MSc en Gestión Energética Industrial del Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín, Colombia. Actualmente ocupa el cargo de docente ocasional en la Institución Universitaria Pascual Bravo, Medellín, Colombia; donde dirige el grupo de investigación IDEGMA.
ORCID: 0000-0002-6817-0378

W. Orozco-Murillo, es Ing. Mecánico en 1994, de la Universidad Nacional de Colombia, Esp. en Gerencia de Mantenimiento en 2000 de la Universidad de Antioquia y MSc. en Gestión Energética Industrial en 2011 del Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín, Colombia. Es Par Académico CNA, Conferencista en temáticas de la Gestión de Mantenimiento Industrial y Hospitalaria. Decano encargado en una oportunidad del programa de Tecnología en Mantenimiento de Equipo Biomédico (ITM). Veinte (20) años de experiencia en docencia, Institución Universitaria Pascual Bravo, Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM), Universidad Nacional de Colombia. Un (1) año de experiencia en coordinación de prácticas empresariales (ITM). Más de diez (10) años como investigador Grupo de Investigación e Innovación Biomédica GI2B, ITM y Grupo de materiales y mantenimiento, IDEGMA, I.U Pascual Bravo, Autor de más de 10 artículos en revistas indexadas y en congresos internacionales, Asesor de Tesis de Grado en Pregrado y posgrados. En la actualidad docente auxiliar I.U Pascual Bravo.
ORCID: 0000-0003-4115-0286

L.F. Jaramillo, es estudiante de Ingeniería Química de la Universidad Nacional sede Medellín. Desde el 2014 pertenece al grupo de Tribología y Superficies de la Facultad de Minas de esta misma universidad. Actualmente cursa el sexto semestre.
ORCID: 0000-0003-1649-2399

L.M. Hoyos-Palacio, es Ing. Química en 2005, de la Universidad Nacional de Colombia. Dra. en Ingeniería; actualmente ocupa el cargo de coordinadora de Línea de Nanotecnología y Biomateriales, del Centro de Bioingeniería de la Universidad Pontificia Bolivariana. Es autora de múltiples artículos en revistas indexadas y en ponencias de congresos internacionales. Es par evaluador de proyectos de Colciencias y de revistas, es directora de trabajos de pregrado y postgrado en la Universidad Pontificia Bolivariana.
ORCID: 0000-0003-2430-8504

J. Lara-Romero, es Ing. Químico en 1992, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México y Dr. en Química en 1999, de la Universidad de Wisconsin-Milwaukee, Estados Unidos. Actualmente es Profesor-Investigador adscrito a la Facultad de Ingeniería Química en la Universidad Michoacana, México. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI), nivel II en México y sus áreas de interés son tribología y nano-materiales.
ORCID: 0000-0003-0216-364X

A. Toro, es Ing. Mecánico en 1997, de la Universidad Nacional de Colombia, Dr. en Ingeniería en 2001, de la Universidad de São Paulo, Brasil. Se desempeña como profesor de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín desde 2002.
ORCID: 0000-0002-5589-5820



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN

FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería
Química e Ingeniería de Petróleos

Oferta de Posgrados

Maestría en Ingeniería - Ingeniería Química
Maestría en Ingeniería - Ingeniería de Petróleos
Doctorado en Ingeniería - Sistemas Energéticos

Mayor información:

E-mail: qcaypet_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 5317

Entregando lo mejor de los **colombianos**



Línea de atención al Cliente Nacional: **01 8000 111 210**

Línea de atención al Cliente Bogotá: **(57-1) 472 2000**

► www.4-72.com.co

DYNA

83 (199), December, 2016

is an edition consisting of 150 printed issues
which was finished printing in the month of September of 2016
in Todograficas Ltda. Medellín - Colombia

The cover was printed on Propalcote C1S 250 g,
the interior pages on Hanno Mate 90 g.
The fonts used are Times New Roman, Imprint MT Shadow

- Plain-concrete strip road pavements: 3D finite element analysis
- Fault detection and diagnosis through artificial intelligence techniques, a state of art
- A college degree recommendation model
- Evaluación de la gestión financiera usando variables latentes en modelos estocásticos de fronteras eficientes
- Analysis of methanogenic and energetic potential from slaughterhouse wastewater using anaerobic digestion
- Reduction of computational times using the equivalent rectangle concept in the physics-based surface – subsurface models
- Automated detection of photoreceptors in in-vivo retinal images
- Effect of amplitude and pulse in low frequency ultrasound on oil/water emulsions
- IAn adaptive controller applied to an anti-lock braking system laboratory
- Modeling attenuation and dispersion of acoustic waves in porous media containing immiscible non viscous fluids
- Influence of the mixing ratio on the anaerobic co-digestion of municipal biowaste with domestic wastewater sludge on methane production
- Characterization of construction and demolition waste in order to obtain Ca and Si using a citric acid treatment
- Technical and economic study of striking and clearing operations in buildings under construction. Case study in Bogotá, Colombia
- Magnetic and structural behavior of $La_{1.5-x}Ba_{1.5+x-y}Ca_yCu_3O_z$ system $0.3 \leq x \leq 0.4$ and $0.4 \leq y \leq 0.5$
- Procedure to energetic analysis of centrifugal pumping systems
- Study of surface movement of a shallow-multilayered soil under P-waves
- Uplift force and momenta on a slab subjected to hydraulic jump
- The behavior of a foundation transversally loaded at the top over highly porous and collapsible soil
- The systemic approach as an analytical tool of an electronic device, case study: "iPod Nano seventh generation"
- Characterization of product design process of a company that provides design services. Proposal based on a process approach
- Patch antenna with reconfigurable sense of rotation for CubeSat satellite applications
- RWA: Optical Networks with Heuristics Algorithms
- A polynomial chaos expansion approach to the analysis of uncertainty in viscoelastic structural elements
- Construction, development and tests of a low cost, high efficiency stove-boiler for low calorific power biomasses
- Numerical determination of the solubility of vitamin C in various solvents, for selective extraction or for its incorporation in formulations oriented to care, welfare and health of the skin
- Gully erosion, land uses, water and soil dynamics: A case study of Nazareno (Minas Gerais, Brazil)
- Dual arm compressive spectral imaging in the visible and IR range
- The emission index as a parameter for assessing the environmental pollution from thermal power plants. Case study
- Gaussian clarification based on sign function
- Rheological properties of carbon nanotubes as additive in a lubricating fluid
- Pavimentos con placa-huella de concreto simple: Análisis con elementos finitos 3D
- Detección y diagnóstico de fallas mediante técnicas de inteligencia artificial, un estado del arte
- Modelo de recomendación de carreras universitarias
- Evaluation of financial management using latent variables in stochastic frontier analysis Ejemplo del formato de un artículo
- Análisis del potencial metanogénico y energético de las aguas residuales de una planta de sacrificio bovino mediante digestión anaeróbica
- Reducción de tiempos computacionales usando el concepto de rectángulo equivalente en los modelos físicos superficiales – subsuperficiales
- Detección automatizada de fotoreceptores en imágenes retinianas in-vivo
- Efecto de la amplitud y pulsación en ultrasonido de sonda a baja frecuencia sobre emulsiones aceite/agua
- Control adaptivo aplicado a un laboratorio de un sistema de frenos antibloqueo
- Modelado de atenuación y dispersión de ondas acústicas en medios porosos que contienen fluidos inmiscibles no viscosos
- Influencia de la proporción de mezcla en la codigestión anaerobia de biorresiduos municipales con lodos de aguas residuales domésticas sobre la producción de metano
- Caracterización de un residuo de construcción y demolición para la obtención de Ca y Si mediante tratamiento con ácido cítrico
- Estudio técnico económico de los procesos de cimbrado y descimbrado en edificaciones. Estudio de caso en Bogotá, Colombia
- Comportamiento magnético y estructural del sistema $La_{1.5-x}Ba_{1.5+x-y}Ca_yCu_3O_z$ $0.2 \leq x \leq 0.4$ y $0.3 \leq y \leq 0.5$
- Procedimiento para el análisis energético de sistemas de bombeo centrífugos
- Estudio del movimiento superficial de un suelo multi-capas poco profundo sometido a ondas P
- Fuerza de levantamiento y momentos en una losa sometida a salto hidráulico
- Comportamiento de cimentación cargada transversalmente en su cabeza en suelo altamente poroso y colapsable
- El enfoque sistémico como herramienta de análisis de un artefacto electrónico, caso de estudio: "iPod Nano de séptima generación"
- Caracterización del proceso de diseño de productos de una empresa prestadora de servicios de diseño. Propuesta basada en un enfoque de procesos
- Antena de parche con sentido de giro reconfigurable para aplicaciones en satélites CubeSat
- RWA: Redes Ópticas con Algoritmos Heurísticos
- Un enfoque de polinomio de expansión de caos al análisis de la incerteza en elementos estructurales visco elásticos
- Desarrollo, construcción y pruebas de una cocina-calentador de bajo costo y alta eficiencia energética para biomasa de reducido poder calorífico
- Determinación numérica de la solubilidad de la vitamina C en diferentes solventes, para la extracción selectiva o para la incorporación en formulaciones orientadas al cuidado, bienestar y salud de la piel
- Erosión, usos del suelo, la dinámica del agua y del suelo: Un estudio de caso de Nazareno (Minas Gerais, Brasil)
- Sistema dual para muestreo compresivo de imágenes espectrales en el rango visible e infrarrojo
- El índice de emisiones como parámetro para evaluar la contaminación ambiental de las Centrales Térmicas. Estudio de caso
- Clarificación gaussiana basado en la función signo
- Propiedades reológicas de nanotubos de carbono como aditivo en un fluido lubricante